



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Facultad de Ingeniería
y Ciencias

Ingeniería Biomédica

**Prototipo Biomédico para el Acompañamiento en la Rehabilitación Física de
Pacientes con Afectaciones en el Nervio Ciático Asociado con Discopatía Lumbar**

Dana Chelsy Torres Martínez

Director:

Profesor. Mauricio Vega Rengifo

Co- directora:

Doctora. Viviana Marcela Posada Pérez

2026

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por brindarme fortaleza, sabiduría y perseverancia durante cada etapa de mi formación profesional y durante el desarrollo de este trabajo de grado. En los momentos de cansancio, incertidumbre y dificultad, fue mi mayor guía y refugio permitiéndome levantarme una y otra vez para continuar este camino con fe, esperanza y determinación.

A mi familia, gracias por su amor incondicional, por cada sacrificio silencioso, cada palabra de aliento y cada abrazo en los momentos en los que me sentía que las fuerzas no eran suficientes. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba de mis capacidades, por acompañarme en cada paso y convertirse en el motor que impulsó este sueño. Este logro también les pertenece, porque detrás de cada página escrita, de cada noche de esfuerzo y de cada meta alcanzada, estuvo siempre su apoyo, paciencia y su amor.

Expreso mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que hicieron parte de este camino y que, de una u otra manera, dejaron huella en mi proceso académico y personal. A mis profesores y compañeros de universidad, gracias por compartir conmigo sus conocimientos, experiencias y calidad humana, convirtiendo cada aprendizaje en una oportunidad para crecer no solo como futura ingeniera biomédica, sino también como ser humano.

De manera muy especial, expreso mi más sincero agradecimiento al profesor Mauricio Vega Rengifo, director de este trabajo de grado, por su paciencia, dedicación y acompañamiento constante a lo largo de este proceso. Gracias por compartir conmigo sus conocimientos, por exigirme siempre dar lo mejor de mí y por brindarme la oportunidad de aprender más allá de lo académico. También, por enseñarme a enfrentar cada desafío con disciplina, responsabilidad y compromiso. Sus valiosos aportes, orientación y disposición durante el desarrollo de este proyecto fueron fundamentales para el enfoque y construcción de esta investigación, así como mi crecimiento académico y profesional. Su confianza y apoyo dejaron en mí enseñanzas que llevaré siempre a lo largo de mi vida profesional.

Asimismo, agradezco profundamente a la doctora Viviana Marcela Posada Pérez, quien con su orientación, disposición y apoyo constante marcó significativamente este proceso. Gracias por cada aporte, cada observación y cada consejo brindado con compromiso y respeto. Su exigencia académica, sus ideas y la confianza depositada en mí me impulsaron a mejorar continuamente y a creer más en mis capacidades. Más allá de la orientación profesional, su acompañamiento se convirtió en una motivación importante durante esta etapa de mi vida universitaria, dejando en mí una profunda admiración y gratitud. Gracias por convertirse en un apoyo fundamental durante este proceso, sino también como una persona que supo escuchar, orientar y aportar de manera significativa en momentos importantes de este camino.

Finalmente, agradezco a la Pontificia Universidad Javeriana Cali y a la carrera de Ingeniería Biomédica por abrirme las puertas de una etapa que transformó profundamente mi vida. Gracias por permitirme aprender, crecer, enfrentar desafíos y acercarme al sueño de convertirme en profesional. Cada experiencia vivida durante este camino quedará siempre en mi memoria y en mi corazón.

Resumen

El dolor asociado a discopatía lumbar y afectación del nervio ciático constituye una de las principales causas de discapacidad musculoesquelética, impactando la movilidad y la calidad de vida de los pacientes. Para el tratamiento de esta afección, la tracción lumbar es una técnica fisioterapéutica utilizada para aliviar la presión sobre los discos intervertebrales y mejorar la funcionalidad; sin embargo, su aplicación se encuentra limitada por la disponibilidad de equipos especializados, costosos y de difícil acceso en entornos académicos o domiciliarios. Por esta razón, este proyecto tiene el objetivo de diseñar y construir un prototipo de equipo biomédico, que, con la orientación de un fisioterapeuta, pueda en un futuro ser utilizado para la rehabilitación física de pacientes con afectación en el nervio ciático asociada a la discopatía lumbar como un complemento de la terapia física, entorno académicos o domiciliarios.

El prototipo a construir integrará elementos mecánicos que permitan regular parámetros de tracción, sin requerir intervención clínica directa, limitándose este proyecto a la evaluación de desempeño del prototipo sin realizar pruebas clínicas en pacientes, esperando que este sirva para realizar investigaciones en rehabilitación física a futuro.

Palabras Clave: nervio ciático, discopatía lumbar, tracción lumbar, fisioterapia, rehabilitación física, prototipo biomédico.

Abstract

Pain associated with lumbar discopathy, and sciatic nerve involvement is one of the leading causes of musculoskeletal disability, affecting patients' mobility and quality of life. For the treatment of this condition, lumbar traction is a physiotherapeutic technique used to relieve pressure on the intervertebral discs and improve functionality; however, its application is limited by the availability of specialized equipment, which is often expensive and difficult to access in academic or home environments. For this reason, this project aims to design and build a biomedical equipment prototype that, under the guidance of a physiotherapist, may in the future be used for the physical rehabilitation of patients with sciatic nerve involvement associated with lumbar discopathy, as a complement to physical therapy in academic or home settings.

The prototype to be developed will integrate mechanical elements that allow the regulation of traction parameters without requiring direct clinical intervention. This project is limited to evaluating the functional performance of the prototype and does not include clinical testing on patients. It is expected that the prototype may serve as a basis for future research in the field of physical rehabilitation.

Keywords: sciatic nerve, lumbar discopathy, lumbar traction, physiotherapy, physical rehabilitation, biomedical prototype.

Índice General

1.1	Planteamiento del Problema	10
1.2	Justificación	11
1.3	Objetivos.....	12
1.3.1	Objetivo General.....	12
1.3.2	Objetivos Específicos	12
1.	Marco de Referencia	13
1.4.1	Áreas Temáticas	13
1.4.2	Marco Teórico.....	13
1.4.3	Anatomía de la Columna Vertebral.....	13
1.4.3.1.	Vértebras lumbares (L1 – L5)	14
1.4.4.	Concepto de Biomecánica Lumbar.....	17
1.4.5.	Anatomía del Nervio Ciático.....	18
1.4.6.	Definición de Discopatía Lumbar	19
1.4.7.	Definición de Rehabilitación Física	20
1.4.8.	Definición de Tracción Lumbar.....	21
1.4.9.	Dispositivos Utilizados en Rehabilitación Lumbar	22
1.5.	Trabajos Relacionados	23
2.1	Métodos	27
2.2	Tipo de Estudio y metodología	27
2.3.	Plan de Trabajo y Fases de Desarrollo del Proyecto	28
2.3.1.	Desarrollo experimental del Prototipo	28
2.3.2.	Cronograma del Proyecto	29
3.1.	Resultados y discusión.....	31
3.2.	Resultados	31
3.2.1.	Diseño de conceptos.....	31
3.2.1.1.	Sistematización Metodológica del Diseño	31
3.2.1.2.	Definición y Priorización de necesidades del sistema a diseñar del prototipo.....	31
3.2.1.4.	Parámetros técnicos de diseño.....	35
3.2.2.	Diseño de Detalle.....	43
3.2.3.	Manufactura	45
3.2.3.1.	Materiales y Equipos	46
3.2.3.1.1.	Materiales estructurales	46
3.2.3.1.2.	Componentes mecánicos.....	47
3.2.3.1.3.	Herramientas de fabricación y montaje	47
3.2.3.1.4.	Instrumentos de medición y verificación	47
3.2.3.2.	Proceso de Fabricación	47

3.2.4. Verificación del equipo	64
3.2.4.1. Descripción General del Prototipo Construido	65
3.2.4.2. Funcionamiento del prototipo	65
3.3. Discusión	74
3.3.1. Análisis del desempeño mecánico del prototipo	74
3.3.2. Importancia del diseño desarrollado	74
3.3.3. Limitaciones encontradas	75
3.3.4. Proyección e impacto del proyecto.....	75
4.1 Conclusiones	76
4.2 Trabajos futuros	77
ANEXOS.....	78
A1. Encuesta fisioterapeuta.....	78
A1.1. Encuesta Inicial – Requerimientos.....	78
A1.2. Encuesta Final – Prueba y Evaluación del prototipo	80
A2. Listado de materiales adquiridos para prototipado	84
A4. Listado de maquinaria.....	90
A6. Manual de Uso.....	96
Bibliografía	126

Introducción

En el ámbito de la ingeniería biomédica, desempeña un papel fundamental aportar al fortalecimiento del sistema de salud mediante el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a mejorar los procesos clínicos y terapéuticos. En este contexto, el presente proyecto se enmarca en el área de la fisioterapia neuromusculoesquelética, con énfasis en la rehabilitación de pacientes que presentan afectaciones del nervio ciático asociado con discopatía lumbar, una condición que impacta significativamente la calidad de vida y funcionalidad de individuos.

El síndrome lumbociático se caracteriza por un dolor irradiado desde la región lumbar hacia las extremidades inferiores, debido a la compresión o irritación del nervio ciático [1]. El dolor en la región lumbar se posiciona como una de las afecciones musculoesqueléticas más comunes a nivel mundial, representando una de las principales causas de discapacidad. En el año 2021 se estimaron más de 600 millones de casos, evidenciando su impacto en la calidad de vida y la productividad de la población [2], [3].

La fisioterapia constituye uno de los enfoques terapéuticos más efectivos y accesibles para el manejo de esta condición. Dentro de sus técnicas, la tracción lumbar ha demostrado beneficios clínicos en la reducción del dolor y la descompresión de las raíces nerviosas, como lo reportan estudios recientes y revisiones sistemáticas orientadas a la radiculopatía lumbar [5], [6], [7]. A pesar de ello, la disponibilidad de equipos especializados continúa siendo limitada en contextos donde se requieren soluciones funcionales, de menor costo y con posibilidades de uso académico.

En el marco educativo y de investigación en biomédica, la ausencia de dispositivos accesibles para la aplicación controlada de tracción lumbar dificulta la comprensión práctica de los principios biomecánicos involucrados, así como la experimentación con parámetros técnicos relevantes para la rehabilitación. De esta manera, surge la necesidad de desarrollar prototipos que permitan estudiar, aplicar y analizar la tracción de manera segura y reproducible.

Frente a este panorama, el presente proyecto propone el diseño y construcción de un prototipo de tracción lumbar orientado al fortalecimiento de procesos formativos en ingeniería biomédica y al apoyo de intervenciones fisioterapéuticas. El modelo integrará elementos mecánicos que permitan la regulación de parámetros clave, así como la verificación funcional requerida para su uso académico y experimental.

CAPÍTULO 1

1.1 Planteamiento del Problema

Las afectaciones del nervio ciático asociadas con discopatía lumbar constituyen una de las principales causas de dolor musculoesquelético y discapacidad a nivel mundial. El dolor lumbar, del cual la ciática es una manifestación frecuente, fue catalogado como la condición musculoesquelética con mayor carga global de enfermedad en el estudio GBD 2021, afectando a cientos de millones de personas y generando un impacto socioeconómico significativo [2]. La degeneración de los discos intervertebrales y otros procesos patológicos de la columna lumbar afectan directamente al nervio ciático, ocasionando dolor irradiado, restricciones funcionales, pérdida de movilidad y deterioro en la calidad de vida [5], situación que resulta especialmente relevante en regiones como América Latina, donde la prevalencia es elevada y el acceso a servicios especializados de rehabilitación sigue siendo limitado [3].

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el dolor lumbar constituye una de las causas más frecuentes de consulta médica, y se estima que una proporción significativa de la población presentará episodios de ciática a lo largo de su vida [4]. Esta condición genera limitaciones funcionales, trastornos del sueño, disminución del rendimiento laboral y afectaciones psicológicas. En casos graves, la ciática puede evolucionar hacia discapacidad temporal o permanente si no se implementan intervenciones oportunas [3].

La fisioterapia se ha consolidado como uno de los pilares fundamentales en el manejo no quirúrgico de la ciática. Entre sus intervenciones, la tracción lumbar es empleada para descomprimir estructuras vertebrales y reducir la presión sobre el nervio ciático, mostrando beneficios en la reducción del dolor y la mejora funcional en distintas etapas de la lesión [6], [8]. Ensayos clínicos recientes también reportan efectos inmediatos positivos en la reducción del dolor cuando se aplica tracción bajo condiciones controladas [6], lo que respalda la importancia de contar con dispositivos precisos y ajustables. No obstante, el uso de tracción lumbar enfrenta importantes limitaciones prácticas. Los equipos disponibles suelen ser de gran tamaño, costosos y diseñados para uso exclusivo en centros clínicos, lo que dificulta su acceso en contextos domiciliarios o en zonas con recursos limitados. Además, muchos tratamientos dependen del criterio subjetivo de pacientes y terapeutas debido a la falta de sistemas biomédicos que permitan monitorear variables objetivas durante la terapia. Esto limita la personalización del tratamiento y reduce su eficacia, especialmente en regiones donde el acceso a tecnología especializada es escaso [9].

A partir de esta problemática, se evidencia la necesidad de desarrollar soluciones biomédicas accesibles, funcionales y orientadas a la rehabilitación de pacientes con afectaciones en el nervio ciático asociado con discopatía lumbar. En este contexto, surge la pregunta de investigación que guía el presente proyecto:

¿De qué manera puede diseñarse y construirse un prototipo biomédico de tracción lumbar que complemente las intervenciones fisioterapéuticas en pacientes con afectaciones del nervio ciático asociadas a discopatía lumbar, garantizando su funcionalidad mediante la verificación técnica del dispositivo?

1.2 Justificación

El acceso limitado a dispositivos de tracción lumbar constituye un desafío para la rehabilitación de personas con discopatía lumbar y afectación del nervio ciático, debido a que los equipos disponibles suelen ser costosos, de gran tamaño y exclusivos de entornos clínicos especializados [10], [11]. Aunque la tracción vertebral es una técnica utilizada para disminuir la compresión neural y contribuir al alivio sintomático, la disponibilidad restringida de equipos adecuados dificulta su aplicación sistemática en procesos de rehabilitación, especialmente en contextos con recursos limitados. Esto resalta la necesidad de desarrollar alternativas funcionales, seguras y técnicamente verificables que puedan complementar las intervenciones fisioterapéuticas.

En el plano teórico, este proyecto aporta a la ingeniería biomédica al integrar fundamentos biomecánicos de tracción lumbar con criterios fisioterapéuticos establecidos en la literatura científica. Diversos estudios describen parámetros como fuerzas de tracción, tiempos de aplicación, ángulos y variaciones mecánicas relevantes para garantizar una aplicación segura de la terapia [12], [13]. Dado que el alcance del proyecto excluye componentes electrónicos, simulaciones avanzadas, modelado digital, la contribución teórica se centra en consolidar y traducir estos lineamientos en requisitos técnicos para el diseño de un prototipo funcional.

En el ámbito práctico, el diseño y la construcción de un prototipo biomédico de tracción lumbar permiten evaluar la viabilidad técnica de un sistema orientado a ser accesible, modular y reproducible en entornos académicos. La verificación funcional del prototipo limitada a pruebas técnicas y no clínicas, por razones éticas y de bioseguridad proporciona evidencia sobre el desempeño mecánico del dispositivo y sienta las bases para desarrollos posteriores que podrían incorporar automatización, monitoreo o validación clínica [11]. Así, el proyecto cumple con el objetivo de generar una solución inicial que responda a lineamientos técnicos sin sobrepasar los límites establecidos.

Desde una perspectiva social y académica, esta propuesta se alinea con la creciente necesidad de tecnologías de rehabilitación más accesibles y adaptables, particularmente en regiones donde la disponibilidad de equipos especializados es limitada [6], [10]. Su desarrollo contribuye a la formación investigativa en ingeniería biomédica y abre la puerta a futuras investigaciones orientadas a optimizar el diseño, integrar componentes electrónicos como sensores o evaluar su efectividad terapéutica en estudios clínicos posteriores.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un prototipo para tracción lumbar que permita el complemento de las intervenciones fisioterapéuticas de personas con discopatía lumbar, mediante el diseño, la construcción de elementos y la verificación funcional del modelo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los requerimientos fisioterapéuticos relacionados con la tracción lumbar en el tratamiento de personas con discopatía lumbar, mediante la revisión de literatura científica e información directa de expertos.
- Diseñar los elementos del prototipo de tracción lumbar, a través de bocetos, dibujos técnicos, CAD y prueba de funcionalidad de las partes para la creación de prototipos digitales.
- Evaluar los elementos del prototipo mediante pruebas funcionales en condiciones controladas y cumplimiento de los parámetros técnicos para verificar la funcionalidad.

1. Marco de Referencia

1.4.1 Áreas Temáticas

2. Columna Vertebral – Región Lumbar
3. Biomecánica de la Región Lumbar
4. Nervio Ciático
5. Discopatía Lumbar
6. Rehabilitación Física
7. Tracción Lumbar
8. Prototipo Mecánico Aplicado a la Rehabilitación Física

1.4.2 Marco Teórico

1.4.3 Anatomía de la Columna Vertebral

La columna vertebral es una estructura anatómica fundamental del cuerpo humano encargada de proporcionar soporte, estabilidad y movilidad al tronco, además de proteger la médula espinal y las raíces nerviosas. Está compuesta por una serie de vértebras unidas entre sí mediante discos intervertebrales, ligamentos y articulaciones que permiten el movimiento y la distribución de cargas mecánicas en el cuerpo humano [14].

Anatómicamente, la columna vertebral se divide en cinco regiones: cervical, torácica, lumbar, sacra y coccígea ver Figura 1.1. La región cervical está conformada por siete vértebras (C1-C7), la región torácica por doce vértebras (T1-T12), la región lumbar por cinco vértebras (L1-L5), mientras que las regiones sacra y coccígea están constituidas por vértebras fusionadas [15].

Cada vértebra presenta características estructurales específicas que contribuyen al soporte corporal y a la protección del sistema nervioso central. Entre las vértebras se localizan los discos intervertebrales, estructuras fibrocartilaginosas encargadas de absorber impactos y facilitar la movilidad de la columna vertebral. Asimismo, la columna posee curvaturas fisiológicas naturales que ayudan a mantener el equilibrio corporal y mejorar la distribución de cargas durante la postura y el movimiento [16].

La región lumbar representa una de las zonas de mayor importancia biomecánica debido a que soporta gran parte del peso corporal y participa activamente en movimientos como la flexión, extensión y rotación del tronco. Debido a esta función mecánica, la región lumbar se encuentra expuesta constantemente a esfuerzos físicos y cargas compresivas que pueden favorecer la aparición de alteraciones musculoesqueléticas y patologías degenerativas [17].

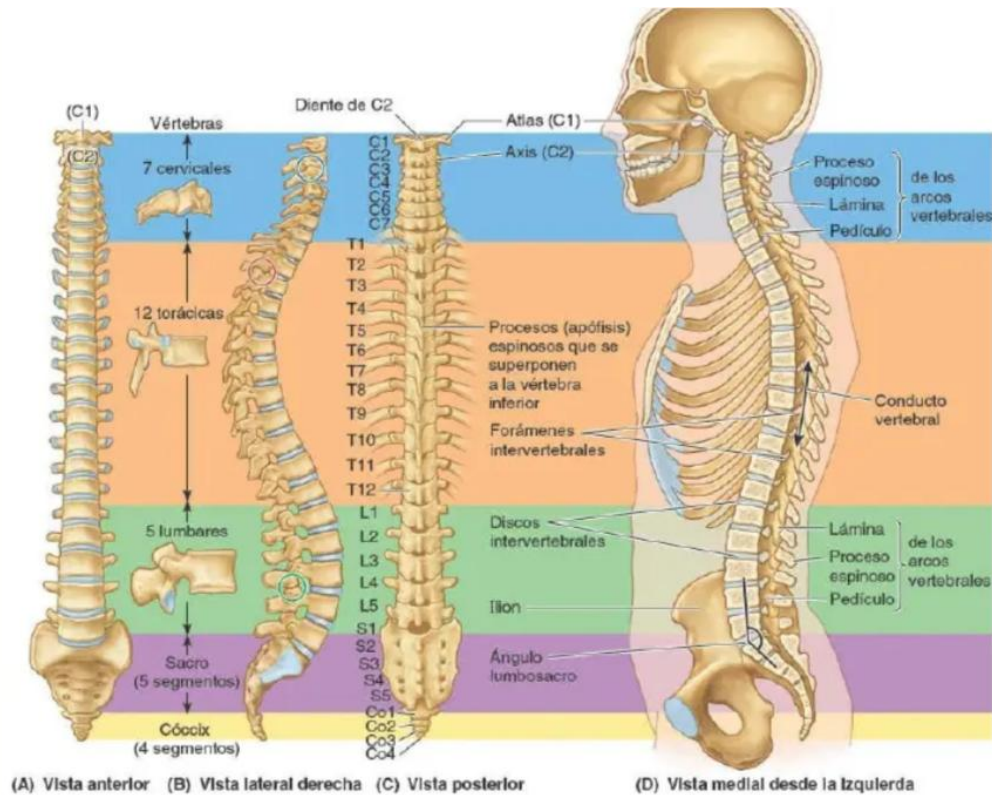


Figura 1.1. La columna vertebral está dividida en cinco regiones y está formada por vértebras y discos intervertebrales que soportan el peso corporal. El tamaño de las vértebras aumenta progresivamente hacia las regiones inferiores debido a la carga mecánica. Además, protege el conducto vertebral y permite la salida de los nervios espinales a través de los forámenes intervertebrales. (Fuente: [14])

1.4.3.1. Vértebras lumbares (L1 – L5)

Las cinco vértebras lumbares son las más voluminosas de la columna, característica directamente relacionada con la magnitud de las cargas que soportan. Cada vértebra está constituida por un cuerpo vertebral robusto de forma cilíndrica, un arco neural que delimita el canal vertebral, apófisis transversas, espinosa y cuatro apófisis articulares que forman las articulaciones cigapofisarias [18].

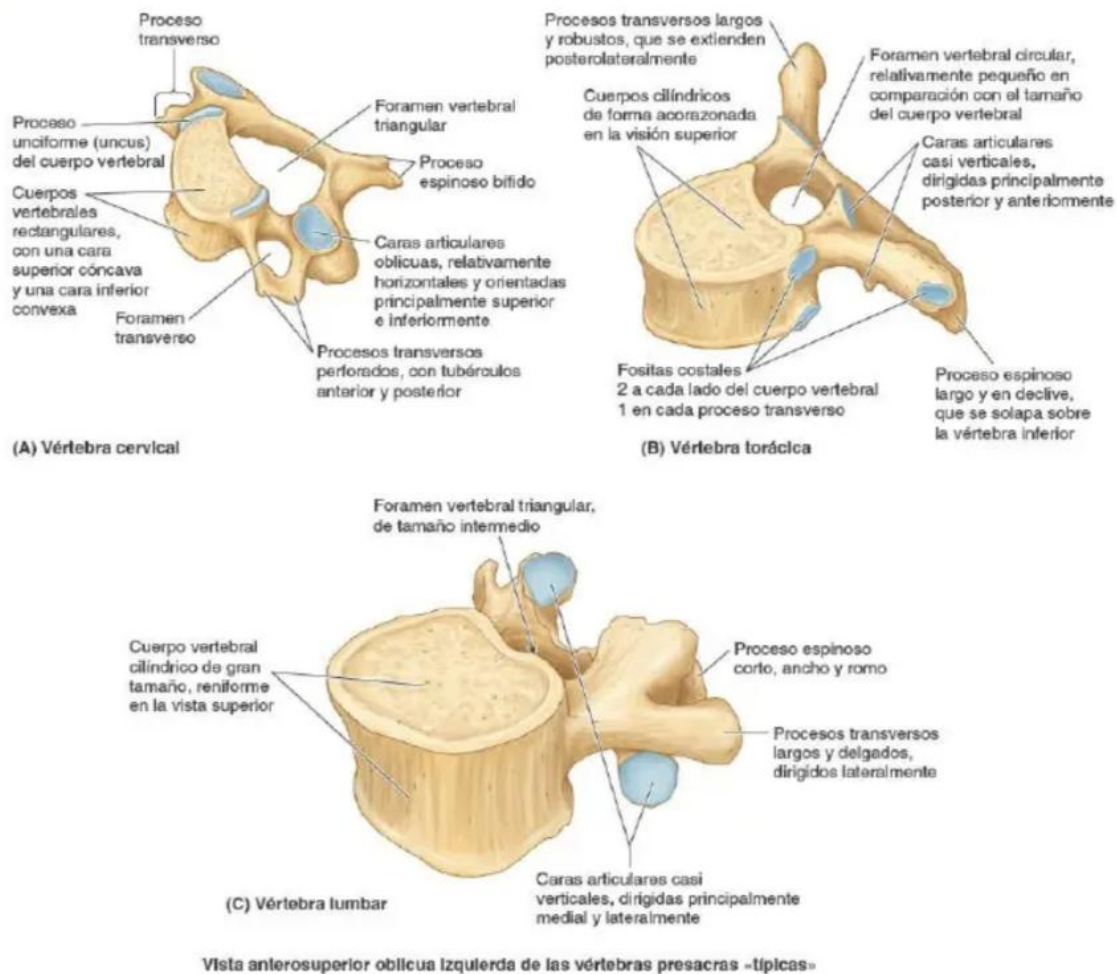


Figura 1.2. Comparación de las vértebras presacras. A medida que se desciende por la Columna vertebral, los cuerpos vertebrales aumentan de tamaño, en relación con la carga del peso corporal que han de soportar. El tamaño del conducto vertebral varía en función del diámetro de la médula espinal. (Fuente: [14])

La vértebra L5 articula con el sacro a través de la articulación lumbosacra (L5-S1), considerada la unión de mayor estrés biomecánico en la columna. Las carillas articulares lumbares están orientadas en el plano sagital, facilitando la flexoextensión y limitando la rotación axial [19].

1.4.3.2. Discos Intervertebrales

Los discos intervertebrales son estructuras fibrocartilaginosas interpuestas entre cuerpos vertebrales adyacentes, constituyendo aproximadamente el 25% de la longitud total de la columna. Cada disco está compuesto por el núcleo pulposo y el anillo fibroso [18].

El núcleo pulposo es una estructura gelatinosa con alto contenido en agua (70-90% en individuos jóvenes) y proteoglicanos, que le confieren propiedades viscoelásticas para la

distribución hidrostática de cargas compresivas. Con el envejecimiento, el contenido hídrico disminuye, reduciendo la capacidad amortiguadora [20].

El anillo fibroso está compuesto por láminas concéntricas de fibras de colágeno tipo I y tipo II, dispuestas en ángulos alternados de aproximadamente 65° respecto al plano horizontal, confiriéndole resistencia a tensión, compresión, cizallamiento y torsión [21].



Figura 1.3. Vértebras y discos intervertebrales lumbares. (Fuente: [14])

1.4.3.3. Músculos y ligamentos de Soporte Lumbar

Los músculos paravertebrales —erector de la columna (iliocostal, longísimo y espinoso) y multifido— son los principales responsables de la extensión lumbar. El músculo multifido tiene una función estabilizadora segmentaria de gran relevancia clínica; su atrofia selectiva ha sido documentada en pacientes con dolor lumbar crónico [22].

El ligamento longitudinal anterior (LLA) y el posterior (LLP) recorren las caras anterior y posterior de los cuerpos vertebrales, limitando movimientos extremos. El ligamento amarillo (ligamentum flavum), de naturaleza elástica, conecta los arcos vertebrales adyacentes y mantiene la tensión del canal vertebral [18].

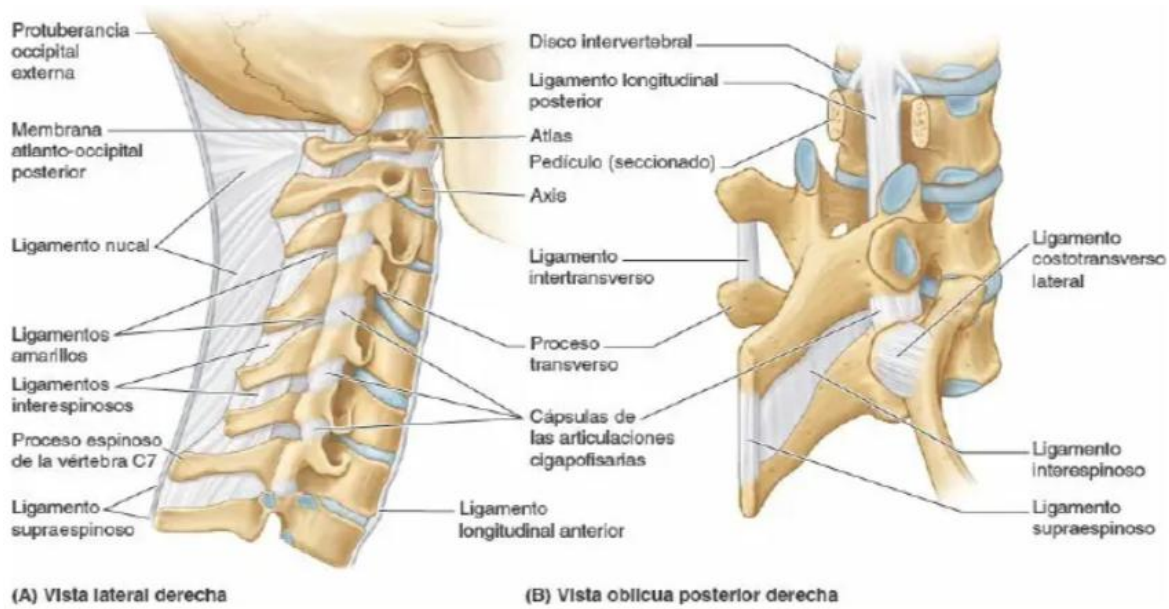


Figura 1.4. Articulaciones y ligamentos de la columna vertebral. **A)** Se muestran los ligamentos de la región cervical. Por encima del proceso espinoso prominente de C7 (vértebra prominente). **B)** Se muestran los ligamentos de la región torácica. (Fuente: [14])

1.4.4. Concepto de Biomecánica Lumbar

La biomecánica lumbar estudia las fuerzas, movimientos y deformaciones que ocurren en la región lumbar durante actividades estáticas y dinámicas, integrando principios de mecánica clásica, fisiología muscular e ingeniería de materiales [22]. El modelo de la unidad funcional vertebral (UFV) —conformada por dos cuerpos vertebrales y el disco interpuesto— es la base conceptual del análisis biomecánico segmentario [19].

1.4.4.1. Distribución de Cargas en la Columna Lumbar

En bipedestación relajada, la presión intradiscal a nivel L3-L4 es de aproximadamente 0.5 MPa; en sedestación con flexión anterior puede superar 1.0 MPa. Nachemson [23] realizó mediciones pioneras in vivo que establecieron los valores de referencia para distintas posiciones, refinados posteriormente por Sato et al. [24].

Aproximadamente el 80% de las cargas se transmite a través de los cuerpos vertebrales y discos, y el 20% restante a través de las articulaciones cigapofisarias. En extensión lumbar, la participación facetaria puede aumentar al 30-40% [25].

1.4.4.2. Movimientos de la Región Lumbar

La región lumbar permite movimientos en los tres planos: flexión anterior 40°-60°, extensión 20°-35°, flexión lateral 15°-20° por lado y rotación axial 3°-5° por segmento. El acoplamiento de movimientos —flexión lateral acoplada con rotación axial contralateral— tiene implicaciones clínicas en el diseño de dispositivos de rehabilitación [22].

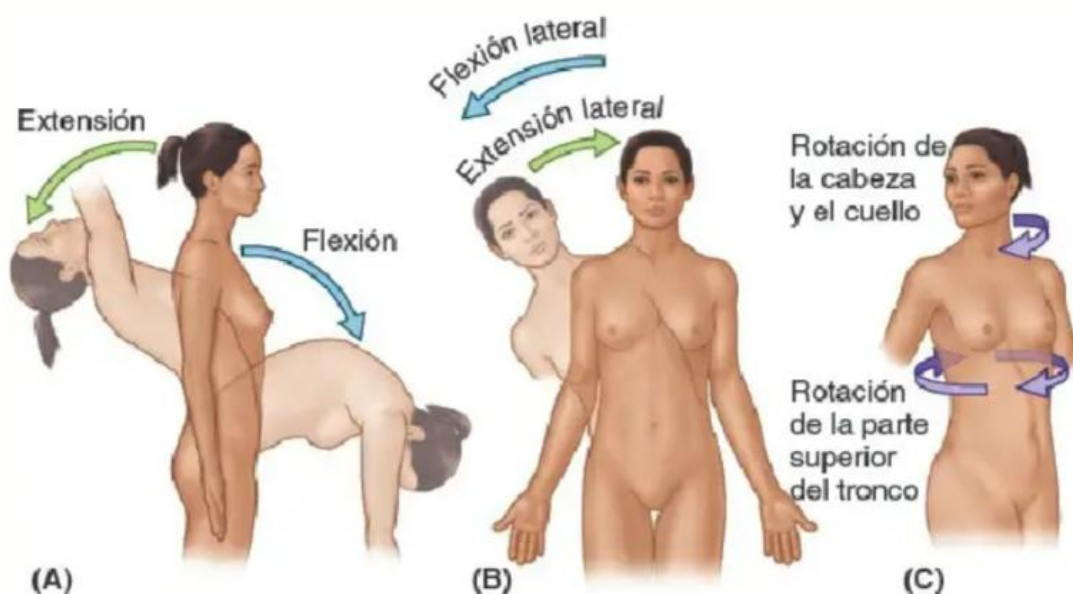


Figura 1.5. Movimientos de la columna vertebral. (Fuente: [14])

1.4.4.3. Compresión y Presión Intradiscal

En condiciones normales, el núcleo pulposo distribuye hidrostáticamente las cargas compresivas hacia el anillo fibroso. Con la degeneración, esta capacidad se reduce, concentrando las tensiones en regiones específicas del anillo. La tracción lumbar actúa directamente reduciendo la presión intradiscal e incrementando el espacio intervertebral [22].

1.4.4.4. Relación Biomecánica entre Discopatía y Dolor Lumbar

La discopatía altera la distribución normal de cargas, generando estrés mecánico en estructuras adyacentes como articulaciones cigapofisarias, ligamentos y músculos paravertebrales. Este estrés mantenido puede desencadenar respuestas inflamatorias y sensibilización central que perpetúan el dolor [25]. La disminución de la altura discal reduce el forámen intervertebral, predisponiendo a la radiculopatía [18].

1.4.5. Anatomía del Nervio Ciático

El nervio ciático es el nervio periférico más largo y voluminoso del cuerpo humano. Se origina en el plexo lumbosacro a partir de las raíces L4, L5, S1, S2 y S3, figura 5.1, formando un tronco único que discurre por la cara posterior del muslo y se divide en la fosa poplítea en el nervio tibial y el nervio fibular común [14].

Anatómicamente abandona la pelvis por el agujero ciático mayor, habitualmente por debajo del músculo piriforme. Esta relación topográfica tiene relevancia clínica en el síndrome del músculo piriforme, condición que puede simular una radiculopatía lumbosacra [15].

1.4.5.1. Función Motora y Sensitiva

El nervio ciático es un nervio mixto que inerva todos los músculos de la región posterior del muslo y, a través de sus ramas terminales, todos los músculos de la pierna y el pie. La función sensitiva abarca la cara posterior del muslo, la pierna (excepto la cara medial) y el pie [20].

La integridad funcional se evalúa mediante reflejos osteotendinosos (rotuliano L4, aquileo S1), sensibilidad cutánea en los dermatomas correspondientes y fuerza muscular de los miotomas involucrados [18].

1.4.5.2. Compresión del Nervio Ciático

La causa más frecuente de compresión es la hernia de disco lumbar, que afecta predominantemente los niveles L4-L5 y L5-S1, seguida por estenosis del canal vertebral, espondilolistesis y síndrome piriforme [26]. La fisiopatología involucra mecanismos mecánicos directos y respuestas inflamatorias mediadas por citocinas proinflamatorias liberadas por el tejido discal herniado [27].

1.4.5.3. Síndrome Ciático y Sintomatología

El síndrome ciático se caracteriza por dolor irradiado desde la región glútea hacia la cara posterior del muslo y la pierna. La sintomatología varía según el nivel radicular afectado [28]:

- Raíz L4: dolor en muslo anterior y cara medial de la pierna; debilidad en extensión de rodilla; reflejo rotuliano disminuido.
- Raíz L5: dolor en cara lateral del muslo, pierna y dorso del pie; debilidad en dorsiflexión del pie.
- Raíz S1: dolor en cara posterior del muslo y pie lateral; debilidad en flexión plantar; reflejo aquileo disminuido.

1.4.6. Definición de Discopatía Lumbar

La discopatía lumbar engloba el conjunto de alteraciones patológicas que afectan a los discos intervertebrales lumbares, desde cambios degenerativos leves hasta lesiones estructurales graves como la hernia discal. Estas alteraciones comprometen la función amortiguadora del disco, alteran la estabilidad segmentaria y pueden comprimir estructuras neurales [18].

1.4.6.1. Causas y Factores de Riesgo

La etiología es multifactorial. Los factores de riesgo establecidos incluyen: edad avanzada, exposición laboral a cargas físicas pesadas, vibración corporal global, tabaquismo (que compromete la nutrición discal por difusión) y predisposición genética [29]. Biomecánicamente, las posturas de flexión mantenida con carga y los movimientos de flexión-rotación repetidos son los mecanismos más frecuentemente implicados en hernias agudas [25].

1.4.6.2. Tipos de Discopatía Lumbar

La clasificación de Fardon et al. [30] establece las siguientes categorías: (1) Degeneración discal, proceso crónico de pérdida de altura y deshidratación; (2) Protrusión discal, desplazamiento focal sin ruptura del anillo fibroso; (3) Extrusión discal, el material nuclear supera el anillo, pero permanece conectado al disco; y (4) Secuestro discal, fragmento que pierde continuidad con el disco de origen.

1.4.6.3. Hernia Discal y Protrusión Discal

La hernia de disco lumbar es la causa más frecuente de radiculopatía lumbosacra. Los niveles L4-L5 y L5-S1 son los más afectados. La resolución espontánea es un fenómeno documentado, atribuido a deshidratación, retracción y fagocitosis del material herniado, sustentando la preferencia por el tratamiento conservador como primera línea [31].

1.4.6.4. Relación entre Discopatía Lumbar y Afectación del Nervio Ciático

La hernia discal genera compresión mecánica directa sobre las raíces constituyentes del nervio ciático. Sin embargo, el componente inflamatorio mediado por fosfolipasa A2, interleuquinas y TNF- α liberados por el tejido discal desempeña un papel fundamental en la génesis del dolor radicular [27]. Esta dualidad fisiopatológica —mecánica e inflamatoria— justifica los enfoques terapéuticos combinados.

1.4.7. Definición de Rehabilitación Física

La rehabilitación física es el proceso terapéutico orientado a restaurar, mantener o mejorar la capacidad funcional mediante intervenciones basadas en evidencia. Según la OMS [32], es un conjunto de intervenciones para optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad. En afecciones lumbares persigue: reducción del dolor, restauración de la movilidad, fortalecimiento muscular, corrección de patrones de movimiento y prevención de recidivas [33].

1.4.7.1. Intervenciones fisioterapéuticas

1. Terapia Manual: Engloba manipulación vertebral (alta velocidad, baja amplitud), movilización articular y técnicas de tejido blando. Sus mecanismos de acción son neurológicos (modulación del dolor por activación de mecanorreceptores), biomecánicos (restauración de movilidad) y neurofisiológicos (reducción del espasmo) [34]. La evidencia apoya su uso en el dolor lumbar agudo y subagudo combinada con ejercicio [35].
2. Ejercicio Terapéutico: Constituye el pilar fundamental de la rehabilitación lumbar a largo plazo, incluyendo ejercicios de estabilización del núcleo (core stability), fortalecimiento paravertebral y glúteo, y entrenamiento del control motor. Richardson et al. [36] enfatizan la activación selectiva del multífido y transverso del abdomen como base rehabilitadora. Los ejercicios de McKenzie han demostrado eficacia en hernia discal con síntomas radiculares [37].
3. Electroterapia: Comprende TENS, corriente interferencial, electroestimulación neuromuscular y ultrasonido terapéutico. El TENS actúa mediante la teoría de la compuerta del dolor de Melzack y Wall [38], inhibiendo la transmisión nociceptiva a nivel medular. La corriente interferencial y el TENS de alta frecuencia han mostrado beneficios a corto plazo en el control del dolor lumbar [39].

1.4.8. Definición de Tracción Lumbar

La tracción lumbar es una técnica terapéutica que consiste en la aplicación de una fuerza de distracción a la columna lumbar para separar los cuerpos vertebrales adyacentes, reducir la presión sobre los discos intervertebrales y aliviar la compresión de las raíces nerviosas. Desde una perspectiva física, aplica una fuerza lineal a lo largo del eje longitudinal de la columna generando un momento de distracción que contrarresta las fuerzas compresivas habituales [40].

1.4.8.1. Objetivos Terapéuticos de la Tracción Lumbar

Sus objetivos incluyen: reducción de la presión intradiscal; ampliación del forámen intervertebral; elongación de estructuras ligamentosas y musculares; inhibición del espasmo muscular reflejo; y estimulación de mecanorreceptores articulares con efecto analgésico [41]. Se indica principalmente en hernia discal lumbar, radiculopatía lumbosacra, estenosis del canal y síndrome facetario [42].

1.4.8.2. Tipos de Tracción

Según el modo de aplicación se distingue la tracción continua —fuerza constante durante la sesión— y la intermitente —fuerza alternante entre un valor máximo y mínimo—. Esta última es mejor tolerada y puede ser más efectiva para movilizar estructuras rígidas [43]. Según el medio: tracción mecánica (dispositivos motorizados), manual (por el terapeuta), gravitacional (peso corporal) y autotracción [44].

1.4.8.3. Parámetros de Aplicación de la Tracción Lumbar

La magnitud de la fuerza debe superar la resistencia friccional del peso corporal; se recomienda iniciar con 25-30% del peso corporal e incrementar progresivamente hasta 50-60% según tolerancia [44]. La duración oscila entre 15 y 30 minutos, con frecuencia de 3 a

5 sesiones semanales durante 4 a 6 semanas. En tracción intermitente, los ciclos de 60:20 segundos (tracción:reposo) son los más utilizados [42].

1.4.8.4. Beneficios y Efectos Biomecánicos de la Tracción Lumbar

Tadano et al. [45] demostraron mediante resonancia magnética que la tracción mecánica produce separación significativa de los cuerpos vertebrales en L4-L5 y L5-S1, con incrementos en la altura discal de hasta 1-2 mm bajo fuerzas de 400-600 N. Chow et al. [46] confirmaron la reducción de la presión intradiscal durante la tracción, con valores inferiores a los registrados en decúbito supino sin tracción.

1.4.8.5. Indicaciones y Contraindicaciones de la Tracción Lumbar

Las contraindicaciones absolutas comprenden: embarazo; tumores o metástasis vertebrales; fractura vertebral inestable; infección vertebral activa; síndrome de la cola de caballo; e inestabilidad ligamentosa severa. Las contraindicaciones relativas incluyen: osteoporosis severa, hipertensión arterial no controlada y dolor exacerbado con la tracción [41].

1.4.8.6. Tracción Lumbar como Complemento Terapéutico en Rehabilitación Física

La tracción lumbar se concibe actualmente como componente de un programa multimodal de rehabilitación. Su combinación con ejercicio terapéutico y terapia manual ha mostrado resultados superiores a la tracción aislada. Fritz et al. [47] identificaron que los pacientes con radiculopatía lumbar aguda y signos de tensión neural positivos responden mejor a la tracción mecánica combinada con ejercicio.

1.4.9. Dispositivos Utilizados en Rehabilitación Lumbar

Los dispositivos de tracción lumbar convencionales —como el Saunders Lumbar Traction Device o el Chattanooga Triton— son mesas computarizadas que permiten programar con precisión los parámetros de tratamiento, pero presentan limitaciones de tamaño, costo elevado y restricción al entorno clínico [44]. Carvajal Tello et al. [48] describieron el diseño de un dispositivo terapéutico hospitalario que integra componentes electrónicos y mecánicos con criterios de ergonomía y seguridad, validado positivamente en cuanto a funcionalidad y usabilidad.

1.4.9.1. Sistemas Mecánicos de Tracción Lumbar

Un sistema mecánico de tracción lumbar incluye los subsistemas de sujeción del paciente (arneses pélvico y torácico), el mecanismo generador de fuerza (motores eléctricos, poleas o actuadores lineales), el sistema de transmisión de fuerza y la estructura de soporte. El diseño del arnés pélvico es crítico, ya que debe distribuir la fuerza uniformemente sobre las crestas ilíacas sin generar puntos de presión excesivos [44].

Fernández Parra y Mora Tola [49] desarrollaron un prototipo de tracción lumbar con modalidades continua e intermitente, combinando principios de ingeniería mecánica y control electrónico, constituyendo un antecedente relevante para el desarrollo de prototipos en el contexto académico.

1.4.9.2. Materiales y Mecanismos de Tracción

La selección de materiales debe contemplar criterios de resistencia mecánica, peso, durabilidad y viabilidad de manufactura. Los materiales más utilizados incluyen aleaciones de aluminio para estructuras de soporte, aceros inoxidables para elementos de transmisión de fuerza, y polímeros de alta resistencia (ABS, PETG, nylon) para componentes fabricados mediante impresión 3D [50].

Los mecanismos de generación de fuerza pueden implementarse mediante: sistemas de tornillo sin fin y husillo de bolas (alta precisión), sistemas de poleas y cable (simplicidad y bajo costo), actuadores lineales eléctricos (control electrónico preciso) o sistemas neumáticos (suavidad de aplicación). La elección impacta directamente en la precisión, velocidad de respuesta y costo de fabricación [51].

1.4.9.3. Parámetros Funcionales en Sistemas de Tracción

Los parámetros funcionales requeridos incluyen: rango de fuerza ajustable (0-600 N para adultos), control del modo de tracción (continua o intermitente), ajuste de duración de sesión, posición del paciente configurable y mecanismos de seguridad que limiten la fuerza máxima [42]. La reproducibilidad de los parámetros es fundamental para la comparación entre sesiones y el seguimiento de la evolución clínica [43].

1.4.9.4. Importancia del Desarrollo de Prototipos Mecánicos para Rehabilitación

Física

El desarrollo de prototipos mecánicos para rehabilitación física representa un área de creciente interés en la ingeniería biomédica, motivado por la necesidad de alternativas accesibles y portátiles para contextos con recursos limitados [50]. El proceso sigue metodologías sistemáticas: identificación de requisitos clínicos, diseño conceptual, modelado, fabricación, verificación y validación. La colaboración interdisciplinaria entre ingenieros y profesionales de la salud es fundamental para garantizar que el prototipo cumpla con los estándares de seguridad de la normativa colombiana (Decreto 4725 de 2005) [51].

1.5. Trabajos Relacionados

Durante la revisión de trabajos relacionados se identifican diversos dispositivos y desarrollos mecánicos orientados a la movilización y tracción de la columna lumbar. Estos estudios destacan la importancia del diseño estructural, la ergonomía y la correcta aplicación de fuerzas terapéuticas para apoyar la rehabilitación física. Aunque algunos sistemas integran electrónica o monitoreo avanzado, la mayoría de los aportes relevantes para este proyecto se centran en principios mecánicos y de funcionamiento que sirven como base para la construcción técnica del prototipo de tracción lumbar propuesto.

- Gallego Ruiz realizó un análisis de posibles modificaciones en el diseño de equipos de tracción lumbar, enfocándose en los mecanismos de transmisión de fuerza, la fricción del sistema, la distribución de cargas sobre el paciente y los materiales

utilizados en la estructura mecánica [52]. El estudio concluyó que la fuerza aplicada debe superar aproximadamente el 50% del peso corporal para vencer la fricción de la superficie y generar una tracción efectiva sobre la columna lumbar. Este trabajo constituye uno de los antecedentes más relacionados con el presente proyecto debido a su enfoque en el rediseño mecánico de dispositivos de tracción lumbar.

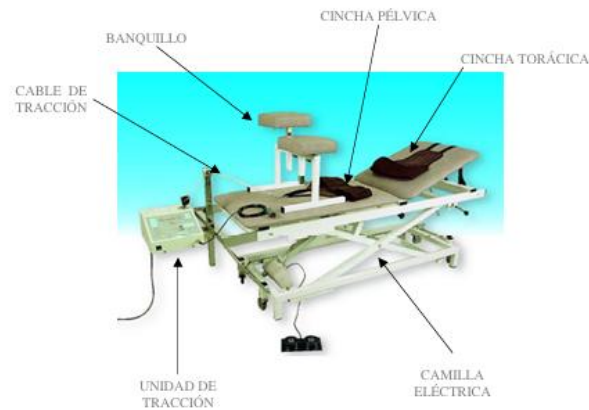


Figura 1.6. Componentes de un equipo de tracción lumbar (Fuente [52])

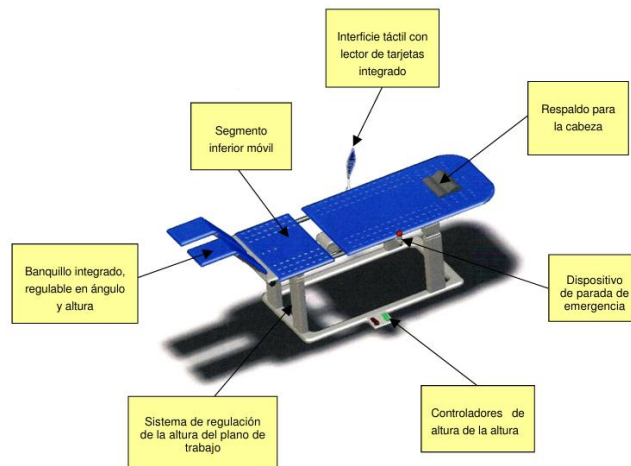


Figura 1.7. Equipo de tracción lumbar modificado: elementos destacables (Fuente [52])

- Park et al. desarrollaron un modelo biomecánico de elementos finitos de la columna lumbar (L1-S1) para analizar los efectos de una terapia de tracción en dos etapas: tracción axial global y descompresión local [53]. Los resultados mostraron reducción de la presión intradiscal y del estrés sobre el anillo fibroso en comparación con la tracción convencional. Este estudio aporta fundamentos biomecánicos relevantes para el dimensionamiento y análisis estructural del sistema de tracción propuesto.

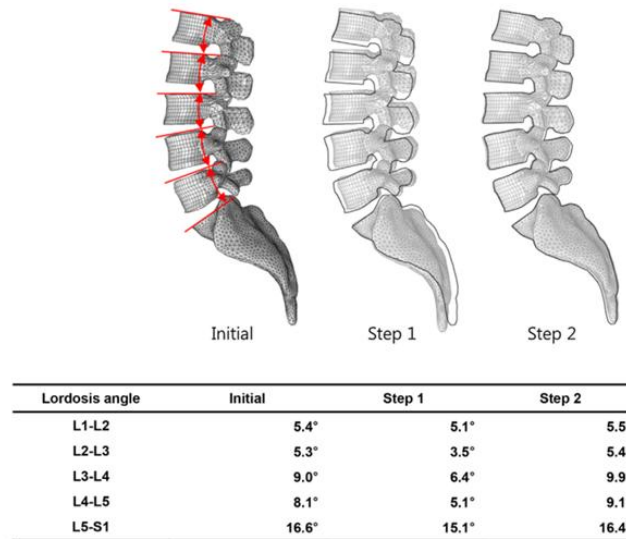


Figura 1.8. Ángulos de lordosis entre los planos superiores de las vértebras superior e inferior durante la terapia de tracción en dos etapas. Las líneas continuas en las etapas 1 y 2 muestran las posiciones iniciales de las vértebras (Fuente [53])

- Farajpour y Jamshidi evaluaron el efecto de diferentes ángulos de inclinación de la mesa de tracción sobre los ligamentos lumbares mediante simulación por elementos finitos [54]. Los autores analizaron desplazamientos vertebrales, deformaciones ligamentarias y variaciones de altura discal bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados demostraron que el ángulo de inclinación influye significativamente en la respuesta biomecánica de la columna, constituyendo un parámetro importante para el diseño estructural del prototipo.
- Tadano et al. desarrollaron un dispositivo de tracción lumbar instrumentado con galgas extensométricas para medir deformaciones mecánicas durante la terapia [45]. Mediante simulaciones computacionales y pruebas experimentales en pacientes, los autores confirmaron que la tracción lumbar genera separación vertebral medible y reproducible. Este trabajo resulta relevante por su metodología de validación biomecánica y funcional aplicada al desarrollo de sistemas de tracción lumbar.

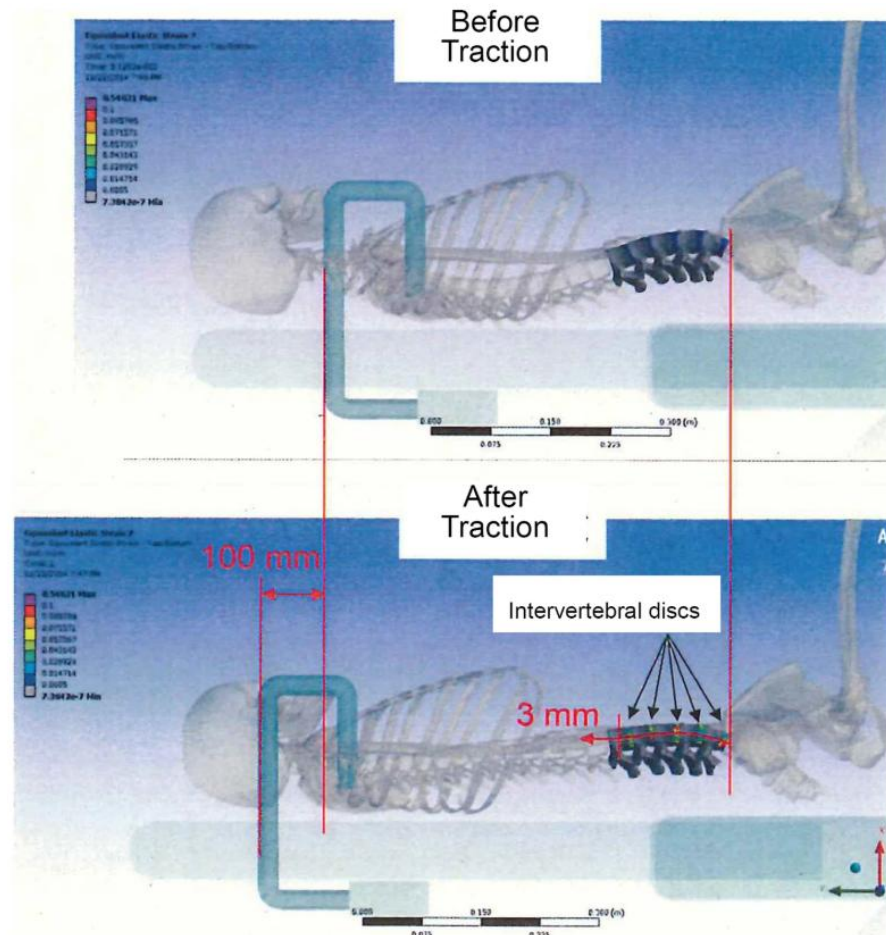


Figura 1.9. Modelado por elementos finitos. Mediante la simulación por elementos finitos, se obtiene un desplazamiento de 3 mm de la región lumbar bajo 100 mm de tracción corporal entre el brazo de sujeción y el cinturón pélvico. El valor máximo de deformación es 0,55 en el disco intervertebral L1/L2 (Fuente [45])

- Fernández Parra y Mora Tola diseñaron y construyeron un equipo de rehabilitación tipo tracción lumbar con modalidades continua e intermitente [49]. El prototipo incorporó una estructura metálica, sistema de poleas, arneses de sujeción y mecanismos manuales de ajuste de fuerza. El desarrollo incluyó diseño conceptual, selección de materiales, construcción y pruebas funcionales del dispositivo. Este antecedente presenta una alta relación con el presente proyecto debido a la similitud metodológica y al enfoque en el diseño y construcción de un sistema mecánico de tracción lumbar.

CAPÍTULO 2

2.1 Métodos

En el presente capítulo se describen la metodología implementada y los materiales utilizados para el desarrollo del proyecto titulado “Prototipo Biomédico para el Acompañamiento en la Rehabilitación Física de Pacientes con Afectaciones en el Nervio Ciático Asociado con Discopatía Lumbar”. La metodología se centró en el diseño, construcción y verificación funcional de un prototipo mecánico de tracción lumbar de accionamiento manual, cuyo funcionamiento se fundamenta en un sistema de transmisión de fuerza mediante mecanismos de accionamiento manual. El prototipo fue concebido como una herramienta de apoyo para complementar las intervenciones fisioterapéuticas dirigidas a personas con discopatía lumbar y afectación del nervio ciático.

El desarrollo del proyecto integró principios de biomecánica, diseño mecánico e ingeniería de materiales, mediante un proceso experimental de desarrollo progresivo que permitió transformar los requerimientos identificados en una solución técnica funcional. Para ello, se llevaron a cabo diferentes etapas que incluyeron la identificación de necesidades clínicas y técnicas, mediante la revisión de literatura científica y la consulta a un profesional en fisioterapia, la definición de requerimientos de diseño, la selección de materiales, el desarrollo progresivo del prototipo a través de ensayo, ajuste y mejora continua, el ensamblaje de sus componentes y la realización de pruebas de funcionamiento orientadas a verificar su funcionamiento, estabilidad estructural y operativo.

2.2 Tipo de Estudio y metodología

El presente proyecto corresponde a un estudio de tipo tecnológico aplicado, orientado al diseño, construcción, pruebas de desempeño y verificación de un prototipo mecánico para tracción lumbar, con el fin de complementar las intervenciones fisioterapéuticas en personas con discopatía lumbar y afectación del nervio ciático. Su propósito fue desarrollar una solución técnica accesible, reproducible y estructuralmente verificable que respondiera a las necesidades identificadas durante el proceso de investigación.

El estudio incorporó un componente descriptivo, dado que se realizó una revisión sistemática de la literatura científica sobre biomecánica lumbar, terapias de tracción y dispositivos de rehabilitación existentes, que permitió identificar parámetros mecánicos de referencia. Adicionalmente, integró un componente experimental-constructivo, ya que, a partir de los requerimientos identificados, y validados por el profesional experto en fisioterapia, Juan David Saavedra, se diseñó, fabricó y verificó funcionalmente un prototipo físico cuyo funcionamiento y desempeño mecánico fueron evaluados en condiciones controladas.

La metodología de trabajo se fundamentó en un proceso iterativo de ensayo y mejora continua. Durante la construcción del prototipo, cada modificación realizada fue analizada

antes de su implementación definitiva, siguiendo el principio práctico de *“medir tres veces para cortar una sola vez”*, principio según el cual cada dimensión, carga o ajuste fue verificado mediante tres mediciones independientes antes de realizar cualquier modificación, fabricación o prueba definitiva, con el fin de garantizar precisión, reducir errores y asegurar la fiabilidad de los resultados técnicos.

Es importante resaltar que este estudio no contempló la experimentación directa en seres humanos ni la aplicación clínica del dispositivo en pacientes reales en esta fase. Las pruebas realizadas se limitaron a entornos controlados, utilizando cargas equivalentes, y se enfocaron exclusivamente en la evaluación de parámetros técnicos, estructurales y de funcionamiento del equipo, evaluados por el equipo investigador y el fisioterapeuta asesor. Por lo tanto, no se requirió intervención terapéutica ni diagnóstica con usuarios finales.

2.3. Plan de Trabajo y Fases de Desarrollo del Proyecto

El desarrollo del proyecto se estructuró mediante un plan de trabajo organizado en diferentes fases, las cuales orientaron de manera progresiva las actividades de investigación, diseño y construcción del prototipo. Debido al carácter tecnológico y experimental de la investigación, se implementó un proceso iterativo basado en la evaluación continua, permitiendo realizar ajustes y mejoras conforme se obtenían nuevos resultados durante la fabricación y las pruebas de funcionamiento del equipo. Finalmente, el proceso fue sistematizado mediante herramientas metodológicas de diseño con el propósito de documentar y sustentar técnicamente las decisiones de ingeniería adoptadas, garantizando la trazabilidad de las decisiones de diseño adoptadas durante el desarrollo del prototipo.

2.3.1. Desarrollo experimental del Prototipo

El desarrollo experimental del prototipo se inició con la identificación de la problemática relacionada con la rehabilitación física de pacientes con afectaciones del nervio ciático asociada con discopatía lumbar. Como punto de partida, se realizó una revisión de literatura científica sobre biomecánica de la columna lumbar, terapias de tracción y dispositivos de rehabilitación existentes, con el propósito de establecer criterios técnicos que orientaran el desarrollo del equipo.

Posteriormente, se efectuó una consulta con el fisioterapeuta Juan David Saavedra, quien aportó información sobre las necesidades funcionales que debía satisfacer el dispositivo desde el punto de vista terapéutico. Estos aportes sirvieron como referencia para definir las características generales del prototipo y orientar las decisiones tomadas durante su construcción.

A diferencia de un proceso de diseño completamente secuencial, el desarrollo del prototipo se llevó a cabo mediante una metodología experimental basada en la construcción progresiva, la evaluación del comportamiento mecánico del sistema y la implementación de mejoras continuas. Durante esta etapa se realizaron diferentes modificaciones en la estructura, los mecanismos de tracción, la disposición de los componentes y la selección de materiales, con

el objetivo de mejorar la estabilidad, el funcionamiento y la facilidad de operación del dispositivo.

Como resultado de este proceso iterativo se obtuvo un prototipo funcional de accionamiento manual. Una vez consolidada su configuración final, el proceso de diseño fue sistematizado mediante herramientas metodológicas propias de la ingeniería, con el propósito de documentar, organizar y justificar técnicamente las decisiones adoptadas durante el desarrollo del dispositivo.

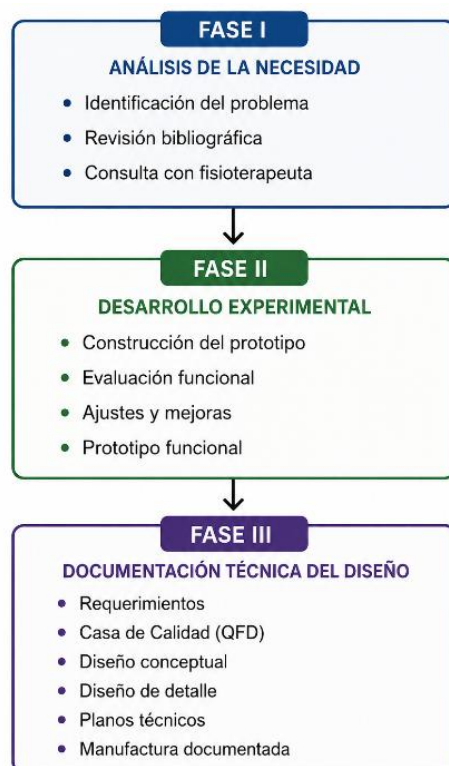


Figura 2.1. Fases del desarrollo experimental y sistematización metodológica del proyecto (Fuente [Propia]).

2.3.2. Cronograma del Proyecto

Con el fin de presentar la organización temporal de las actividades desarrolladas durante el proyecto, se elaboró un cronograma de trabajo que sintetiza las principales etapas de investigación, planificación, desarrollo experimental, manufactura y documentación técnica del prototipo. Aunque la construcción del dispositivo se caracterizó por un proceso iterativo de evaluación y mejora continua, la planificación establecida permitió mantener una secuencia organizada de actividades y cumplir con los objetivos planteados para el desarrollo del proyecto. La tabla 2.1 presenta el cronograma general de las actividades ejecutadas durante el desarrollo del proyecto.

Actividades	Cronograma															
	Período 2026-1															
Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Objetivo 1. Identificar los requerimientos fisioterapéuticos relacionados con la tracción lumbar en el tratamiento de personas con discopatía lumbar, mediante la revisión de literatura científica e información directa de expertos.																
Realizar una revisión en la literatura científica sobre tracción lumbar con discopatía lumbar.																
Diseñar la encuesta para los expertos en relación con los requerimientos del prototipo.																
Consultar con profesionales en fisioterapia para validar la pertinencia de los requerimientos																
Definir los parámetros fisioterapéuticos y biomecánicos esenciales para el prototipo.																
Objetivo 2: Diseñar los elementos del prototipo de tracción lumbar, a través de bocetos, dibujos técnicos, CAD y prueba de funcionalidad de las partes para la creación de prototipos digitales.																
Las posibles configuraciones del prototipo, considerando criterios ergonómicos, funcionales y mecánicos básicos.																
Realizar dibujos técnicos detallados de las piezas y mecanismos del equipo, incluyendo dimensiones, materiales propuestos y uniones mecánicas.																
Desarrollar modelos tridimensionales en software CAD (Diseño Asistido por Computador) para visualizar y ajustar virtualmente cada componente antes de su fabricación.																
Fabricar partes clave y llevar a cabo pruebas de funcionalidad para verificar su operatividad, compatibilidad entre componentes y viabilidad mecánica.																
Seleccionar materiales adecuados para la estructura y componentes mecánicos, considerando criterios como resistencia, peso, disponibilidad y costo.																
Fabricar y ensamblar las piezas estructurales y mecanismos de tracción conforme a los planos técnicos y requerimientos funcionales.																
del sistema, evaluando alineación, movilidad, estabilidad y ergonomía, y realizando los ajustes necesarios.																
Objetivo 3: Evaluar los elementos del prototipo mediante pruebas funcionales en condiciones controladas y cumplimiento de los parámetros técnicos para verificar la funcionalidad.																
Definir los protocolos de validación funcional y técnica, especificando los criterios de evaluación, condiciones de prueba y parámetros de referencia.																
Preparar el entorno de prueba y los instrumentos necesarios para la ejecución de los ensayos funcionales del prototipo.																
Realizar las pruebas técnicas del prototipo y verificar su funcionamiento de acuerdo con los protocolos establecidos, identificar fallas y ajustar parámetros técnicos.																
Evaluar los resultados obtenidos con el acompañamiento del fisioterapeuta.																
Documentar los resultados de la validación, incluyendo registros de pruebas, análisis de desempeño y conclusiones.																

Tabla 2.1. Cronograma general de actividades ejecutadas durante el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO 3

3.1. Resultados y discusión

3.2. Resultados

3.2.1. Diseño de conceptos

En concordancia con los requerimientos de diseño previamente establecidos y priorizados mediante la Casa de Calidad (QFD), se desarrolló la fase de diseño conceptual del prototipo, la cual tuvo como propósito estructurar y analizar diferentes alternativas de solución que permitieran dar respuesta a las necesidades identificadas del sistema, asegurando la coherencia entre los criterios técnicos, funcionales y ergonómicos definidos.

Aunque el prototipo fue inicialmente desarrollado mediante un proceso experimental basado en la construcción y mejora continua, en esta etapa se realizó una sistematización metodológica del proceso de diseño, con el fin de documentar, organizar y justificar técnicamente la configuración final adoptada.

Para ello, se empleó una matriz morfológica que permitió descomponer el sistema en sus funciones principales e identificar distintas alternativas de solución para cada una de ellas. A partir de la combinación de dichas alternativas, se plantearon tres conceptos de diseño, los cuales fueron evaluados considerando criterios de funcionalidad, estabilidad estructural, facilidad de fabricación, portabilidad y viabilidad de implementación.

Finalmente, mediante un proceso de evaluación comparativa, se seleccionó el concepto que mejor representó las características requeridas para el desarrollo del prototipo.

3.2.1.1. Sistematización Metodológica del Diseño

Como parte del proceso de diseño conceptual del prototipo, se desarrolló una sistematización metodológica orientada a estructurar de manera organizada las etapas de diseño del sistema.

Como resultado de este proceso se llevaron a cabo la definición y priorización de los requerimientos del sistema, la aplicación de la Casa de Calidad (QFD), la elaboración de la matriz morfológica para la generación y evaluación de alternativas de diseño, y el desarrollo del diseño de detalle del prototipo.

Estas herramientas permitieron organizar de manera lógica y secuencial el proceso de diseño, establecer la relación entre las necesidades identificadas y las soluciones implementadas, y garantizar la trazabilidad técnica de la configuración final del prototipo. De esta forma, se consolidó un flujo metodológico coherente que permitió pasar desde la identificación de necesidades hasta la definición estructural del sistema diseñado.

3.2.1.2. Definición y Priorización de necesidades del sistema a diseñar del prototipo

La definición de los requerimientos constituyó el punto de partida del proceso de sistematización metodológica del diseño del prototipo. Su propósito fue identificar las características funcionales, estructurales y operativas que debía cumplir el dispositivo para

dar respuesta a las necesidades detectadas durante la revisión de literatura y la consulta realizada al fisioterapeuta asesor.

Los criterios de diseño fueron establecidos a partir de dos fuentes principales de información: la revisión de literatura relacionada con equipos de tracción lumbar y la encuesta aplicada al fisioterapeuta Juan David Saavedra, la cual permitió identificar las necesidades clínicas, funcionales y de operación que debía satisfacer el prototipo. El formato de la encuesta diligenciada se presenta en el *Anexo A1.1*.

Con base en esta información, se definieron los requerimientos de diseño del sistema, los cuales posteriormente fueron priorizados mediante la metodología de Despliegue de la Función de Calidad (QFD).

Código	Requerimiento	Clasificación	Fuente
R1	Garantizar la seguridad del sistema durante la aplicación del prototipo de tracción lumbar.	Funcional	Fisioterapeuta
R2	Proporcionar estabilidad estructural durante el funcionamiento del equipo.	Estructural	Fisioterapeuta / Literatura
R3	Permitir la aplicación de tracción lumbar de forma intermitente.	Funcional	Fisioterapeuta
R4	Favorecer una correcta alineación corporal durante la aplicación de la tracción.	Ergonómico	Fisioterapeuta / Literatura
R5	Proporcionar condiciones ergonómicas adecuadas para la aplicación de la tracción lumbar.	Ergonómico	Fisioterapeuta
R6	Permitir un movimiento suave y controlado durante la tracción.	Funcional	Fisioterapeuta
R7	Evitar movimientos bruscos que puedan generar molestias o riesgos durante la aplicación de la tracción.	Seguridad	Fisioterapeuta
R8	Permitir sesiones de rehabilitación superiores a 20 minutos.	Operativo	Fisioterapeuta
R9	Facilitar el transporte del equipo mediante un diseño portátil.	Diseño	Fisioterapeuta
R10	Emplear materiales con resistencia mecánica adecuada para garantizar la estabilidad y durabilidad del prototipo.	Constructivo	Literatura / Desarrollo experimental

Tabla 3.1. Requerimientos de necesidades del sistema a diseñar del prototipo obtenidos a partir de la revisión bibliográfica y la consulta al fisioterapeuta.

Con el propósito de facilitar el análisis y la posterior priorización de las necesidades identificadas, los requerimientos fueron clasificados de acuerdo con su función dentro del proceso de diseño. Esta clasificación permitió diferenciar aquellos relacionados con el desempeño funcional del prototipo, la integridad estructural, las condiciones ergonómicas, los aspectos operativos y los criterios constructivos, estableciendo así una base organizada para la aplicación de la metodología QFD.

3.2.1.3. Priorización de Requerimientos de Diseño mediante la Casa de Calidad (QFD)

Con el fin de establecer una relación sistemática entre los requerimientos de diseño identificados y las características técnicas del prototipo, se aplicó la metodología de Despliegue de la Función de Calidad (Quality Function Deployment, QFD). Esta herramienta permitió transformar los requerimientos del usuario en características técnicas del prototipo, facilitando la identificación y priorización de los elementos con mayor incidencia sobre el desempeño del dispositivo.

Para la construcción de la Casa de Calidad se tomaron como entrada los requerimientos definidos en el apartado anterior, mientras que las características técnicas fueron establecidas a partir de los componentes, mecanismos y soluciones implementadas durante el desarrollo experimental del prototipo. La relación entre ambos permitió determinar el nivel de influencia de cada decisión sobre el cumplimiento de las necesidades identificadas.



Figura 3.1. Casa de Calidad (QFD) aplicada al diseño del prototipo (Fuente [Propia]).

La Casa de Calidad fue elaborada a partir de los diez requerimientos de diseño identificados mediante la revisión de literatura científica y la consulta realizada al fisioterapeuta asesor. Estos fueron priorizados según su nivel de importancia y relacionados con las principales características técnicas del sistema, permitiendo establecer la incidencia de cada una de ellas sobre el desempeño global del prototipo.

El análisis obtenido evidenció que los requerimientos asociados con la seguridad del usuario, la estabilidad estructural, el control de la fuerza de tracción y la prevención de movimientos bruscos constituyen los factores de mayor relevancia dentro del diseño del sistema. En

consecuencia, las características técnicas relacionadas con el mecanismo de regulación de la fuerza, el sistema de tracción mecánico manual, la estructura metálica y el sistema de sujeción presentaron la mayor influencia sobre el cumplimiento de dichos requerimientos.

De igual manera, se identificó que la resistencia estructural, la selección de materiales y las uniones mecánicas conforman un conjunto de elementos interdependientes que contribuyen directamente a la estabilidad y durabilidad del prototipo. Asimismo, se evidenció la existencia de un compromiso de diseño entre la robustez estructural y la portabilidad del equipo, el cual fue mitigado mediante la implementación de un diseño modular y desmontable que facilita el transporte sin comprometer la estabilidad durante el funcionamiento.

En términos generales, la aplicación de la metodología QFD permitió validar que las decisiones de diseño adoptadas durante el desarrollo experimental del prototipo responden de manera coherente a los requerimientos previamente establecidos. Los resultados obtenidos sirvieron como base fundamental para la estructuración del diseño conceptual, el cual se presenta en el siguiente apartado.

3.2.1.4. Parámetros técnicos de diseño

La identificación de los parámetros técnicos de diseño constituyó una etapa fundamental para la definición de las condiciones operativas y clínicas que debe cumplir un dispositivo mecánico de tracción lumbar para ser funcional y clínicamente pertinente.

Para ello, se desarrollaron dos actividades complementarias: una revisión de la literatura científica relacionada con biomecánica de la columna lumbar, parámetros de aplicación de tracción mecánica y criterios ergonómicos en dispositivos de rehabilitación; y una consulta directa con el fisioterapeuta Juan David Restrepo Saavedra, con el fin de validar y complementar los parámetros identificados.

A partir de la revisión bibliográfica se establecieron parámetros de referencia como la magnitud de la fuerza de tracción recomendada (25 %–60 % del peso corporal), la posición supina como condición adecuada para la aplicación de la tracción lumbosacra, y la necesidad de un sistema de rodamiento que reduzca la fricción entre el módulo pélvico y la estructura de soporte [44], [46].

De manera complementaria, el especialista aportó criterios adicionales relacionados con la ergonomía del sistema, la facilidad de operación para el terapeuta y la inclusión de un sistema de tracción cervical como funcionalidad adicional de valor clínico.

Con base en estos insumos, se consolidaron los parámetros técnicos del prototipo, los cuales se presentan en la Tabla 3.2.

Parámetro	Especificación
Fuerza de tracción	25 % – 60 % del peso corporal (170 – 420 N para 70 kg o más)
Posición del paciente	Supino (decúbito dorsal)
Duración de sesión	15 – 30 minutos
Capacidad estructural	Hasta 100 kg con factor de seguridad ≥ 1.5
Longitud de la camilla	Mínimo 1.65 m (diseño inicial) — construida: 1.81 m
Ancho útil	Mínimo 50 cm — construida: 55 cm
Recorrido del módulo pélvico	≥ 5 cm de separación longitudinal
Sistemas de sujeción	Arnés pélvico + sujetador torácico + arnés cervical (opcional)
Superficie de apoyo	Acolchada, cubierta en tela, sin bordes expuestos
Operación	Manual, sin energía eléctrica
Reducción de fricción	Sistema de rodamiento integrado en el módulo pélvico

Tabla 3.2. Requerimientos técnicos y clínicos del prototipo de tracción lumbar.

Nota: Todos los datos y mediciones fueron definiéndose en el proceso, debido a que es diseñado para que cualquier persona lo pueda utilizar en un futuro.

En conjunto, estos parámetros establecen las condiciones de diseño necesarias para garantizar el desempeño funcional, la seguridad del usuario y la viabilidad clínica del sistema. Asimismo, constituyen la base técnica sobre la cual se estructuraron las alternativas de diseño del prototipo, las cuales se presentan en el siguiente apartado.

3.2.1.5. Conceptos de diseño

Con el propósito de documentar las posibles alternativas de solución para el diseño del equipo de tracción lumbar, se desarrollaron tres conceptos de diseño que representan diferentes configuraciones mecánicas capaces de satisfacer los requerimientos establecidos

previamente. Cada concepto propone una solución distinta respecto a la disposición estructural, el sistema de tracción y la integración de sus componentes principales.

Estos conceptos no corresponden a prototipos construidos físicamente, sino a una representación metodológica realizada posteriormente al desarrollo experimental del dispositivo, con el fin de justificar la selección de la configuración final adoptada durante el proyecto.

- **Concepto 1 – Sistema de piezas móvil y fija con gato mecánico tipo tijera**

El primer concepto está compuesto por dos módulos tipo bandeja - una pieza móvil y una pieza fija - unidos mediante un gato mecánico tipo tijera que permite el desplazamiento controlado de la pieza móvil respecto a la fija, generando así la fuerza de tracción. El movimiento se limita mediante un sistema de restricción ubicado en la base del mecanismo, evitando desplazamientos bruscos o no controlados. La estructura se apoya sobre cuatro patas, con una longitud aproximada de 1700 mm y un ancho de soporte de 35 cm.

Este concepto fue seleccionado como solución final del prototipo, dado que el gato mecánico tipo tijera ofrece una relación óptima entre simplicidad mecánica, capacidad de carga, facilidad de fabricación con materiales disponibles localmente y control preciso de la fuerza de tracción, cumpliendo así con los requerimientos de seguridad y movimiento controlado priorizados en la Casa de Calidad.

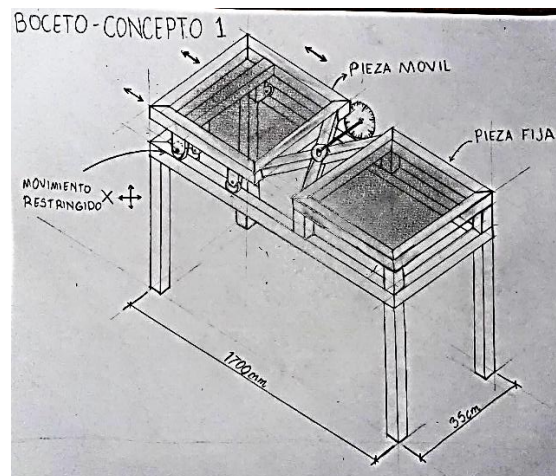


Figura 3.2. Concepto #1 del prototipo (Fuente [Propia]).

- **Concepto 2 – Sistema de carro móvil con gato tijera**

El segundo concepto consiste en una camilla con un carro móvil que se desplaza sobre rieles longitudinales mediante un gato mecánico tipo tijera, accionado por una manivela. Al girar la manivela, el mecanismo de tijera se expande y genera un

desplazamiento controlado del carro, produciendo la tracción longitudinal de forma progresiva y reversible.

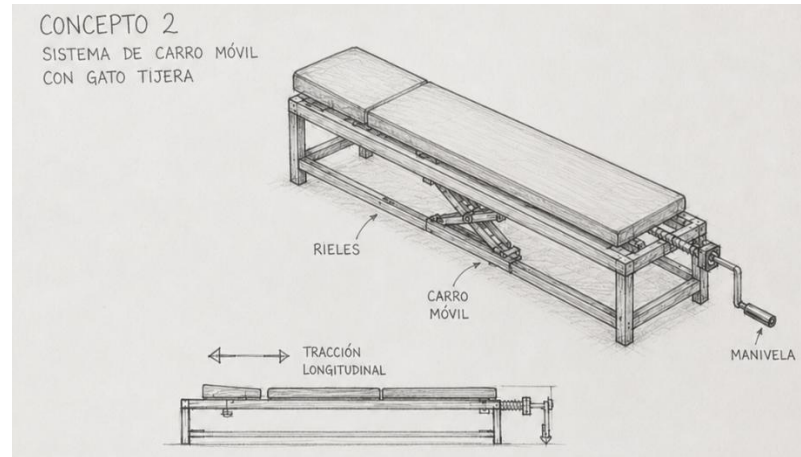


Figura 3.3. Concepto #2 del prototipo (Fuente [Propia]).

- **Concepto 3 – Sistema de husillo y tuerca**

El tercer concepto utiliza una camilla con una tuerca móvil desplazada mediante un husillo (tornillo sin fin) accionado por manivela. Al girar el husillo, la tuerca se traslada longitudinalmente, generando la tracción. Este sistema ofrece alta precisión de desplazamiento, pero requiere mayor exactitud en su fabricación.

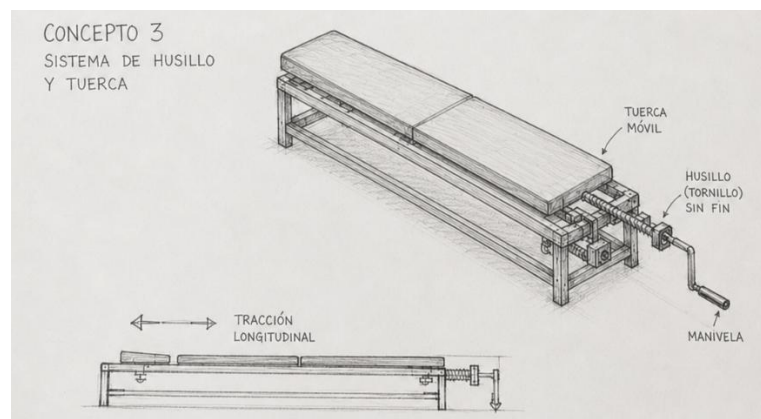


Figura 3.4. Concepto #3 del prototipo (Fuente [Propia]).

Con el fin de estructurar las alternativas planteadas durante la reconstrucción metodológica del diseño, se elaboró una matriz morfológica en la que se identificaron diferentes opciones para las funciones principales del prototipo. La combinación de estas alternativas permitió justificar los conceptos propuestos y evidenciar el proceso seguido para la selección de la configuración final.

3.2.1.6. Matriz Morfológica

Una vez definidos los conceptos de diseño, se elaboró una matriz morfológica con el propósito de organizar las diferentes alternativas identificadas para las funciones principales del prototipo. Esta herramienta permitió descomponer el sistema en sus funciones esenciales y analizar distintas opciones de solución para cada una de ellas, facilitando la comparación entre las alternativas propuestas y proporcionando un soporte metodológico para la selección del concepto final.

Matriz morfológica				
Prototipo biomédico de tracción longitudinal lumbar y cervical				
Subfunción	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
1 Accionamiento manual	Manivela 	Palanca 	Volante manual 	Pedal 
2 Mecanismo de tracción	Gato mecánico tipo tijera (horizontal) 	Husillo y tuerca 	Polea y cable 	Actuador lineal 
3 Guiado del módulo móvil	Rieles con ruedas 	Guías lineales 	Rodillos 	Corredera telescópica 
4 Superficie de apoyo	Camilla bipartida acolchada 	Tabla rígida única 	Respaldo articulado 	Módulos desmontables 
5 Fijación del paciente	Soporte cervical + sujeción torácica y pélvica 	Arnés integral 	Correas ajustables por segmentos 	Mentonera de tracción cervical 
6 Seguridad y control	Topes mecánicos y escala de desplazamiento 	Contador de vueltas 	Celda de carga / dinamómetro 	Liberación rápida 

Tabla 3.3. Matriz morfológica

La matriz morfológica permitió organizar de manera sistemática las posibles soluciones para cada una de las subfunciones principales del prototipo biomédico de tracción longitudinal lumbar y cervical. A partir de la identificación de las funciones esenciales del dispositivo, como el accionamiento manual, el mecanismo de tracción, el guiado del módulo móvil, la superficie de apoyo, la fijación del paciente y los elementos de seguridad y control, se plantearon diferentes alternativas técnicas que podían cumplir cada requerimiento funcional.

Esta herramienta fue fundamental dentro del proceso de diseño conceptual, ya que permitió visualizar distintas combinaciones posibles entre mecanismos, componentes y configuraciones estructurales. De esta manera, no se partió directamente de una única solución, sino que se evaluaron varias opciones viables, tales como manivela, volante manual, gato mecánico tipo tijera, husillo y tuerca, polea y cable, rieles con ruedas, guías lineales, rodillos, camilla bipartida, respaldo articulado, arneses y sistemas de control mecánico.

A partir de la matriz morfológica se generaron tres conceptos de diseño, cada uno conformado por una combinación diferente de alternativas seleccionadas para cumplir las

funciones del prototipo. Estos conceptos representan posibles configuraciones del dispositivo y permiten comparar distintas rutas de diseño antes de definir la propuesta final.

El **Concepto 1** se orienta hacia una solución mecánica robusta y controlada, combinando un sistema de accionamiento mediante volante manual, un mecanismo de tracción basado en gato mecánico tipo tijera horizontal junto con husillo y tuerca, guiado mediante rieles con ruedas y una camilla bipartida acolchada. Esta configuración busca garantizar un desplazamiento longitudinal estable, progresivo y seguro para generar la tracción sobre el cuerpo del paciente.

El **Concepto 2** plantea una alternativa más versátil, integrando manivela, gato mecánico tipo tijera, husillo y tuerca, además de polea y cable como sistema complementario de tracción. Esta propuesta incorpora guías lineales, respaldo articulado y arnés integral, lo que permite explorar una configuración con mayor adaptabilidad funcional, aunque posiblemente con mayor complejidad constructiva.

Por su parte, el **Concepto 3** propone una solución más simple y directa, basada en manivela, husillo y tuerca, guiado por rodillos, tabla rígida única y correas ajustables por segmentos. Esta configuración puede representar una alternativa de menor complejidad mecánica, pero con posibles limitaciones en ergonomía, comodidad y control del desplazamiento.

En consecuencia, la selección de conceptos surge como una etapa posterior a la matriz morfológica, donde las alternativas individuales dejan de analizarse de forma aislada y pasan a integrarse en configuraciones completas de diseño. Esto permite comparar los conceptos de manera más clara, considerando aspectos como estabilidad, facilidad de fabricación, seguridad, comodidad del paciente, precisión del movimiento y viabilidad funcional del sistema de tracción. Así, la matriz morfológica no solo sirvió para generar opciones, sino también como base metodológica para construir y justificar las propuestas conceptuales del prototipo.

3.2.1.7. Selección del concepto

Una vez construida la matriz morfológica y definidas las posibles combinaciones de solución, se procedió a evaluar los tres conceptos generados. Esta evaluación permite comparar las alternativas de diseño de manera ordenada, considerando criterios técnicos, funcionales, ergonómicos y de seguridad relacionados con el desempeño del prototipo biomédico de tracción longitudinal lumbar y cervical.

La calificación se realizó mediante una escala de **1 a 5**, donde **1 representa un desempeño bajo o poco favorable**, mientras que **5 representa un desempeño alto o altamente favorable** frente al criterio evaluado. De esta manera, cada concepto fue analizado según su capacidad para cumplir con los requerimientos principales del dispositivo, tales como generar tracción de forma controlada, garantizar estabilidad durante el desplazamiento, ofrecer comodidad al paciente, facilitar la operación manual y mantener condiciones adecuadas de seguridad.

Los criterios utilizados para la evaluación fueron seleccionados teniendo en cuenta los requerimientos técnicos del prototipo, entre ellos la operación manual, la reducción de fricción mediante un sistema de rodamiento, la necesidad de una superficie acolchada, el uso de sistemas de sujeción y la capacidad de generar un desplazamiento longitudinal controlado. Estos requerimientos aparecen definidos en la **Tabla 3.2** del trabajo de grado, donde se establecen condiciones como fuerza de tracción, posición supina del paciente, superficie de apoyo acolchada, operación manual y sistema de rodamiento integrado en el módulo pélvico.

Selección de conceptos

Resumen de alternativas elegidas a partir de la matriz morfológica

Subfunción	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
1 Accionamiento manual	 Volante manual	 Manivela	 Manivela
2 Mecanismo de tracción	 Gato mecánico tipo tijera (horizontal) + Husillo y tuerca	 Gato mecánico tipo tijera (horizontal) + Husillo y tuerca + Polea y cable	 Husillo y tuerca
3 Guiado del módulo móvil	 Rieles con ruedas	 Guías lineales	 Rodillos
4 Superficie de apoyo	 Camilla bipartida acolchada	 Respaldo articulado	 Tabla rígida única
5 Fijación del paciente	 Soporte cervical + sujeción torácica y pélvica	 Arnés integral	 Correas ajustables por segmentos
6 Seguridad y control	 Topes mecánicos y escala de desplazamiento	 Topes mecánicos y escala de desplazamiento	 Topes mecánicos y escala de desplazamiento

Tabla 3.4. Selección de conceptos

Los criterios de evaluación propuestos son los siguientes:

- 1. Efectividad de tracción:** evalúa la capacidad del concepto para generar una separación longitudinal controlada entre los módulos de la camilla, permitiendo aplicar la fuerza de tracción sobre el cuerpo del paciente.
- 2. Control del desplazamiento:** mide qué tan fácil es regular el movimiento producido por el mecanismo de tracción, evitando desplazamientos bruscos o difíciles de dosificar.
- 3. Estabilidad del sistema móvil:** analiza la capacidad del sistema de guiado para mantener el módulo móvil alineado durante la tracción, evitando desviaciones laterales, vibraciones o desajustes.
- 4. Seguridad del paciente:** considera la presencia de elementos que limiten el recorrido, mejoren la fijación del cuerpo y reduzcan riesgos durante el uso del dispositivo.
- 5. Ergonomía y comodidad:** evalúa la comodidad de la superficie de apoyo, la postura del paciente y la adecuación del diseño para una sesión de tracción en decúbito supino.

6. Facilidad de fabricación: valora qué tan viable es construir el concepto con materiales, herramientas y procesos disponibles, evitando mecanismos excesivamente complejos.

7. Costo de fabricación: analiza si la alternativa puede fabricarse con bajo costo relativo, utilizando componentes accesibles y evitando sistemas electrónicos o mecanismos costosos.

8. Facilidad de mantenimiento: evalúa la posibilidad de limpiar, ajustar, reparar o reemplazar componentes del sistema sin procedimientos complejos.

9. Versatilidad funcional: considera si el concepto permite integrar tracción lumbar y cervical, o si puede adaptarse a diferentes configuraciones terapéuticas.

10. Cumplimiento de requerimientos del proyecto: resume qué tan bien cada concepto responde al objetivo general del prototipo: generar tracción longitudinal de forma manual, segura, estable y funcional.

Criterio	Concepto #1	Concepto #2	Concepto #3
Efectividad de tracción	5	4	4
Control del desplazamiento	5	4	3
Estabilidad del sistema móvil	5	4	3
Seguridad del paciente	5	4	3
Ergonomía y comodidad	5	4	2
Facilidad de fabricación	4	3	5
Costo de fabricación	4	3	5
Facilidad de mantenimiento	4	3	4
Versatilidad funcional	5	5	3
Cumplimiento de requerimientos del proyecto	5	4	3
Total, puntos (Máx. 50)	47	38	35

Tabla 3.5 Tabla de evaluación de conceptos

De acuerdo con la evaluación realizada, el **Concepto # 1** obtuvo la mayor puntuación, con un total de **47 puntos sobre 50**. Este resultado se debe a que presenta una configuración equilibrada entre efectividad de tracción, estabilidad, seguridad y ergonomía. La combinación del sistema de tracción con gato mecánico tipo tijera horizontal y husillo-tuerca permite generar un desplazamiento longitudinal controlado, mientras que el guiado mediante rieles con ruedas favorece un movimiento estable y de baja fricción.

Aunque el **Concepto # 2** presenta una alta versatilidad al integrar polea y cable junto con otros mecanismos de tracción, su mayor complejidad constructiva puede aumentar el costo, el mantenimiento y la dificultad de fabricación. Por su parte, el **Concepto # 3** resulta más simple y económico, pero presenta limitaciones en ergonomía, estabilidad y fijación del paciente, debido a su configuración con tabla rígida única, rodillos y correas ajustables.

Por lo anterior, se selecciona el **Concepto # 1** como la alternativa más adecuada para el desarrollo del prototipo biomédico, ya que responde de mejor manera a los requerimientos

funcionales, técnicos y de seguridad definidos para el sistema de tracción longitudinal lumbar y cervical.

3.2.2. Diseño de Detalle

Una vez seleccionado el concepto final del prototipo biomédico de tracción longitudinal lumbar y cervical, se procedió al desarrollo del diseño de detalle mediante el software SolidWorks. Esta etapa permitió transformar la propuesta conceptual en un modelo técnico preciso, definiendo la geometría de cada componente, las dimensiones principales, la ubicación de los elementos mecánicos y la relación entre los diferentes subconjuntos del sistema.

El diseño detallado se estructuró a partir del ensamble general del prototipo y del desarrollo individual de sus principales componentes, entre los cuales se incluyen el chasis estructural, la base fija, la base móvil, el sistema de tracción, los accesorios de soporte, los elementos de tracción cervical y la superficie acolchada de apoyo. Este proceso permitió visualizar la integración del sistema y verificar la coherencia dimensional entre las piezas antes de su fabricación.

Los planos técnicos generados en SolidWorks contienen las vistas principales, vistas isométricas, cotas generales, detalles de fabricación, especificación de materiales propuestos y listado de componentes del ensamble. Estos documentos constituyen la base para la construcción del prototipo, al permitir identificar con precisión la forma, ubicación y función de cada pieza dentro del sistema.

En el cuerpo del documento se presentan las vistas principales del diseño detallado con el fin de describir la configuración general del prototipo y sus subconjuntos más relevantes. ***Los planos completos se incluyen en el Anexo A3 de la entrega***, con el propósito de conservar la información técnica detallada sin sobrecargar la sección principal del informe.

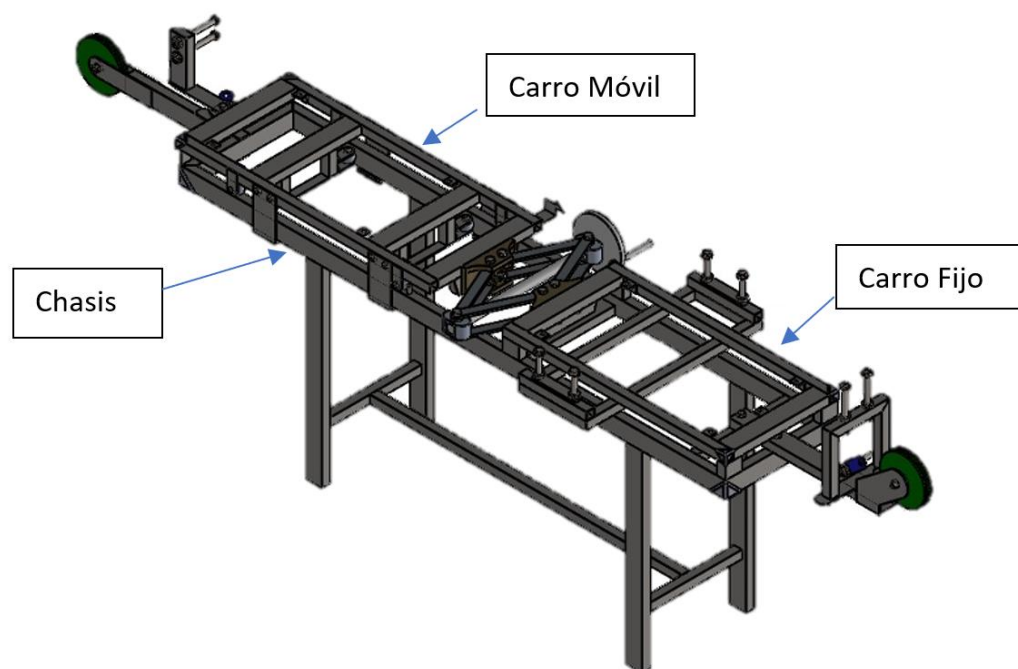


Figura 3.5. Vista isométrica del ensamble

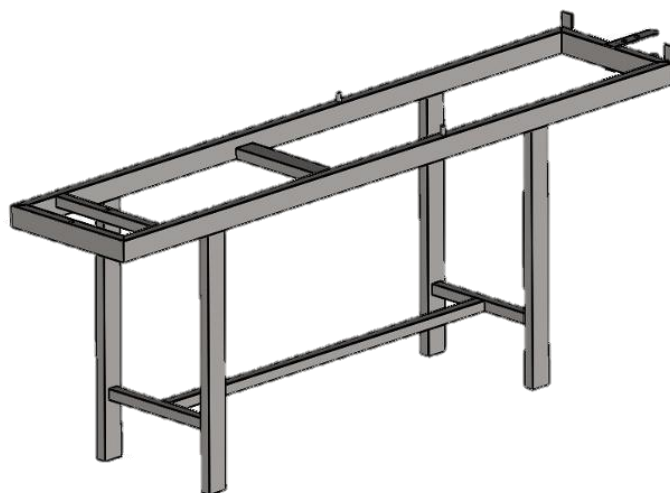


Figura 3.6. Vista isométrica del chasis

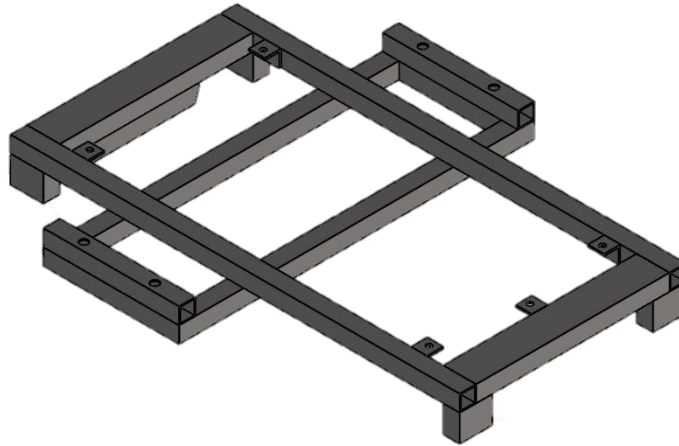


Figura 3.7 Vista isométrica de la pieza fija

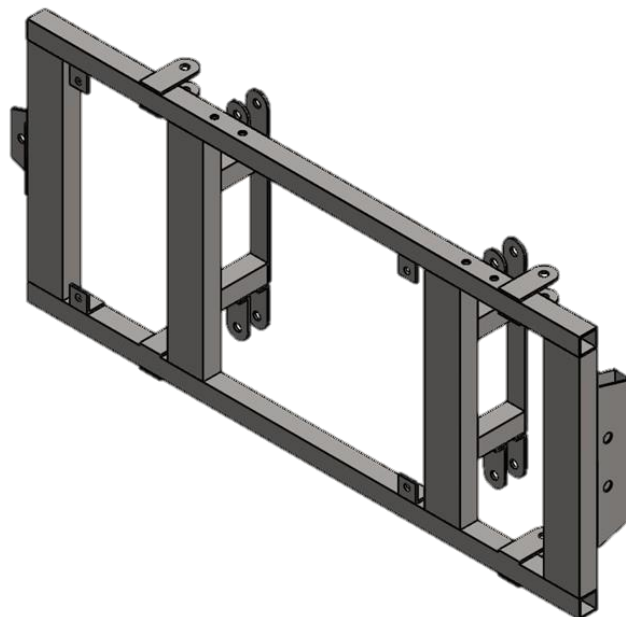


Figura 3.8. Vista isométrica de la pieza móvil

A partir del diseño de detalle desarrollado, se procedió a la etapa de fabricación del prototipo, en la cual se materializó la configuración diseñada mediante procesos convencionales de manufactura mecánica.

3.2.3. Manufactura

La manufactura del prototipo se realizó mediante procesos convencionales de fabricación mecánica, incluyendo corte, conformado, soldadura, preparación superficial, pintura y ensamblaje final de los componentes. Cada una de estas etapas se ejecutó de manera progresiva, realizando verificaciones dimensionales y ajustes necesarios para garantizar el correcto ensamblaje definitivo.

El proceso de fabricación se desarrolló en concordancia con el diseño de detalle previamente establecido, permitiendo la construcción del prototipo a partir de especificaciones técnicas definidas en los planos de ingeniería.

3.2.3.1. Materiales y Equipos

Para el desarrollo, construcción y evaluación del prototipo, se utilizaron diferentes elementos clasificados según su función, permitiendo cumplir con cada etapa del proceso y garantizando la precisión requerida bajo el principio de “medir tres veces para cortar una sola vez”. A continuación, se detallan:

3.2.3.1.1. Materiales estructurales

Para los materiales estructurales, se conforman la base y soporte físico del dispositivo, seleccionados por sus propiedades mecánicas, resistencia y estabilidad. Se emplearon:



Figura 3.9. Imagen representativa de la compra de los perfiles (Fuente [Propia])

- 2 perfiles cuadrados de acero 1" × 1" × 6 m calibre 14
- 1 platina de aluminio 1" × 4 mm × 6 m
- 1 platina de aluminio 1" × 2 mm × 6 m
- 1 platina 1" x 3/16
- 1 platina de acero 1" × 2 mm × 6 m
- ¼ lámina de aluminio 2 mm
- ¼ lámina de aluminio 1 mm
- ½ lámina de madera trípex ½"
- ½ metro de PVC sanitario 4"
- ½ metro de PVC ventilación 4"

3.2.3.1.2. Componentes mecánicos

Los componentes mecánicos permiten la transmisión de movimiento, fijación y estabilidad del sistema.

- Arandelas
- Tornillos Galvanizados con doble arandela
- Perros
- Guaya
- Wasa
- Tuercas de seguridad
- Remaches
- 10 metros de correa - reata (algodón)
- Accesorios para fijar la correa

3.2.3.1.3. Herramientas de fabricación y montaje

- Lima plana ancha
- lima triangular
- Lima redonda de 3/8
- Taladro
- Soldador (Soldadura Mig)
- Prensas

3.2.3.1.4. Instrumentos de medición y verificación

- Cinta métrica
- Regla
- Pie de rey
- Nivel
- Escuadra

3.2.3.2. Proceso de Fabricación

El proceso de fabricación del prototipo se desarrolló de manera experimental, progresiva e iterativa, integrando actividades de diseño conceptual, construcción mecánica y adaptación funcional. Aunque se partió de diseños preliminares y bocetos técnicos, durante la fabricación surgieron diferentes retos estructurales y mecánicos que requirieron modificaciones inmediatas en algunas piezas y mecanismos, permitiendo optimizar el funcionamiento general del dispositivo.

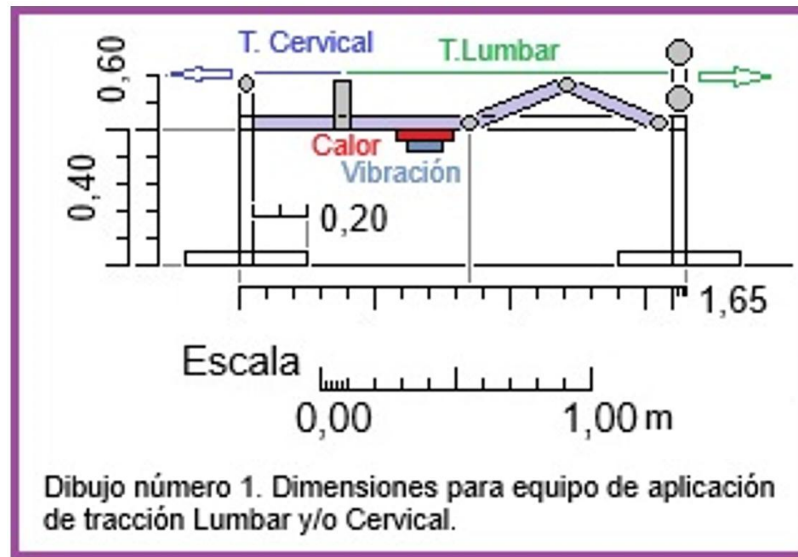


Figura 3.10. Boceto de las dimensiones para el prototipo.

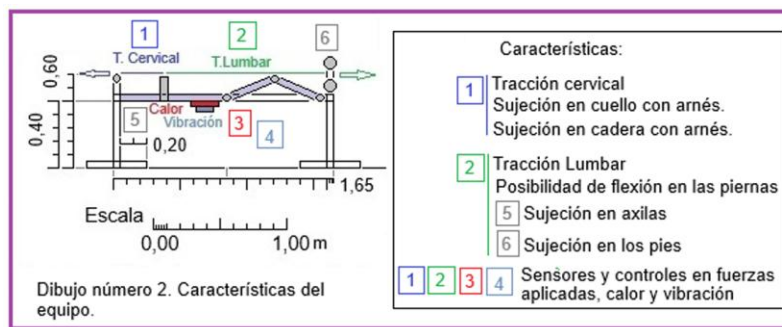


Figura 3.11a. Boceto con las características del prototipo.

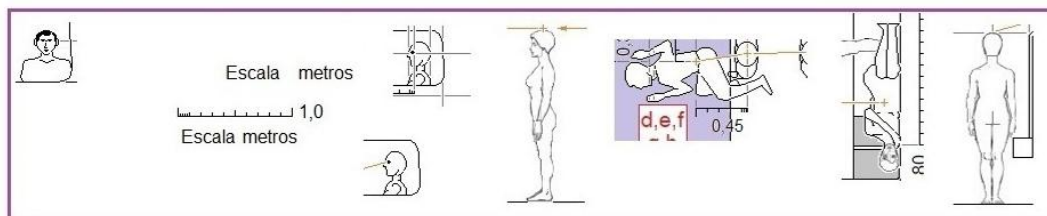


Figura 3.11b. Boceto del paciente en postura Decúbito Supino.

La construcción del prototipo se realizó manualmente en el multitaller del director del proyecto, Mauricio Vega Rengifo, utilizando herramientas de corte, soldadura, perforación y ensamblaje mecánico. Antes de fabricar cada componente, se elaboraron bocetos preliminares y dibujos técnicos básicos (Figura 3.10 – Figura 3.12) que permitieron definir dimensiones y posiciones; con respecto a las distintas uniones estructurales, se realizó en el proceso, debido a que cada pieza traía su propia dificultad, por esa razón no se realizaron más diseños en el programa SolidWorks. Posteriormente, algunas partes fueron ajustadas directamente durante el ensamblaje para mejorar la estabilidad, el desplazamiento del carro

móvil y la distribución de la fuerza de tracción, asimismo como los soportes cervicales, torácicos y pélvicos.

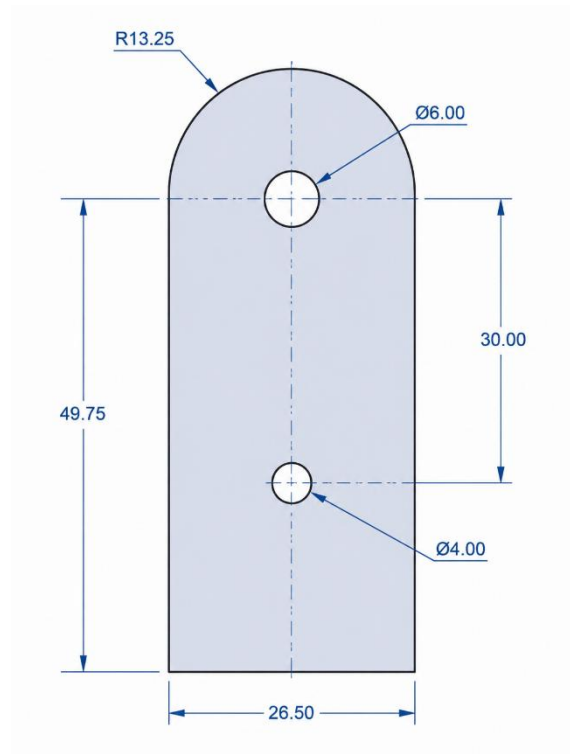


Figura 3.12. Boceto en SolidWorks de la pieza soporte de la rueda (parte del carro móvil).

El prototipo está compuesto por piezas fabricadas y ensambladas manualmente, hechas a mano pieza por pieza, entre las que se incluyen perfiles metálicos estructurales, ruedas de poliuretano, ejes, tornillos, tuercas, tuercas de seguridad, arandelas, sistemas de anclaje, poleas, soportes cervicales, piezas de fijación, elementos acolchados y componentes del sistema de tracción. La mayoría de estas piezas fueron adaptadas específicamente para cumplir los requerimientos mecánicos y ergonómicos del proyecto.

Durante la fabricación se realizaron múltiples pruebas preliminares de movimiento, alineación y resistencia estructural. Estas pruebas permitieron corregir problemas relacionados con el rozamiento de los rieles, la estabilidad lateral de la estructura y la distribución de cargas sobre el sistema móvil. Como resultado, se obtuvo un prototipo funcional capaz de generar desplazamiento longitudinal controlado y soportar el sistema de tracción lumbar planteado en el diseño inicial.

Después de haber comprado los materiales requeridos, se encuentra en el apartado de anexos, se empezó a realizar las mediciones, algo en tener en cuenta siempre se ***media tres veces para cortar una sola vez***, para cada una de las piezas, por ejemplo, obtener la estructura base del prototipo, ver figura 3.13.



Figura 3.13. Primer corte para la fabricar la estructura base. Lados laterales.

Después de cortar los laterales largos de la estructura base, se procede a medir para hacer el mismo proceso en los laterales que cierran la estructura como se ilustra en la figura 3.14 para realizar esos cortes con el fin de soldar las piezas.

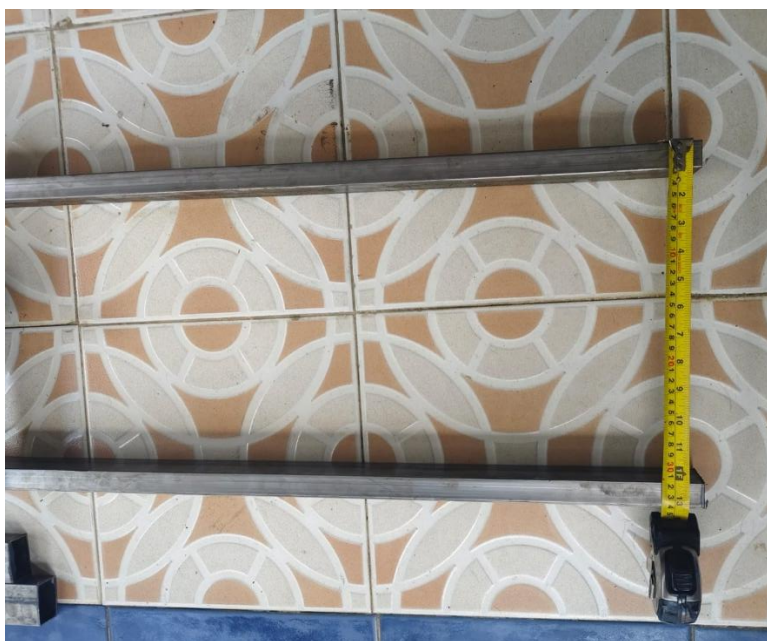


Figura 3.14. Medición de los laterales faltantes para realizar el corte al material aluminio y soldar la estructura.

Durante el proceso de corte nos percatamos cual sería la forma más profesional que la estructura se viera, por esa razón se realizó un corte como lo vemos en la figura 3.15, debido que los sobrantes se doblaran y realizar la unión con los lados laterales para formar el chasis de la manera más profesional posible.



Figura 3.15a. Medición y corte del lado extremo del chasis.



Figura 3.15b. Unión del montaje asegurado con presas.



Figura 3.16 Estructura base del prototipo terminado junto a las herramientas utilizadas.

Logrando construir la estructura base del prototipo, se pensó en como el arquetipo puede realizar la tracción, para esta opción se tuvo un mayor peso en la compra de un gato de tijera. Por lo tanto, se mide primeramente la distancia del gato con el esqueleto base para posteriormente acoplarlo cuando este la estructura del carro fijo y carro móvil.



Figura 3.17. Se mide la distancia del gato al chasis para posteriormente acoplarlo.



Figura 3.18. Estructura cortada y soldada. Prueba con el gato tijeras.

Después de realizar la prueba con el gato, se llevó a cabo la construcción del carro fijo. En esta construcción nos demoramos dos semanas del mes de febrero. En la foto no se alcanza a preciar, sin embargo, el carro fijo no va directamente a la estructura base, sino que se fabricaron unos soportes con el fin de que alcanzara la altura de la placa del gato.



Figura 3.19. Construcción del carro fijo.

El proceso que se efectuó en la construcción base del carro fijo, se duplica para la construcción del carro móvil, lo que nos cambia es la parte de fabricación del riel con el propósito de que mantenga en su línea. En la Figura 3.21 se señala la construcción del carro fijo, adicionalmente el soporte que le da mayor estabilidad lateral (lado a lado) a las tablas y por ende en un futuro al paciente.



Figura 3.20. Construcción del esqueleto del carro móvil.



Figura 3.21. Estructura base, carro fijo y carro móvil terminada, agregando mayor resistencia al peso del futuro paciente.

Después de construir el carro fijo y el carro móvil, se tuvo en cuenta el sistema de rieles y ruedas con el fin de garantizar el correcto desplazamiento del módulo móvil sobre la estructura. Inicialmente, se realizaron múltiples mediciones de las ruedas para determinar las dimensiones adecuadas de las placas de soporte, permitiendo así un ajuste preciso, estable y alineado sobre los rieles, como se observa en la Figura 3.22.



Figura 3.22. Medición de la rueda para la fabricación de los soportes.

Una vez verificadas las medidas y confirmada la compatibilidad entre las ruedas y el sistema de desplazamiento, se procedió al corte del material de acero inoxidable utilizado para la fabricación de las placas. Para este proceso, el material fue llevado a la prensa del multitaller, donde se realizaron los cortes y ajustes necesarios para la construcción de las piezas estructurales correspondientes, como se muestra en la Figura 3.23.

Posteriormente, en la Figura 3.24 se ilustran los diferentes cortes realizados sobre las placas metálicas con el objetivo de eliminar puntas y bordes pronunciados, obteniendo terminaciones ovaladas y seguras para el usuario. Durante todo el proceso de fabricación se priorizó la seguridad del prototipo biomédico, asegurando que cada borde y superficie metálica fuera cuidadosamente pulida y acondicionada para evitar posibles lesiones o accidentes durante su manipulación o uso clínico.



Figura 3.23. Prensa de multitaller.



Figura 3.24. Cortes realizados sobre las placas metálicas.

En la Figura 3.25 se observa el avance en la fabricación de los soportes de las ruedas, mientras que en la Figura 2.26 se muestra el proceso de perforación de las placas utilizando una marca de brocas llamado Incolma, dos referencias de brocas de $15/64''$ y $1/8''$, permitiendo generar los orificios necesarios para el correcto acople de las ruedas al sistema estructural.



Figura 3.25. Avance de los soportes de las ruedas.



Figura 3.26. Placa con el orificio correspondiente a la rueda usando marca Incolma broca 15/64" y Broca 1/8".

Posteriormente, en la Figura 3.27 se realizó una prueba preliminar de ensamblaje para verificar el funcionamiento y alineación de cada una de las placas con las ruedas correspondientes. Adicionalmente, se efectuaron nuevas mediciones para determinar el punto exacto donde las placas serían fijadas a la estructura móvil del carro. Con base en estas mediciones, se realizó una abertura adicional destinada al proceso de remachado, seleccionado por su practicidad y facilidad de ensamblaje, como se ilustra en la Figura 3.29.

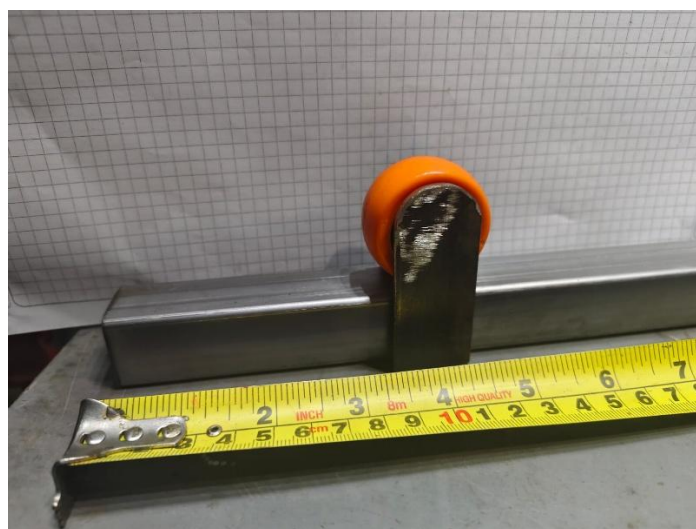


Figura 3.27. Prueba funcional y medición en el carro móvil.



Figura 3.28. Placas bordeadas con orificio perteneciente a la rueda.



Figura 3.29. Segundo orificio correspondiente al proceso de remachado.



Figura 3.30. Acabado de las placas de las ruedas.

Finalmente, en la Figura 3.31 se presenta el resultado final del carro móvil ensamblado, evidenciando la integración del sistema de desplazamiento y soporte desarrollado durante esta etapa de fabricación.

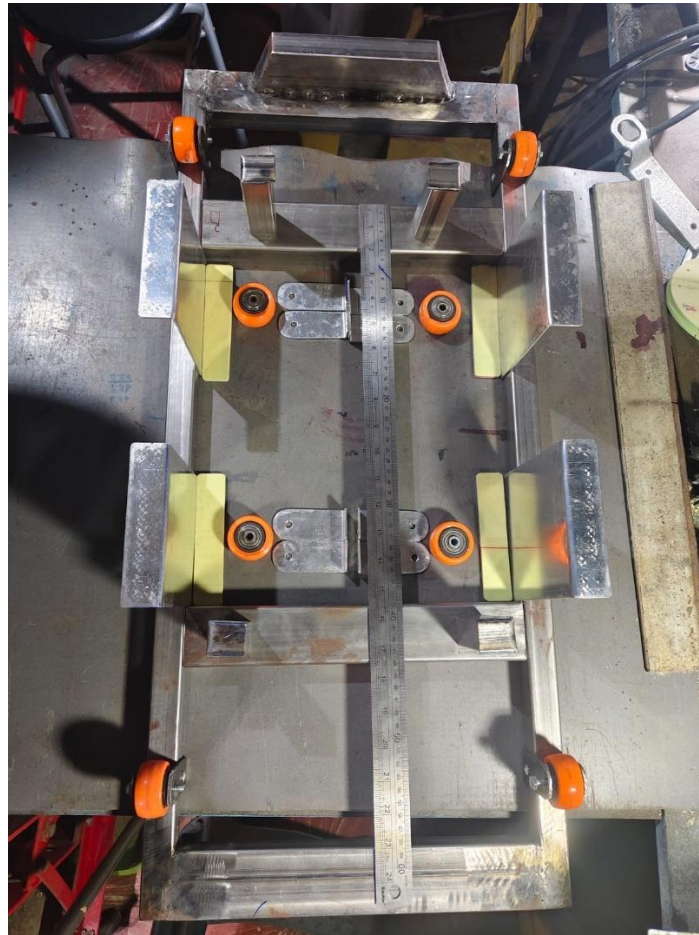


Figura 3.31. Proceso de fabricación de la estructura móvil.

Por otro lado, para la construcción de la manivela se requirió aproximadamente medio metro de tubo PVC sanitario de 4 pulgadas. Inicialmente, el tubo fue calentado con ayuda de un secador industrial y una plancha metálica con el fin de expandir y moldear el material, permitiendo obtener la forma requerida para el mecanismo, como se ilustra en la Figura 3.33. Posteriormente, el material fue cortado y ensamblado mediante adhesivo para PVC y, adicionalmente, se utilizaron remaches para proporcionar mayor resistencia mecánica y firmeza al sistema, como se observa en la Figura 3.34.



Figura 3.32. Tubo PVC sanitario de medio metro de 4”.

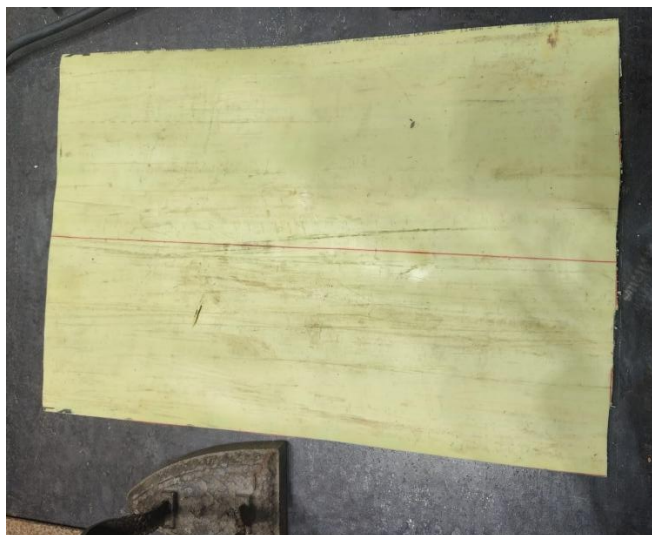


Figura 3.33. PVC liso junto a una plancha metálica.

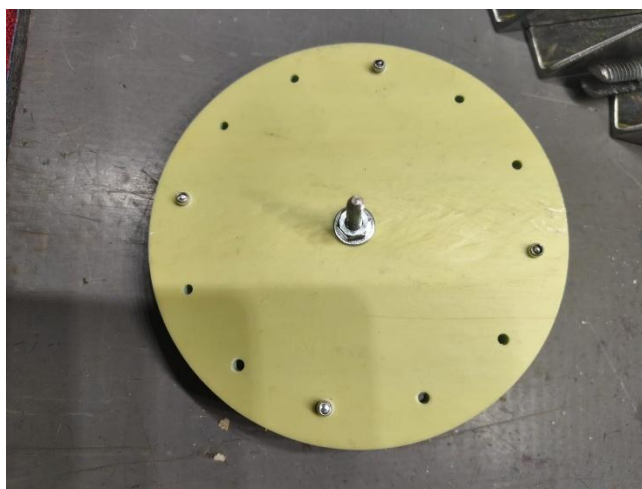


Figura 3.34. Acabo de la manivela hecho en PVC.

Continuando con el proceso de fabricación, se procedió al corte de las tablas que conforman la superficie de apoyo del prototipo, así como a la realización de cortes adicionales en el PVC sanitario para la fabricación de las poleas del sistema de tracción. De igual manera, se

efectuaron cortes de perfiles metálicos destinados al soporte estructural del gato mecánico tipo tijera y otros componentes complementarios del prototipo. Parte de estos procesos de manufactura y acabado se muestran en la Figura 3.35.



Figura 3.35. Proceso de fabricación y preparación de componentes mecánicos del prototipo.

A continuación, se ilustra la evolución del ensamblaje y construcción del equipo biomédico durante las diferentes etapas de fabricación. En la Figura 3.36 se presenta el ensamblaje final del gato mecánico tipo tijera junto con la manivela, ambos integrados al carro fijo y al carro móvil. Posteriormente, se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento, verificando que el mecanismo de tracción operara de manera correcta y estable.

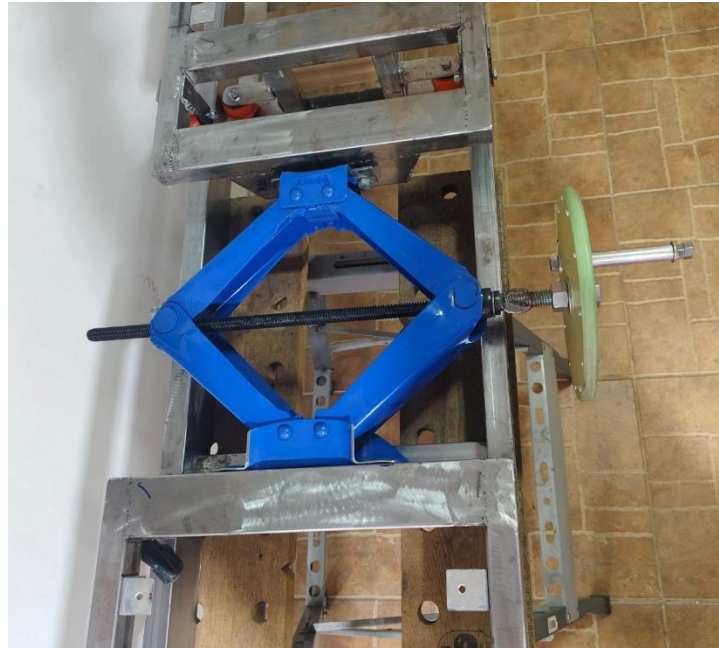


Figura 3.36. Ensamblaje junto a la manivela, carro fijo y carro móvil.

En la Figura 3.37 se observa el prototipo biomédico de tracción lumbar completamente ensamblado. Durante esta etapa se efectuaron pruebas de desplazamiento del carro móvil sobre los rieles, confirmando que el sistema mantenía una trayectoria estable sin presentar descarrilamientos ni desalineaciones durante el movimiento.



Figura 3.37. Prototipo biomédico de tracción lumbar completamente ensamblado.

Por otro lado, en la Figura 3.38 se ilustra la estructura base del mecanismo destinado a la tracción cervical, diseñada para complementar las funcionalidades terapéuticas del prototipo. Posteriormente, en la Figura 3.39 se evidencia una modificación realizada sobre el carro fijo, correspondiente a la incorporación del soporte de seguridad torácico, el cual fue diseñado para mejorar la estabilidad y fijación del usuario durante las sesiones de tracción.



Figura 3.38. Estructura base del mecanismo destinado a la tracción cervical.



Figura 3.39. Modificación realizada sobre el carro fijo.

Finalmente, en la Figura 3.40 se presenta el ensamblaje del mecanismo de tracción lumbar integrado al carro móvil, completando así la implementación de los principales sistemas mecánicos del prototipo biomédico.



Figura 3.40. Mecanismo de tracción lumbar integrado al carro móvil.

3.2.4. Verificación del equipo

Una vez finalizada la etapa de manufactura y ensamblaje del prototipo biomédico, se procedió a realizar la verificación de su funcionamiento mecánico y estructural mediante diferentes pruebas preliminares. Esta etapa tuvo como propósito comprobar que el dispositivo construido respondiera de manera adecuada a los requerimientos de diseño establecidos durante las fases de desarrollo, evaluando aspectos relacionados con la configuración general del equipo, el funcionamiento de sus mecanismos de tracción, la estabilidad estructural, la movilidad del sistema y la integración de sus diferentes componentes. Los resultados obtenidos permitieron verificar la viabilidad funcional del prototipo y constituyen la base para el análisis presentado en la sección de discusión.

3.2.4.1. Descripción General del Prototipo Construido

El prototipo desarrollado corresponde a una camilla mecánica de tracción lumbar de accionamiento manual, diseñada para complementar procesos de rehabilitación física en pacientes con discopatía lumbar y afectaciones asociadas al nervio ciático. La estructura fue fabricada principalmente en acero inoxidable, con un diseño modular que permite el desplazamiento longitudinal controlado entre dos secciones principales de la camilla.

El sistema está conformado por una estructura portante metálica, un módulo cefálico fijo y un módulo pélvico deslizante montado sobre rieles con ruedas de poliuretano de baja fricción. En la zona central se integró un gato mecánico tipo tijera, encargado de generar la fuerza de separación entre ambos módulos, produciendo así el efecto de tracción lumbar.

Adicionalmente, el prototipo incorpora un sistema alternativo de tracción mediante polea y cable, ubicado en el extremo distal de la estructura, permitiendo futuras configuraciones de tracción por peso o tensión mecánica controlada.

La superficie de apoyo fue diseñada para ser acolchada y ergonómica, permitiendo que el usuario permanezca en posición supina durante las sesiones de tracción. Asimismo, el sistema incluye puntos de anclaje para arneses pélvicos, torácicos y cervicales, necesarios para transmitir la fuerza de tracción de forma segura hacia la región lumbar.



Figura 3.41. Prototipo Biomédico pintado y finalizado.

La Figura 3.1 presenta la vista general del prototipo biomédico completamente ensamblado y finalizado, en la cual se aprecian los principales componentes mecánicos que conforman el dispositivo.

3.2.4.2. Funcionamiento del prototipo

Con el fin de comprender la operación del prototipo biomédico desarrollado, a continuación se describe el principio de funcionamiento de los principales mecanismos que intervienen durante la aplicación de una fuerza de tracción longitudinal sobre la columna lumbar mediante un sistema mecánico manual. Durante el uso, el paciente se ubica en posición

supina sobre la superficie acolchada de la camilla, mientras los sistemas de sujeción estabilizan la región torácica y pélvica.

El módulo cefálico permanece fijo, mientras que el módulo pélvico se desplaza longitudinalmente sobre los rieles al accionar el gato mecánico tipo tijera. Este mecanismo genera una separación progresiva entre ambos módulos, transmitiendo una fuerza de distracción hacia la zona lumbar del paciente.

El desplazamiento se realiza mediante ruedas de poliuretano instaladas sobre rieles metálicos, lo que reduce significativamente la fricción y permite un movimiento suave, estable y controlado. De manera complementaria, el sistema de polea y cable permite implementar configuraciones alternativas de tracción mediante tensión mecánica externa.

El diseño manual del prototipo elimina la necesidad de sistemas eléctricos o electrónicos, facilitando su fabricación, mantenimiento y posible implementación en contextos clínicos con recursos limitados.

A continuación, se ilustrará el acabado del prototipo y funcionamiento paso a paso.

La idea original era con el gato traccionar la zona lumbar; para traccionar con el gato se tuvo en cuenta la fijación del tronco con los anclajes ver figura 3.44 y 3.45.

Además, de la fijación en el tronco se puede reforzar con el soporte cervical figura 3.42. con el fin de que el cuerpo quede fijo.

Cuando se tracciona con el gato, se manipula el gato, se encuentra la tracción porque la parte superior del cuerpo permanece fija, mientras que el módulo móvil desplaza la región pélvica, generando la fuerza de tracción necesaria para favorecer la descompresión de la columna lumbar Figura 3.47. Sin embargo, se le dio otra opción al prototipo, la cual se puede realizar tracciones con pesas sin el gato para eso se suelta el gato y se realiza la tracción con pesas figura 3.8. Al igual que la tracción cervical, puedo con pesas realizar la traccionar el cuello.



Figura 3.42. Soporte cervical con polea.

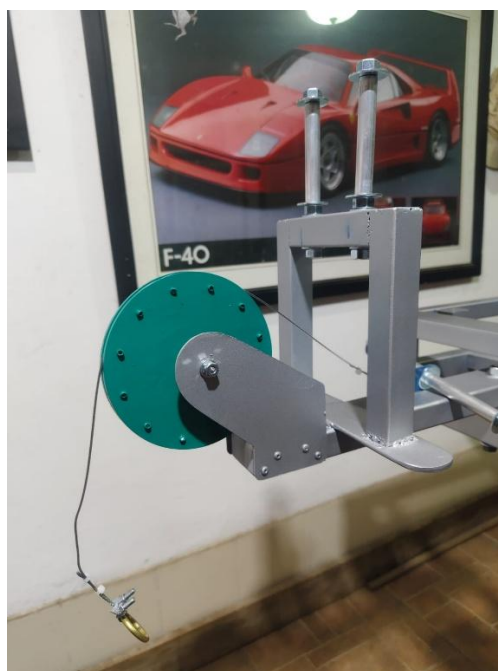


Figura 3.43. Soporte cervical con polea lado lateral.

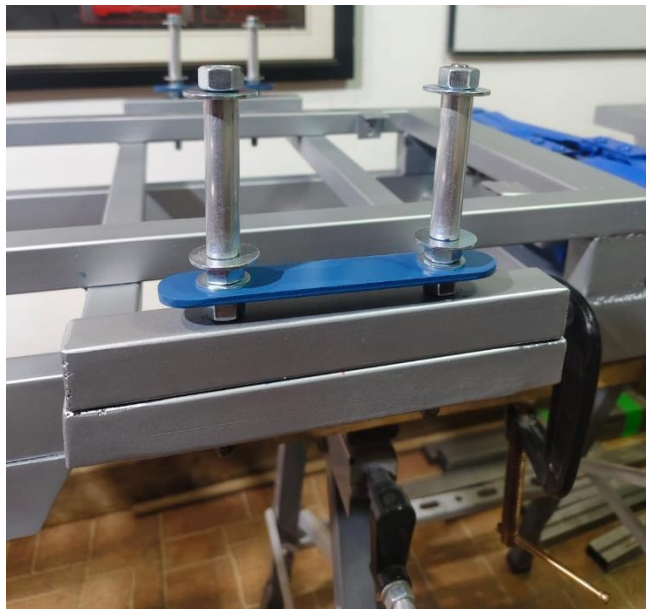


Figura 3.44. Anclaje torácico.



Figura 3.45. Gato tipo tijera con el display de medición.

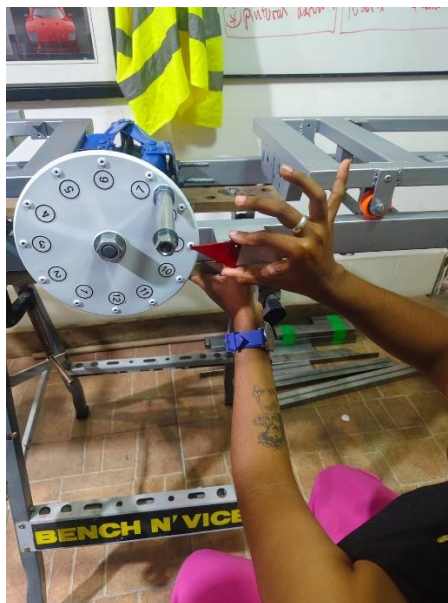


Figura 3.46. Display de Medición

Esta idea de display de medición salió gracias a una reunión que tuvimos con Germán Valencia Rodríguez, profesional de la salud, quien nos recomendó hacerlo para que el fisioterapeuta tomara registro de cuanto traccionó.



Figura 3.47. Estructura del Carro móvil

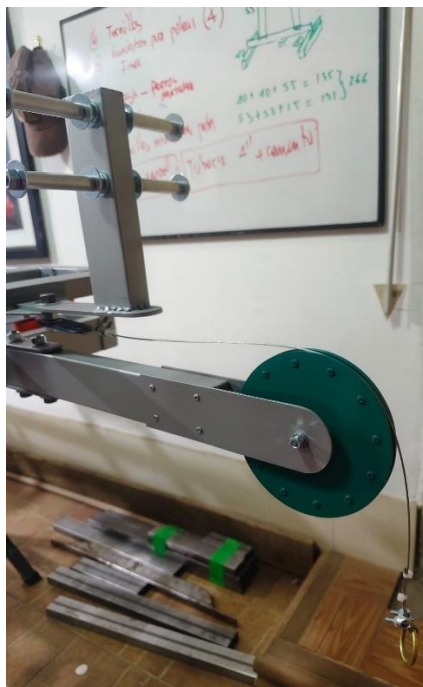


Figura 3.48. Soporte con pesas para tracción lumbar



Figura 3.49. Soporte con polea para tracción lumbar.

Finalmente, el prototipo cuenta con piezas hechas a mano.



Figura 3.50. Prototipo biomédico terminado

Adicionalmente, se realizaron pruebas preliminares en el hospital simulado utilizando el simulador clínico Atlas. La primera prueba consistió en verificar la compatibilidad dimensional entre el simulador y el prototipo biomédico, evaluando principalmente el ajuste del cuerpo sobre la superficie de apoyo de la camilla.

Los resultados obtenidos, ver figura 3.51, evidenciaron que el simulador se adaptó correctamente al prototipo, validando las dimensiones establecidas durante la etapa de diseño. Esto fue posible gracias a que, desde el inicio del proyecto, se consideraron medidas antropométricas aproximadas correspondientes a diferentes tipos de usuarios, tanto en longitud como en ancho de la estructura, permitiendo garantizar una superficie adecuada para la posición supina y el correcto funcionamiento del sistema de tracción.



Figura 3.51. Prueba del prototipo con el simulador Atlas.

Por otro lado, el prototipo inicialmente fue concebido únicamente para la realización de tracción lumbar; sin embargo, durante el desarrollo del proyecto se decidió incorporar una funcionalidad adicional correspondiente a la tracción cervical, con el objetivo de ampliar las posibilidades terapéuticas del dispositivo. Posteriormente, se realizaron pruebas funcionales del mecanismo de tracción cervical, observando que el sistema de polea responde adecuadamente a las cargas aplicadas y permanece estable dependiendo del peso agregado por el fisioterapeuta durante la terapia ver figura 3.52.



Figura 3.52. Prueba de la tracción cervical con el simulador atlas.

Adicionalmente, se evaluó el sistema de ensamblaje tipo rompecabezas del soporte torácico, diseñado como mecanismo de seguridad y soporte para el paciente. Las pruebas permitieron verificar que el usuario puede descender de la camilla tanto por el lado derecho como por el lado izquierdo de manera segura y cómoda, gracias al diseño adaptable del soporte torácico, como se ilustra en la figura correspondiente.

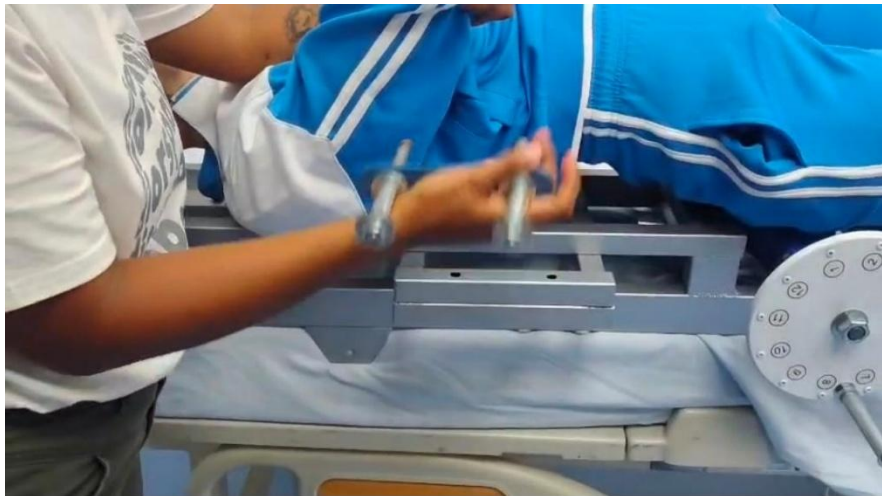


Figura 3.53. Prueba de ensamblaje modular tipo rompecabezas del soporte torácico.

Otra de las pruebas funcionales realizadas estuvo enfocada en el mecanismo principal de tracción lumbar. Mediante el accionamiento manual del gato tipo tijera y la manivela, figura 3.54, se aplicó el desplazamiento longitudinal del carro móvil, obteniendo resultados satisfactorios en cuanto a estabilidad, alineación y funcionamiento mecánico del sistema. Estas pruebas permitieron validar el diseño estructural del carro móvil y el correcto ensamblaje del mecanismo de tracción figura 3.55.



Figura 3.54. Prueba funcional con la manivela.



Figura 3.55. Prueba funcional con el gato.

Como elemento adicional del prototipo, se incorporó un sistema de medición relacionado con la cantidad de vueltas aplicadas durante la tracción, permitiendo al fisioterapeuta tener una referencia aproximada del nivel de desplazamiento generado durante el procedimiento. Finalmente, también se verificó el funcionamiento de los topes iniciales y finales, así como el comportamiento del riel del carro móvil, obteniendo resultados favorables que evidencian un diseño mecánico estable, seguro y funcional. Ver figura 3.56.



Figura 3.56 Prueba funcional de la estructura móvil del prototipo biomédico.

Finalmente, se comprobó la portabilidad del prototipo biomédico, verificando que su estructura puede desmontarse y ensamblarse nuevamente de manera sencilla y segura. El diseño modular del equipo permite separar los diferentes componentes estructurales y mecánicos para facilitar su transporte, almacenamiento y mantenimiento. Durante las pruebas de ensamblaje y desensamblaje, se evidenció que las piezas encajan correctamente entre sí, similar a un sistema modular tipo rompecabezas o bloques ensamblables, sin afectar la estabilidad ni el funcionamiento general del dispositivo. Este resultado representa una ventaja importante del prototipo, ya que amplía sus posibilidades de uso en distintos entornos clínicos, académicos o domiciliarios, facilitando además su movilización y adaptación en espacios reducidos.

3.3. Discusión

3.3.1. Análisis del desempeño mecánico del prototipo

El prototipo desarrollado demostró la viabilidad técnica de construir un sistema mecánico de tracción lumbar utilizando materiales accesibles y mecanismos de accionamiento manual. La estructura metálica presentó un comportamiento estable durante el ensamblaje y las pruebas preliminares de desplazamiento, evidenciando una adecuada distribución de cargas y resistencia estructural.

El sistema de rieles con ruedas de poliuretano permitió un desplazamiento suave del módulo pélvico, reduciendo significativamente la fricción entre las superficies móviles. Esta característica resulta importante debido a que una menor fricción favorece la transmisión efectiva de la fuerza de tracción hacia la región lumbar, mejorando el funcionamiento mecánico del dispositivo.

Asimismo, el mecanismo de tracción mediante gato tipo tijera permitió generar una separación progresiva y controlada entre los módulos de la camilla, proporcionando estabilidad durante el accionamiento manual. La incorporación adicional de un sistema de polea y cable amplía las posibilidades funcionales del prototipo, permitiendo futuras configuraciones de tracción mediante pesas o tensión regulada.

3.3.2. Importancia del diseño desarrollado

Uno de los principales aportes del proyecto fue el desarrollo de un prototipo funcional sin dependencia de sistemas eléctricos o electrónicos complejos. Esto representa una ventaja en términos de costo, mantenimiento y accesibilidad, especialmente en contextos clínicos o académicos con recursos limitados.

El uso de materiales disponibles localmente y procesos de manufactura convencionales demuestra que es posible desarrollar tecnologías biomédicas funcionales dentro del contexto colombiano, reduciendo la dependencia de equipos importados de alto costo.

Además, la integración de componentes como arneses pélvicos, soporte torácico y posibilidad de tracción cervical proporciona mayor versatilidad terapéutica en comparación con algunos diseños reportados en antecedentes consultados. Importante resaltar la

ergonomía del prototipo, gracias a que no sólo es un prototipo robusto, sino que es portátil, lo cual hace mucho más atractivo, porque se puede armar y desarmar.

3.3.3. Limitaciones encontradas

A pesar de los resultados obtenidos, la capacidad máxima del gato mecánico limita el rango de fuerza alcanzable, restringiendo su aplicación a niveles moderados de tracción lumbar. Otra limitación importante es que las pruebas funcionales completas aún no han sido ejecutadas, por lo que el comportamiento mecánico definitivo deberá confirmarse mediante protocolos de validación posteriores.

Además, el alcance del proyecto no incluyó pruebas clínicas en pacientes reales, por lo que no es posible establecer conclusiones sobre efectividad terapéutica, limitándose únicamente al análisis técnico y estructural del dispositivo.

3.3.4. Proyección e impacto del proyecto

El desarrollo del presente prototipo constituye una base importante para futuras investigaciones y mejoras tecnológicas en el área de rehabilitación física. La posibilidad de incorporar sensores, sistemas automatizados y control electrónico permitiría evolucionar el dispositivo hacia versiones más avanzadas y cercanas a equipos clínicos comerciales.

Asimismo, este trabajo aporta al fortalecimiento de la ingeniería biomédica aplicada en Colombia, promoviendo el diseño de soluciones accesibles orientadas a necesidades reales del contexto nacional.

CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones

El objetivo general del proyecto se cumplió satisfactoriamente mediante el desarrollo de un prototipo mecánico funcional para tracción lumbar orientado al complemento de intervenciones fisioterapéuticas en personas con discopatía lumbar y afectaciones asociadas al nervio ciático. El trabajo permitió realizar el diseño, construcción y verificación preliminar del modelo, integrando diferentes subsistemas mecánicos que permiten generar tracción longitudinal sobre la región lumbar de manera manual y controlada. Además, el prototipo evidenció la viabilidad técnica de fabricar un dispositivo biomédico funcional utilizando materiales accesibles, procesos convencionales de manufactura y mecanismos mecánicos de accionamiento manual.

Respecto al primer objetivo específico, este se cumplió mediante la revisión de literatura científica y la consulta directa con profesionales del área de fisioterapia, lo que permitió identificar los principales requerimientos fisioterapéuticos y biomecánicos asociados a la tracción lumbar en personas con discopatía lumbar. A partir de esta información fue posible establecer parámetros técnicos fundamentales para el diseño del dispositivo, tales como rangos de fuerza de tracción, posición adecuada del paciente, sistemas de sujeción, condiciones ergonómicas y requerimientos estructurales necesarios para el funcionamiento seguro del prototipo.

En relación con el segundo objetivo específico, correspondiente al diseño de los elementos del prototipo mediante bocetos, dibujos técnicos, modelado CAD y pruebas de funcionalidad de las partes, este se cumplió satisfactoriamente durante el desarrollo del proyecto. Se diseñaron e integraron componentes como la estructura metálica, el sistema de rieles, el módulo móvil, el sistema de polea y el mecanismo de tracción mediante gato tipo tijera, permitiendo obtener un prototipo físico completamente ensamblado y operacional. Asimismo, el proceso de construcción permitió validar preliminarmente la funcionalidad mecánica de los componentes diseñados y demostrar la posibilidad de desarrollar este tipo de tecnología biomédica con recursos de manufactura local.

Finalmente, el tercer objetivo específico, relacionado con la evaluación funcional del prototipo en condiciones controladas y el cumplimiento de parámetros técnicos, se cumplió parcialmente. Durante las pruebas preliminares de ensamblaje y funcionamiento fue posible observar un comportamiento mecánico adecuado de los principales subsistemas, evidenciando estabilidad estructural, desplazamiento controlado del módulo móvil y correcto funcionamiento del mecanismo de tracción. Sin embargo, las pruebas funcionales formales definidas en los protocolos de verificación aún se encuentran pendientes de ejecución al momento de la presentación del trabajo, por lo que la validación completa del desempeño técnico deberá desarrollarse en futuras etapas de investigación y mejoramiento del dispositivo.

4.2 Trabajos futuros

Como trabajo futuro, se propone realizar la ejecución completa de los protocolos de verificación funcional definidos para el prototipo, utilizando instrumentación calibrada como dinamómetros o celdas de carga que permitan cuantificar de manera objetiva la fuerza de tracción generada, el comportamiento estructural del sistema y el desplazamiento del módulo móvil. Asimismo, se recomienda desarrollar una evaluación ergonómica formal con el acompañamiento de profesionales en fisioterapia, con el fin de validar aspectos relacionados con comodidad, seguridad y facilidad de uso del dispositivo en condiciones controladas.

Por otra parte, se recomienda avanzar hacia la instrumentación electrónica del prototipo mediante la integración de sensores de fuerza, posición y tiempo conectados a plataformas de adquisición de datos basadas en microcontroladores como Arduino. Esto permitiría visualizar y registrar parámetros terapéuticos en tiempo real, facilitando el monitoreo de las sesiones de tracción y mejorando el control clínico del procedimiento. Del mismo modo, el desarrollo de una interfaz digital básica podría permitir configurar parámetros de funcionamiento y almacenar información relacionada con las sesiones realizadas. Adicionalmente, se plantea la posibilidad de integrar sistemas de regulación angular de la camilla para adaptar la dirección de la fuerza de tracción según la región lumbar afectada.

Finalmente, como etapa futura de validación clínica, se propone gestionar la aprobación ética correspondiente para realizar pruebas piloto con sujetos humanos bajo supervisión fisioterapéutica especializada. Estas pruebas permitirían evaluar la seguridad, tolerabilidad y posible efectividad terapéutica del dispositivo en pacientes con discopatía lumbar. Asimismo, se plantea la posibilidad de desarrollar versiones más compactas, portátiles y de menor costo, favoreciendo la accesibilidad a tecnologías de rehabilitación física en contextos clínicos y académicos con recursos limitados dentro del contexto colombiano.

ANEXOS

A1. Encuesta fisioterapeuta

Al fisioterapeuta, Juan David Restrepo Saavedra, se le realizaron dos encuestas una inicial para el diseño y los requerimientos del prototipo biomédico y otro al culminar el prototipo con la finalidad de la aprobación de un experto en salud.

A1.1. Encuesta Inicial – Requerimientos

Encuesta para Fisioterapeuta

Proyecto: Prototipo Biomédico para el Acompañamiento en la Rehabilitación Física de Pacientes con Afectaciones en el Nervio Ciático Asociado con Discopatía Lumbar

Perfil del profesional

1. Área principal de trabajo:
 - ☒ Rehabilitación musculoesquelética
 - ☐ Neuromuscular
 - ☒ Deportiva
 - ☐ Hospitalaria
 - ☐ Docente / académico

Requisitos funcionales del equipo

3. ¿Considera útil un equipo de tracción lumbar en procesos de rehabilitación?
 - ☒ Muy útil
 - ☐ Útil
 - ☐ Poco útil
 - ☐ No útil
4. ¿Qué tipo de esfuerzo considera más efectiva?
 - ☐ Tracción continua
 - ☒ Tracción intermitente
 - ☐ Embajadores
5. ¿Qué rango de fuerza considera seguro para tracción lumbar? -- newton
 - ☐ Menos de 10 kg
 - ☐ 10–25 kilos
 - ☐ 26–40 kilos
 - ☐ Más de 40 kg
6. ¿Cuál debería ser la duración promedio de una sesión de tracción?
 - ☐ 5–10 minutos
 - ☐ 11–20 minutos
 - ☒ Más de 20 minutos
7. ¿Qué tipo de control debería tener el equipo?
 - ☐ Manual
 - ☐ Digital (pantalla)
 - ☒ Ambos

Requisitos de diseño

10. ¿Qué características físicas debería tener el equipo?
 - ☒ Portátil
 - ☐ Fijo
 - ☐ Ajustable en altura/largo
 - ☐ Uso domiciliario
 - ☐ Uso clínico

Opinión abierta

12. Desde su experiencia, ¿qué aspecto considera más importante en un equipo de tracción lumbar?
Desde la perspectiva fisioterapéutica, los aspectos más importantes en un equipo de tracción lumbar son la seguridad del paciente, la estabilidad estructural del dispositivo y el control adecuado de la fuerza de tracción aplicada. Asimismo, es fundamental que el equipo proporcione comodidad durante

la terapia, permita una correcta alineación corporal y facilite un movimiento suave y controlado, evitando movimientos bruscos o desalineaciones que puedan generar molestias o riesgos para el paciente.

13. ¿Qué mejoras sugeriría para un dispositivo de tracción lumbar?

Entre las principales mejoras sugeridas se encuentran la incorporación de un sistema integrado de medición de fuerza para monitorear con mayor precisión la tracción aplicada, la implementación de mecanismos de tracción intermitente automatizada y la posibilidad de ajustar el ángulo de inclinación de la camilla según la necesidad terapéutica. Adicionalmente, se recomienda optimizar la ergonomía de los sistemas de sujeción, reducir el peso total del equipo para facilitar su transporte y considerar la integración de sistemas electrónicos que permitan registrar y controlar los parámetros de cada sesión de rehabilitación.

Uso académico

14. ¿Considera útil este equipo para fines de enseñanza y prácticas académicas?

- ☒ Sí
- ☐ No
- ☐ Tal vez

Juan David Retrepo
7707514772

A1.2. Encuesta Final – Prueba y Evaluación del prototipo

Encuesta de Prueba y Evaluación del Prototipo

Proyecto: Prototipo Biomédico para el Acompañamiento en la Rehabilitación Física de Pacientes con Afectaciones en el Nervio Ciático Asociado con Discopatía Lumbar

Dirigido a: Juan David Saavedra

Fecha: 11 mayo 2025

1. Datos generales del profesional

Área principal de trabajo:

☒ Rehabilitación musculoesquelética

☐ Neuromuscular

☒ Deportiva

☐ Hospitalaria

☐ Docente / académico

☐ Otro: _____

Años de experiencia profesional:

☐ Menos de 2 años

☒ 2 – 5 años

☐ 6 – 10 años

☐ Más de 10 años

2. Evaluación del funcionamiento y rendimiento

¿Qué opinión general le merece el funcionamiento del prototipo?

☒ Excelente

☐ Bueno

☐ Regular

☐ Deficiente

¿La aplicación de la tracción se realiza de forma suave y controlada?

☐ Sí, totalmente

☒ Sí, en su mayoría

☐ No, presenta tirones o cambios bruscos

☐ No, es difícil de controlar

¿El rango de fuerza que permite el prototipo es adecuado para pacientes con discopatía lumbar y afectación del nervio ciático?

☐ Sí, cubre todas las necesidades clínicas

☒ Sí, cubre las necesidades más frecuentes

☐ No, es insuficiente

☐ No, excede los límites seguros

¿La duración de la sesión que permite configurar se ajusta a los protocolos habituales de rehabilitación?

☒ Totalmente

☐ Parcialmente

☐ Poco ajustado

☐ Nada ajustado

3. Evaluación de seguridad

¿Considera que los mecanismos de seguridad implementados son suficientes y funcionales?

☒ Sí, garantizan la seguridad del paciente en todo momento

☐ Sí, pero faltaría agregar alguno más

☐ No, algunos no funcionan bien

☐ No, son insuficientes

¿El sistema de parada de emergencia es accesible y responde rápido?

☒ Sí, muy accesible y rápido

☐ Sí, pero mejorable

☐ No, es difícil de alcanzar

☐ No, no responde con rapidez

¿La indicación y control de la fuerza aplicada es clara y precisa?

- ☒ Muy clara y precisa
- ☐ Clara, pero con pequeñas desviaciones
- ☐ Poco clara o imprecisa
- ☐ Nada clara

4. Evaluación del diseño, materiales y ergonomía

¿Los materiales usados en el prototipo son adecuados, resistentes y cómodos para el paciente?

- ☒ Sí, cumplen con todas las condiciones
- ☐ Sí, pero algunos podrían mejorar
- ☐ No, se sienten débiles o incómodos
- ☐ No, no son apropiados para uso clínico

¿El equipo es fácil de ajustar en altura, posición y tamaño según la complexión del paciente caléño?

- ☒ Muy fácil
- ☐ Fácil
- ☐ Difícil
- ☐ Muy difícil

¿Es fácil de transportar o ubicar dentro del consultorio / sala de rehabilitación?

- ☒ Sí, muy práctico
- ☐ Sí, pero pesado o voluminoso
- ☐ No, es difícil de mover
- ☐ No, requiere instalación fija compleja

¿La interfaz de control (manual) es intuitiva y sencilla de usar?

- ☒ Muy intuitiva
- ☐ Intuitiva

☐ Confusa

☐ Muy difícil de entender

¿El tamaño y peso del prototipo son adecuados?

☒ Sí, ideal

☐ Sí, pero podría ser más compacto

☐ No, demasiado grande o pesado

☐ No, demasiado pequeño para estabilidad

5. Utilidad clínica y académica

¿Considera que este prototipo aporta valor al tratamiento de pacientes con afectación del nervio ciático y discopatía lumbar?

☒ Mucho valor

☐ Valor moderado

☐ Poco valor

☐ Ningún valor

¿Lo recomendaría para uso en clínicas, centros de rehabilitación o atención domiciliaria?

☒ Sí, sin dudas

☐ Sí, con mejoras

☐ No, prefiero equipos convencionales

☐ No, no cumple requisitos clínicos

¿Es útil para fines de enseñanza, demostración y prácticas académicas?

☒ Muy útil

☐ Útil

☐ Poco útil

☐ Nada útil

Juan David Retrepo
1107514172

A2. Listado de materiales adquiridos para prototipado

PROTOTIPO BIOMÉDICO PARA EL ACOMPAÑAMIENTO EN LA REHABILITACIÓN FÍSICA DE PACIENTES CON AFECTACIONES EN EL NERVIÓ CIÁTICO ASOCIADO CON DISCOPATÍA LUMBAR

De: Mauricio Vega Rengifo

Para: Danna Chelsy Torres Martínez / estudiante Ingeniería Biomédica / Cali, diciembre 11 de 2025

LISTADO MATERIALES CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE ESFUERZOS DE TRACCIÓN

2 perfiles cuadrados acero 1" * 1" * 6 m largo

1 platina aluminio 1" * 4 mm espesor * 6 m largo

1 platina aluminio 1" * 2 mm espesor * 6 m largo

1 platina acero 1" * 2 mm espesor * 6 m largo

¼ lámina aluminio 2 mm espesor

¼ lámina aluminio 1 mm espesor

½ lámina ~~triplex~~ ½" espesor

1/8 inmunizante líquido (Homecenter)

1/8 tinte para madera color negro (Homecenter).

4 latas laca aerosol base gris; 4 latas laca aerosol color gris plata; 4 latas laca aerosol en colores variados; azul, rojo, verde, amarillo (ferreteria de Barrio)

600 remaches pop en diferentes tamaños (Homecenter)

4 varillas roscadas galvanizadas 3/8" * 1 m largo (Homecenter)

2 varillas roscadas galvanizadas 3/16" * 1 m largo (Homecenter)

100 tuercas 3/8" galvanizadas con arandela (Homecenter)

100 tuercas 3/16" galvanizadas con arandela (Homecenter)

Caucho, empaques, tornillería, varios (Almacén ~~Resist~~)

Pendiente: materiales para elaboración tapicería, arneses, otros imprevistos por definir.

MATERIALES FUNGIBLES:

4 pliegos lija agua 100

1 lata lubricante ~~wd~~ 40

1/8 pegante Boxer; 2 unidades pegante ~~Epóxico~~ (rápido, 10 minutos)

3 botellas Tinner corriente

2 hojas para segueta; 3 discos corte, pulidora 4 ½ " ~~2~~ 2 discos para pulido metal, pulidora 4 ½ "

1 lima triangular metal Nicholson; 1 lima rectangular metal 1"

6 brocas 1/8" metal; 3 brocas ¼" metal; 2 Brocas 3/8" metal; 1 broca ½" metal / Otros imprevistos por definir.

Atentamente: Mauricio Vega Rengifo

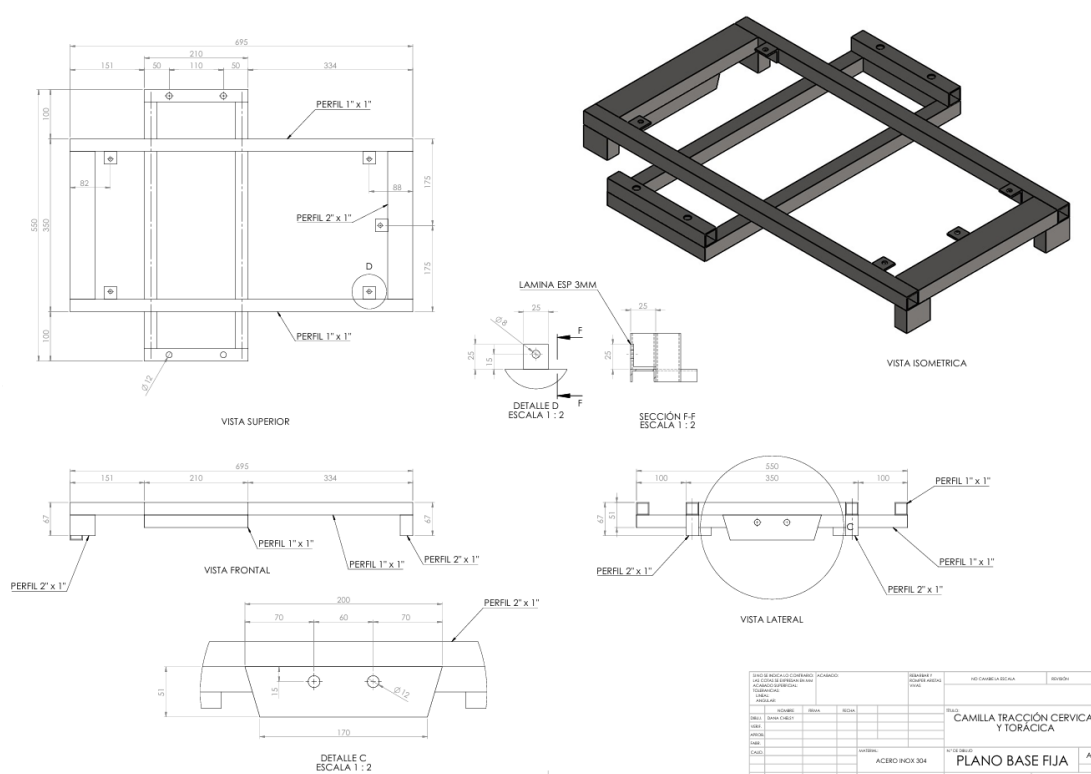


Figura 4.4. Plano de la estructura del carro fijo en el ejemplar.

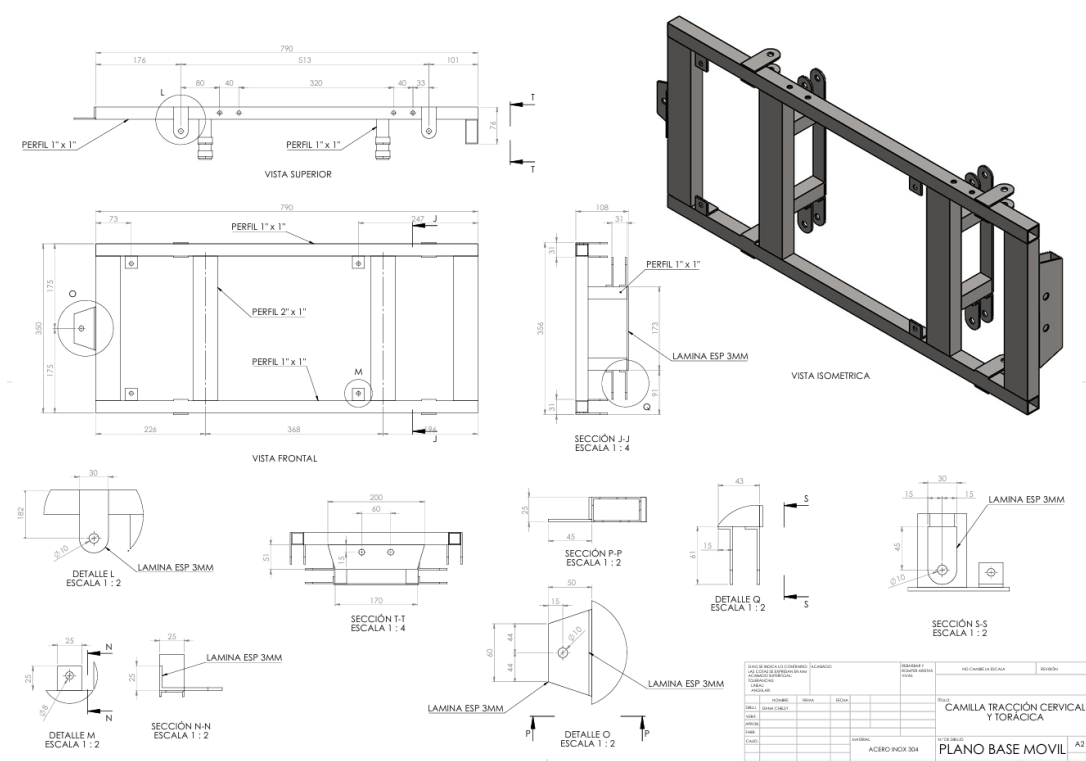


Figura 4.5. Plano de la estructura del carro móvil en el prototipo.

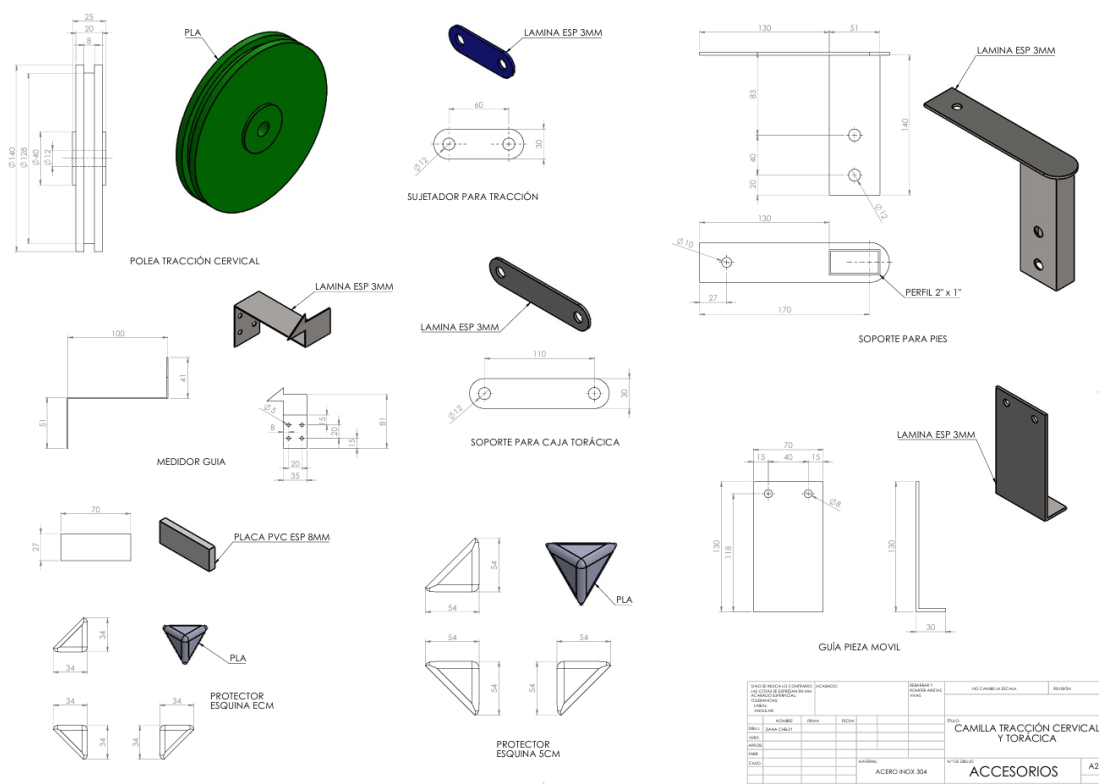


Figura 4.6. Diversos planos del prototipo.

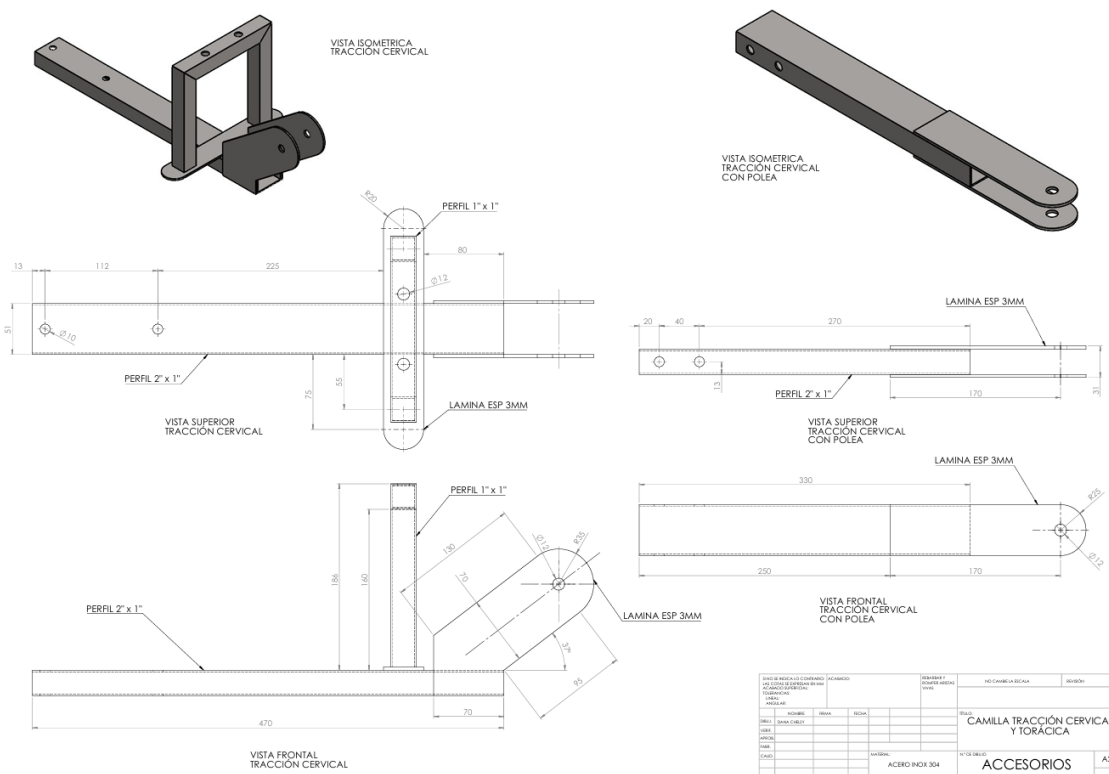


Figura 4.7. Plano del accesorio para la tracción cervical.

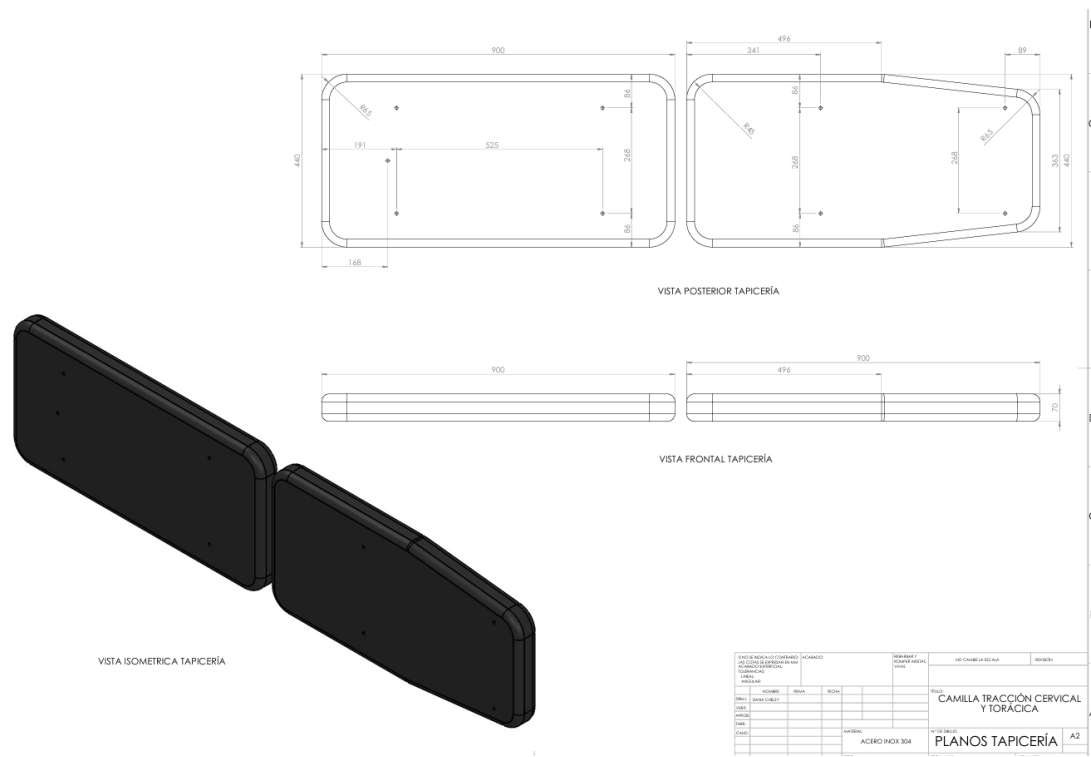


Figura 4.8. Plano de la tapicería del prototipo.

A4. Listado de maquinaria

Cortadora Bosch



Pulidora Bauker



Prensa Fija



Soldadura MIG



Taladro

Sierra de Calar



Pistola de Calor Bosch



Lijadora de Banda Makita



Esmeriladora de Banco



A5. Presupuesto detallado del prototipo

Listado de Materiales y Análisis de Costos

Prototipo Biomédico de Tracción Lumbar — Dana Chelsy Torres Martínez

08 Junio 2026

1. Listado de Materiales y Costo de Fabricación

La siguiente tabla presenta el listado de materiales empleados en la construcción del prototipo, clasificados según su función dentro del sistema. Los precios corresponden a valores de referencia del mercado colombiano para insumos de ferretería, metalmecánica, entre otros, consultados en proveedores y distribuidores locales y plataformas comerciales.

Función	Producto	Descripción	Cant.	Precio Unit.	Total
Sistema estructural	Perfil cuadrado de acero	Perfil cuadrado 1" × 1" cal. 14, para chasis y carros (2 unidades × 6 m)	12 m	\$42.000	\$504.000
Sistema estructural	Platina de aluminio (4 mm)	Platina de aluminio 1" × 4 mm × 6 m, refuerzo estructural	6 m	\$38.000	\$38.000
Sistema estructural	Platina de aluminio (2 mm)	Platina de aluminio 1" × 2 mm × 6 m, soportes secundarios	6 m	\$28.000	\$28.000
Sistema estructural	Platina de acero	Platina de acero 1" × 3/16" y 1" × 2 mm × 6 m, refuerzo de carros	6 m	\$45.000	\$45.000
Sistema estructural	Lámina de aluminio	Láminas de aluminio 2 mm y 1 mm (¼ de lámina c/u), placas de soporte de ruedas	2 u (¼)	\$35.000	\$70.000
Superficie de apoyo	Lámina de madera triplex	Triplex ½" (½ lámina), superficie de apoyo de la camilla	½ lámina	\$55.000	\$55.000
Sistema de tracción	Gato mecánico tipo tijera	Gato de tijera con manivela, mecanismo principal	1	\$95.000	\$95.000

Función	Producto	Descripción	Cant.	Precio Unit.	Total
Sistema de manivela	Tubo PVC sanitario 4"	PVC sanitario y de ventilación 4" (½ m c/u), moldeado para manivela y poleas	1 m	\$22.000	\$22.000
Sistema de desplazamiento	Ruedas de poliuretano	Ruedas de baja fricción para el sistema de rodamiento del carro móvil	4	\$18.000	\$72.000
Componentes mecánicos	Tornillería galvanizada	Tornillos con doble arandela, tuercas de seguridad, arandelas planas	1 lote	\$48.000	\$48.000
Componentes mecánicos	Remaches y perros	Remaches pop, perros de sujeción para uniones desmontables	1 lote	\$25.000	\$25.000
Componentes mecánicos	Guaya y was	Cable de acero (guaya) y was para el sistema de polea y cable	1 lote	\$30.000	\$30.000
Sistema de sujeción	Correa - reata (algodón)	Correa de algodón para arneses pélvico, torácico y cervical (10 m)	10 m	\$8.000	\$80.000
Sistema de sujeción	Accesorios para fijar correa	Hebillas y accesorios de ajuste para los arneses de sujeción	1 lote	\$22.000	\$22.000
Acabado superficial	Pintura anticorrosiva	Protección de la estructura metálica contra la corrosión	1	\$38.000	\$38.000
Insumos de fabricación	Brocas Incolma 15/64" y 1/8"	Brocas para perforación de placas de soporte de ruedas	2	\$12.000	\$24.000
Insumos de fabricación	Adhesivo PVC	Adhesivo para ensamblaje de piezas en PVC (manivela y poleas)	1	\$15.000	\$15.000

Función	Producto	Descripción	Cant.	Precio Unit.	Total
Subtotal					\$1.211.000
Imprevistos (10%)					\$1.123.737
TOTAL					\$2.334.000

Tabla 1. Listado de materiales del prototipo de tracción lumbar y costo total de fabricación. Elaboración propia (2026).

El costo total de fabricación del prototipo asciende a \$1.332.000 COP, incluyendo un 10% de imprevistos para cubrir desperdicio de material, ajustes y reprocesos durante la fase de construcción. Este valor no incluye mano de obra, dado que el ensamblaje fue realizado directamente por la autora del proyecto en el ~~multitaller~~ del director.

2. Comparación con Equipos del Mercado

Con el fin de evaluar la pertinencia económica del prototipo desarrollado, se realizó una comparación con equipos comerciales de tracción lumbar disponibles actualmente en el mercado. Esta comparación permite dimensionar el ahorro que representa una solución de fabricación local frente a dispositivos importados de uso clínico u hospitalario.

Equipo	Precio aprox. (COP)	Características	Contexto de uso
Prototipo desarrollado (este trabajo de grado)	\$2.334.737	Manual, sin electrónica. Tracción lumbar y cervical. Construido con materiales locales.	Académico / investigación
Saunders Lumbar HomeTrac (Chattanooga / DJO)	≈ \$4.780.000	Tracción lumbar neumática portátil para uso domiciliario. Medidor de presión.	Uso domiciliario
Equipo de tracción Triton DTS (Chattanooga, completo)	≈ \$35.000.000 – \$45.000.000*	Unidad electrónica programable, tracción cervical y lumbar, múltiples protocolos, mesa especializada.	Clínico / hospitalario
Camilla Galaxy TTET300 (tracción multifuncional)	≈ \$20.000.000 – \$30.000.000*	Camilla de tracción de 3 secciones con unidad de tracción integrada.	Clínico

Tabla 2. Comparación de costos entre el prototipo desarrollado y equipos comerciales de tracción lumbar. *Precios de equipos clínicos estimados a partir de cotizaciones de distribuidores

internacionales, sujetos a variación por importación, aranceles e IVA. Elaboración propia (2026), con base en datos de Chattanooga/DJO y distribuidores especializados en equipos de fisioterapia.

Los resultados evidencian que el prototipo desarrollado representa una reducción de costos superior al 75% frente al dispositivo de uso domiciliario más económico identificado (Saunders Lumbar HomeTrac), y una reducción superior al 95% frente a los equipos clínicos programables como el Triton DTS de Chattanooga. Esta diferencia se explica principalmente porque los equipos comerciales incorporan componentes electrónicos, sensores de presión, certificaciones regulatorias internacionales y procesos de manufactura industrializada, mientras que el prototipo fue concebido como una solución mecánica simplificada, de accionamiento manual y enfocada en el contexto académico y de investigación.

Es importante señalar que esta comparación tiene fines orientativos y no pretende equiparar funcionalmente el prototipo con dispositivos médicos certificados. El prototipo no cuenta con sensores de fuerza calibrados, registro electrónico de sesiones, ni certificación regulatoria (INVIMA, FDA o CE), por lo que su propósito actual se limita al ámbito de la investigación, la formación académica y la prueba de concepto de un sistema mecánico de tracción lumbar accesible.

Aun considerando estas diferencias, el resultado confirma que es posible desarrollar tecnología biomédica funcional a bajo costo dentro del contexto colombiano, utilizando materiales y procesos de manufactura disponibles localmente, lo cual respalda uno de los principales aportes de este proyecto: demostrar la viabilidad técnica y económica de un dispositivo de rehabilitación accesible para entornos con recursos limitados.

A6. Manual de Uso

Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

MANUAL DE USO

PROTOTIPO BIOMÉDICO PARA EL
ACOMPANAMIENTO EN LA REHABILITACIÓN FÍSICA
DE PACIENTES CON AFECTACIONES EN EL NERVI
CIÁTICO ASOCIADO CON DISCOPATÍA LUMBAR



DANA CHELSY TORRES MARTÍNEZ
INGENIERA BIOMÉDICA



Tabla de Contenido

Introducción	3
Objetivo del Manual	4
Alcance	5
Descripción General del Prototipo	6
Armado del prototipo	11
Procedimiento de Operación	17
Recomendaciones de Seguridad	21
Mantenimiento Preventivo	24
Diagnóstico básico de fallas	26
Almacenamiento y Transporte	28



Introducción

El presente Manual de Uso, Operación y Mantenimiento tiene como propósito proporcionar las instrucciones necesarias para el correcto armado, operación, mantenimiento preventivo y almacenamiento del **Prototipo Biomédico para el Acompañamiento en la Rehabilitación Física de Pacientes con Afectaciones en el Nervio Ciático Asociado con Discopatía Lumbar**.

Este documento fue elaborado con el fin de facilitar la comprensión del funcionamiento del prototipo, describiendo de manera clara sus principales componentes, el procedimiento de ensamblaje, las recomendaciones de seguridad y las actividades básicas de mantenimiento que contribuyen a preservar sus condiciones de funcionamiento.

Debido a que el equipo corresponde a un prototipo desarrollado con fines de investigación y validación técnica, la información contenida en este manual está orientada a su correcta operación dentro de entornos académicos, de laboratorio y de demostración tecnológica, favoreciendo el uso adecuado del dispositivo y la conservación de sus componentes.



Objetivo del manual

El presente manual tiene como objetivo proporcionar las instrucciones necesarias para el correcto armado, operación, mantenimiento preventivo y almacenamiento del prototipo biomédico de tracción lumbar de accionamiento manual.



Asimismo, busca orientar al usuario en la identificación de sus principales componentes, el procedimiento de funcionamiento y las recomendaciones de seguridad,



con el fin de garantizar un uso adecuado del equipo, preservar su integridad mecánica y



facilitar su utilización en actividades de investigación, validación técnica y formación académica.



Alcance

El documento comprende las instrucciones para el armado, la operación, el mantenimiento preventivo, el almacenamiento y el transporte del prototipo, así como la descripción de sus principales componentes y las recomendaciones de seguridad necesarias para su adecuada manipulación.

Este manual está dirigido a estudiantes, docentes, investigadores y personal técnico que participe en actividades de investigación, validación técnica, demostración tecnológica o formación académica relacionadas con el funcionamiento del prototipo.

Es importante señalar que el equipo corresponde a un prototipo experimental, por lo que la información contenida en este manual no constituye una guía para la aplicación clínica del dispositivo ni reemplaza los procedimientos establecidos para equipos biomédicos certificados.

Descripción General

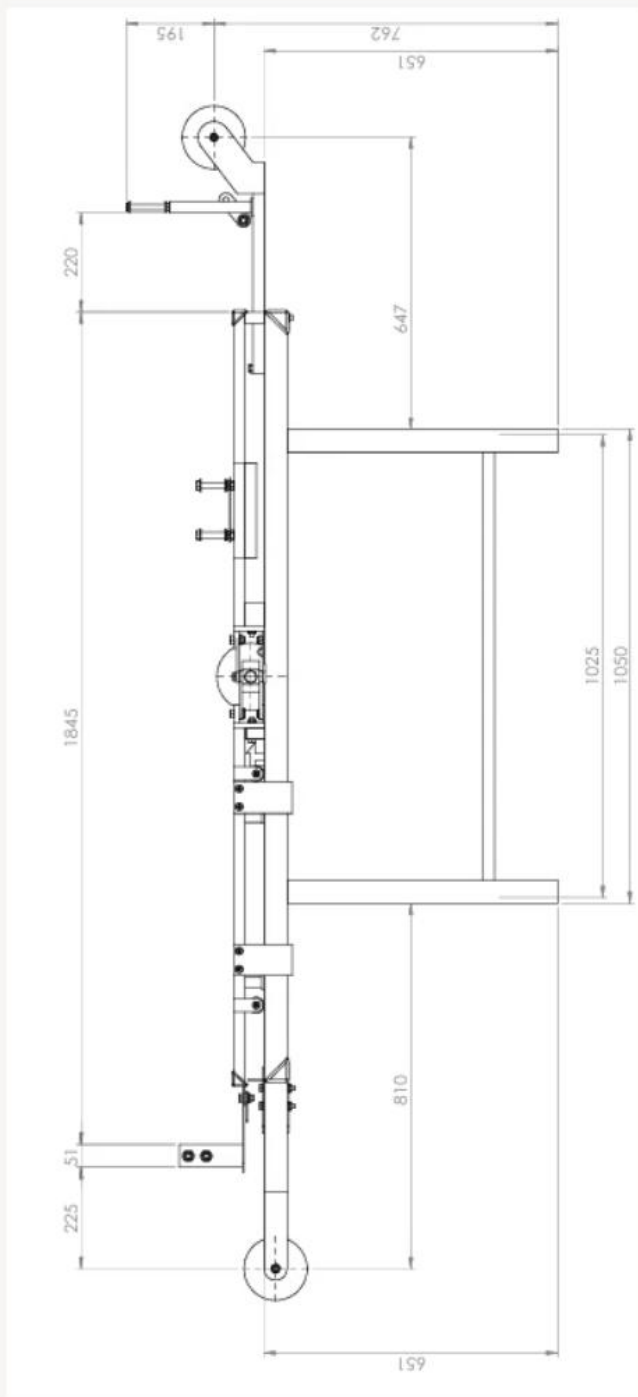
El prototipo biomédico de tracción lumbar es un equipo de accionamiento manual diseñado para generar una fuerza de tracción controlada mediante un sistema mecánico. Su estructura desmontable facilita el transporte, mientras que sus componentes permiten un armado sencillo y un funcionamiento estable durante las actividades de demostración, investigación y formación académica.



Características principales

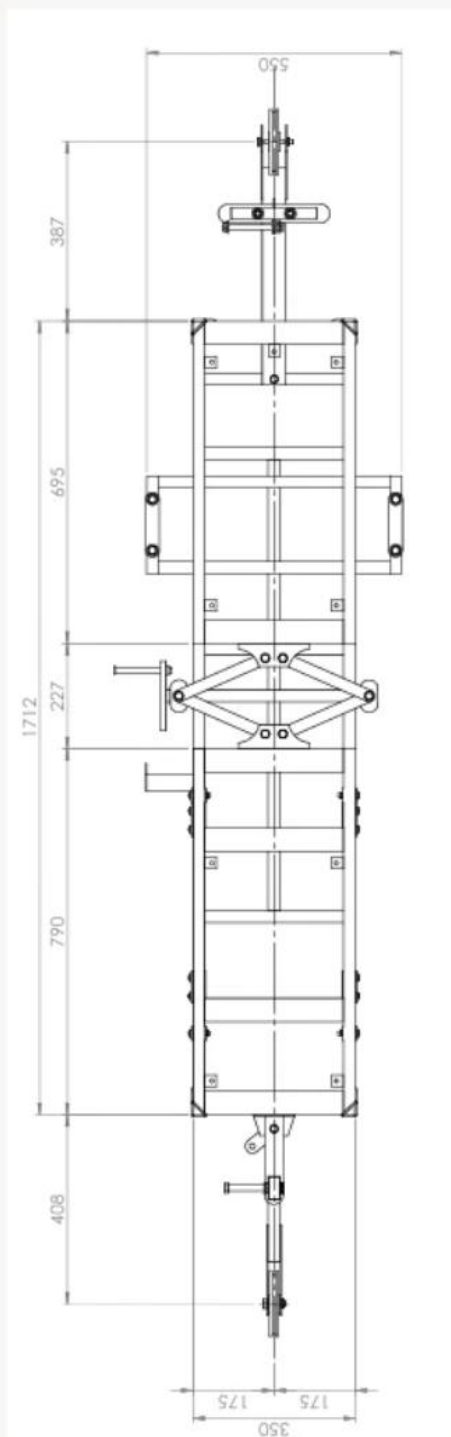
- Accionamiento manual mediante manivela.
- Estructura metálica desmontable.
- Sistema de tracción mecánico.
- Diseño portátil.
- Componentes intercambiables.
- Fácil transporte y almacenamiento.

MEDIDAS GENERALES



VISTA FRONTAL

MEDIDAS GENERALES



VISTA SUPERIOR

VISTA GUÍA DE PIEZAS

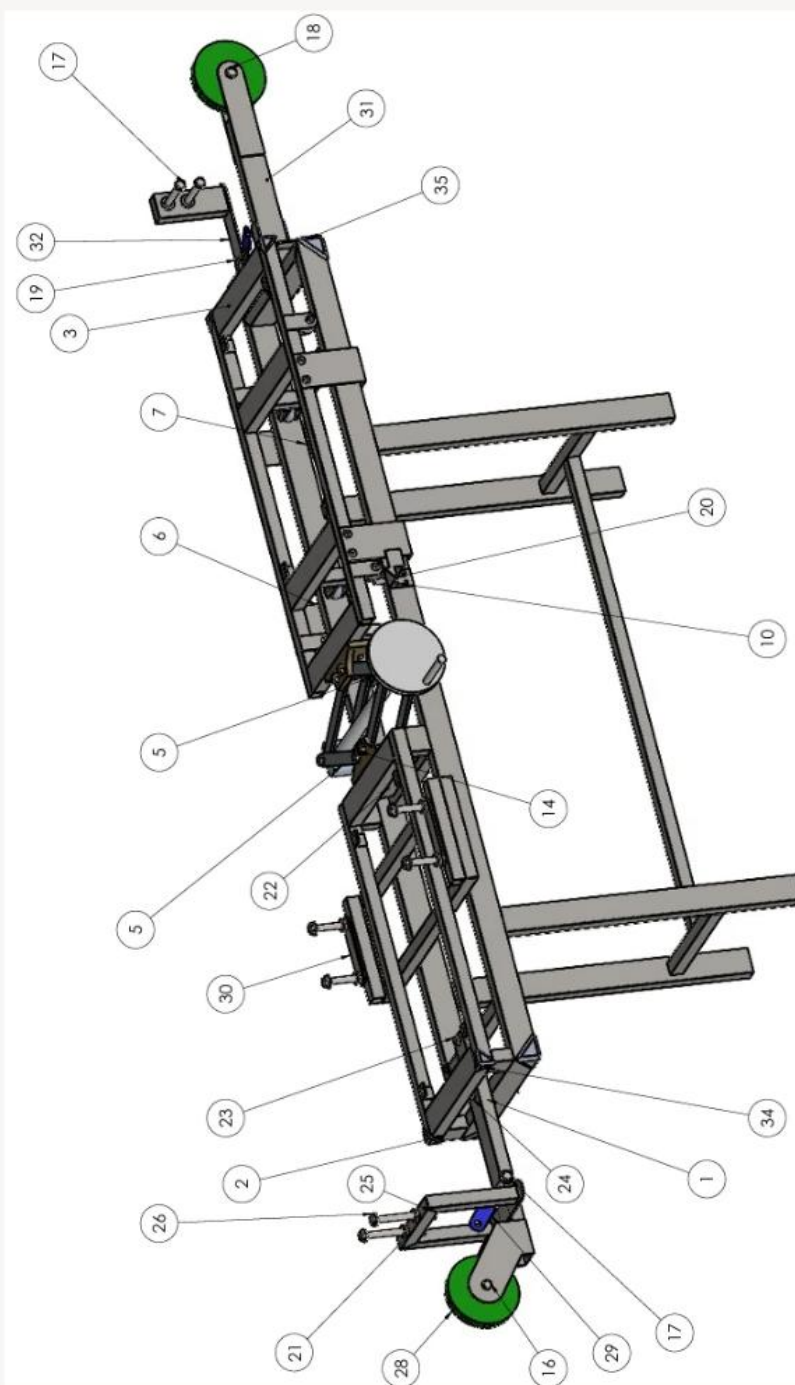


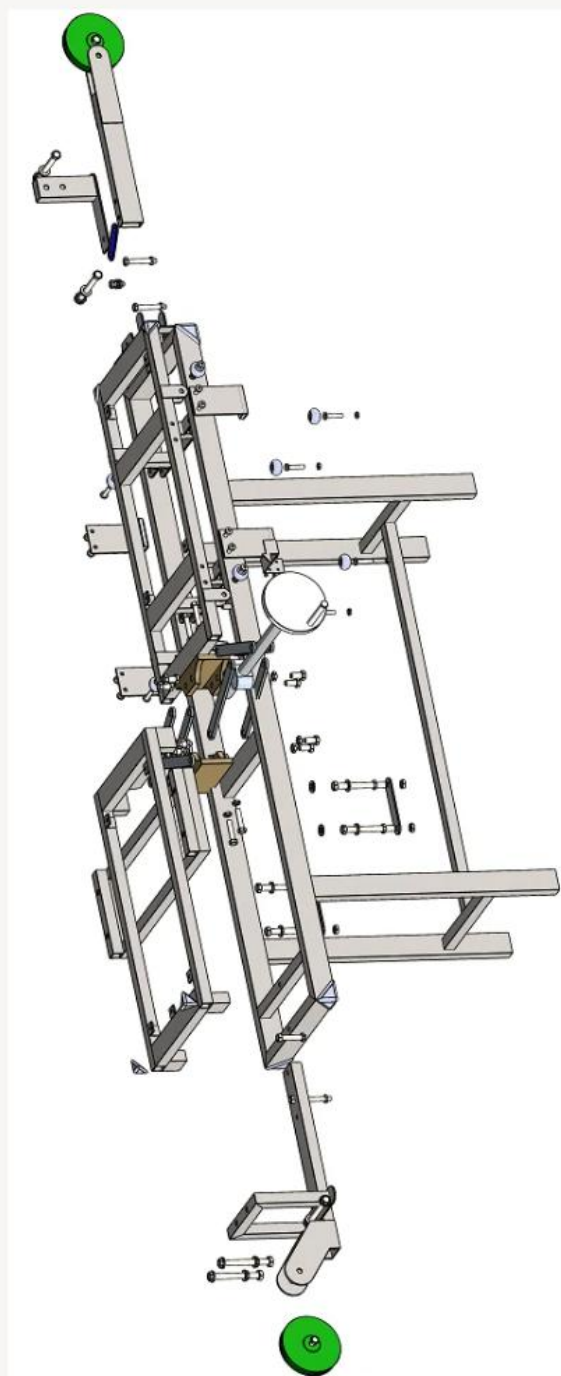
TABLA DE PIEZAS



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	CHASIS		1
2	PIEZA FIJA		1
3	PIEZA MOVIL		1
4	RUEDA DIA 35mm		8
5	GATO MECANICO		1
6	GUÍA		4
7	PLACA PVC		4
8	B18.6.7M - M8 x 1.25 x 20 Type I Cross Recessed PHMS --20N		8
9	B18.6.7M - M8 x 1.25 x 40 Type I Cross Recessed PHMS --40N		8
10	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 5 Type I Cross Recessed PHMS --5N		4
11	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M8 x 1.25 --D-N		8
12	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M12 x 1.75 --D-N		28
13	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M10 x 1.5, with 16mm WAF --D-N		10
14	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M12 x 1.75 x 25 --25WN		8
15	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M12 x 1.75 x 16 --16WN		2
16	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M10 x 1.5 x 70 --26WN		3
17	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M12 x 1.75 x 120 --30WN		7
18	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M12 x 1.75 x 40 --40WN		1
19	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M10 x 1.5 x 25 --25WN		1
20	MEDIDOR GUÍA		1
21	TRACCIÓN CERVICAL		1
22	B18.6.7M - M10 x 1.5 x 50 Indented HHMS --50N		4
23	B18.6.7M - M10 x 1.5 x 60 Indented HHMS --38N		1
24	B18.6.7M - M10 x 1.5 x 90 Indented HHMS --38N		1
25	B18.2.3.3M - Heavy hex screw, M12 x 1.75 x 120 --30N		2
26	B18.22M - Plain washer, 12 mm, narrow		22
27	B18.22M - Plain washer, 10 mm, narrow		2
28	POLEA TRACCIÓN CERVICAL		2
29	SUJETADOR TRACCIÓN CERVICAL		2

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
30	SOPORTE TORÁCICO		2
31	TRACCIÓN CERVICAL CON POLEA		1
32	SOPORTE PARA PIES		1
33	Pieza10		1
34	PROTECTOR ESQUINA 3CM		4
35	PROTECTOR ESQUINA 5CM		4

VISTA GUÍA PARA ARMADO

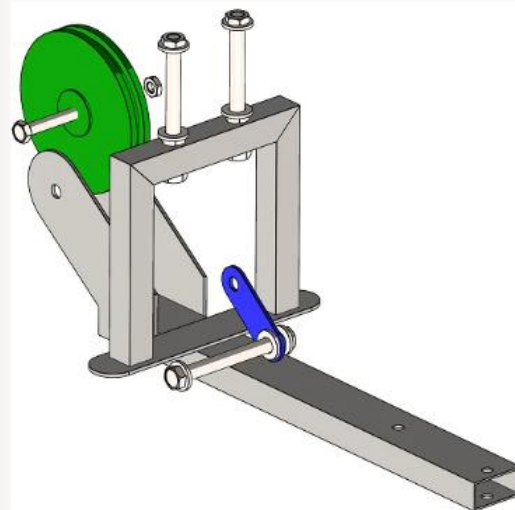


Armado del Prototipo



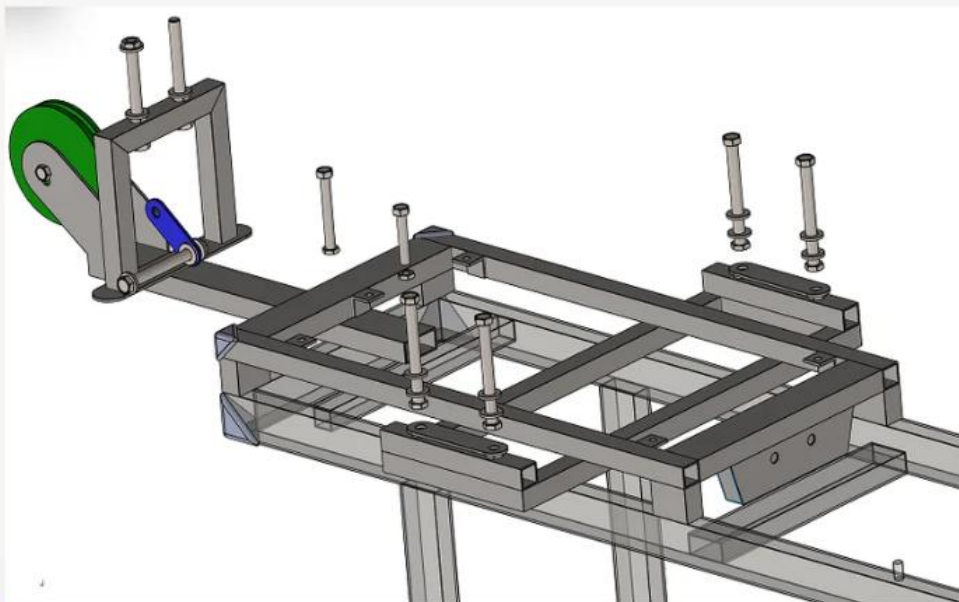
PASO 1

Verifique que la pieza de tracción cervical se encuentre correctamente ajustada y en buen estado antes de iniciar el ensamblaje.



PASO 2

Instale la pieza de tracción cervical entre la estructura principal del prototipo y el carro fijo. Posteriormente, fije los soportes de seguridad destinados a la sujeción del simulador.

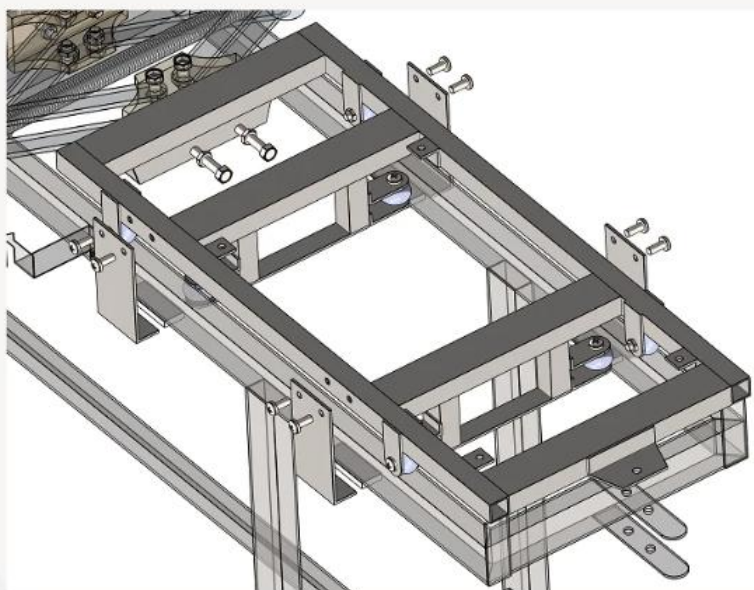
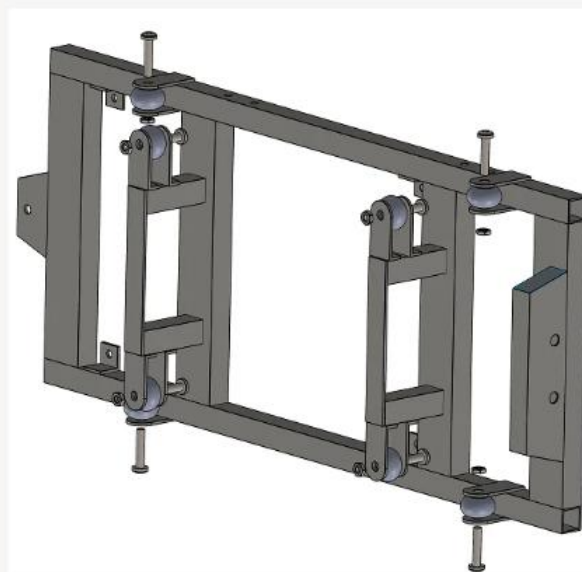


Armado del Prototipo



PASO 3

Ensamble el carro móvil sobre el chasis, verificando que su desplazamiento sea libre y uniforme.



PASO 4

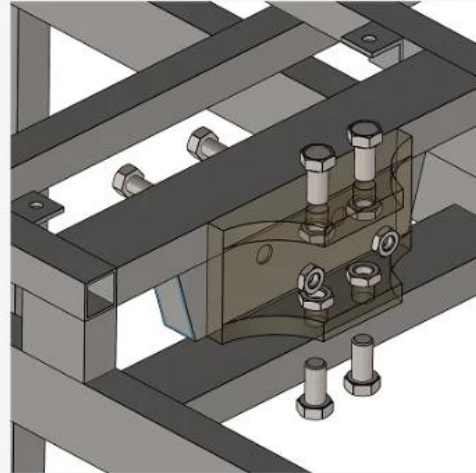
Instale las guías del riel sobre la estructura y, posteriormente, monte el gato mecánico en la posición correspondiente.

Armado del Prototipo



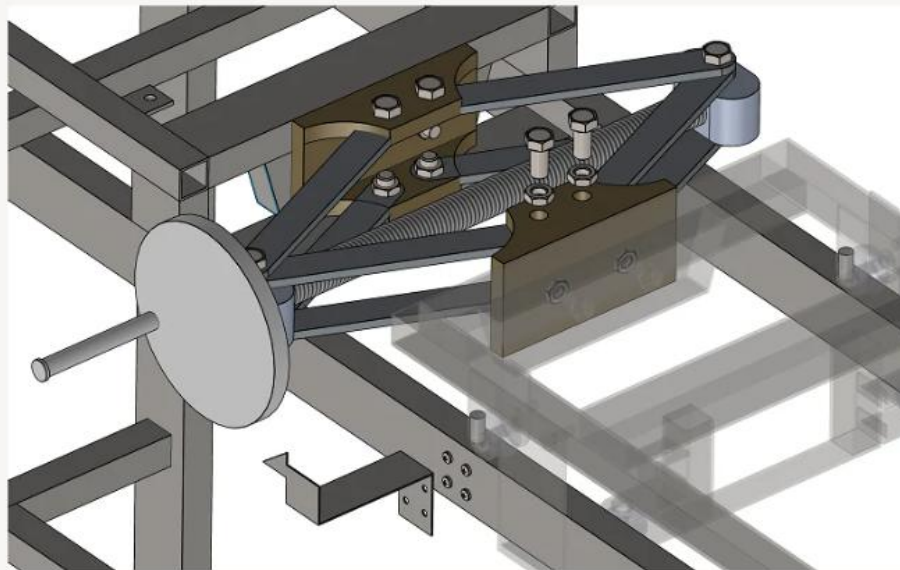
PASO 5

Fije el gato mecánico al carro fijo utilizando los elementos de sujeción previstos en el diseño del sistema.



PASO 6

Una vez asegurado el gato mecánico al carro fijo, acople su extremo móvil al carro móvil, verificando que la unión quede correctamente alineada.

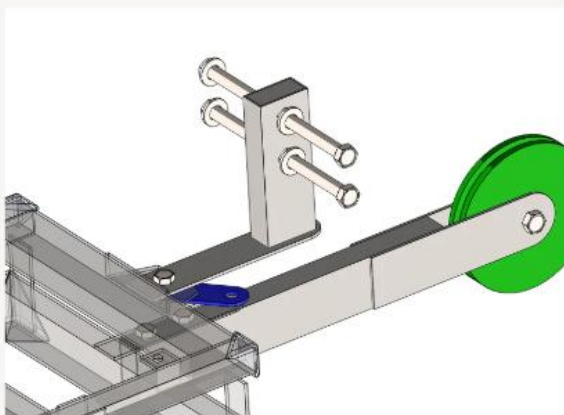
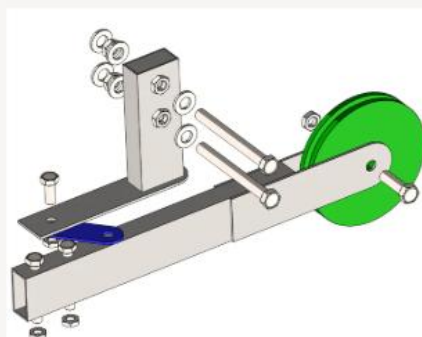


Armado del Prototipo



PASO 7

Verifique que los apoyos para los pies se encuentren correctamente ajustados y firmemente sujetos.



PASO 8

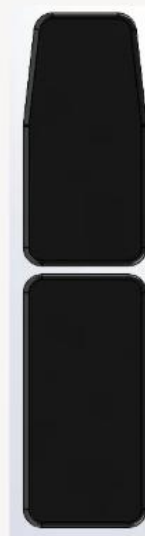
Fije el sistema de apoyo para los pies al chasis y al carro móvil, comprobando que todos los elementos de fijación queden correctamente ajustados.

Armado del Prototipo



PASO 9

Finalmente, instale la cojinería sobre las superficies correspondientes y verifique que todos los componentes del prototipo hayan quedado correctamente ensamblados antes de su operación.



Procedimiento de Operación

Paso 1

Verificación de la estructura

Antes de iniciar la operación del prototipo, verifique que todos los componentes estructurales se encuentren correctamente ensamblados. Compruebe que los elementos de fijación estén ajustados, que el riel permita un desplazamiento adecuado y que el gato mecánico se encuentre firmemente instalado y en posición inicial.



Paso 2

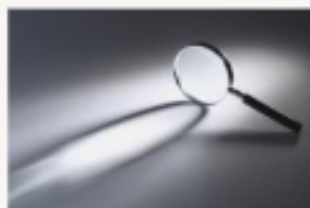
Sujeción al simulador

Ubique el simulador antropomórfico sobre la superficie del prototipo, asegurando una correcta alineación con el eje longitudinal de la estructura. Posteriormente, ajuste los sistemas de sujeción de manera que el simulador permanezca estable durante toda la prueba.



Procedimiento de Operación

Paso 3



Verificación del mecanismo de tracción

Antes de aplicar el movimiento, inspeccione visualmente el mecanismo de tracción y confirme que el gato mecánico, las guías y los elementos móviles no presenten obstrucciones, deformaciones o aflojamiento de sus componentes.

Paso 4



Accionamiento del sistema

Accione manualmente el gato mecánico mediante la manivela, realizando movimientos lentos y progresivos hasta generar el desplazamiento esperado del sistema de tracción. Durante esta etapa, observe el comportamiento del mecanismo y verifique que el desplazamiento se realice de forma uniforme.

Procedimiento de Operación

Paso 5

Supervisión del funcionamiento

Durante la operación, supervise continuamente el desplazamiento del sistema, verificando que no existan movimientos bruscos, interferencias mecánicas o ruidos anormales que puedan afectar el funcionamiento del prototipo.



Paso 6

Retorno a la posición inicial

Una vez finalizada la prueba, accione el mecanismo en sentido contrario hasta regresar el sistema de tracción a su posición inicial, evitando liberar la tensión de manera repentina.



Procedimiento de Operación



Paso 7

Inspección posterior

Finalizada la operación, verifique nuevamente el estado general del prototipo, comprobando que todos los componentes permanezcan correctamente fijados y que no se hayan presentado daños o aflojamientos durante la prueba.

Recomendaciones de Seguridad



Antes, durante y después de la operación del prototipo, tenga en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Verifique que todos los componentes estructurales se encuentren correctamente ensamblados y ajustados antes de cada uso.
2. Utilice el prototipo únicamente sobre una superficie plana, estable y libre de obstáculos que puedan afectar su funcionamiento.
3. No opere el equipo si observa componentes sueltos, deformados, desgastados o con signos de deterioro.
4. Emplee el prototipo exclusivamente con el simulador para el cual fue diseñado. No utilice el dispositivo en personas, ya que no ha sido validado para aplicaciones clínicas.

Recomendaciones de Seguridad



Antes, durante y después de la operación del prototipo, tenga en cuenta las siguientes recomendaciones:

5. Accione el gato mecánico de forma gradual, evitando movimientos bruscos que puedan generar esfuerzos excesivos sobre la estructura.
6. Mantenga las manos y demás partes del cuerpo alejadas de los componentes móviles durante el funcionamiento del mecanismo de tracción.
7. No exceda los límites mecánicos de recorrido del sistema de tracción ni aplique esfuerzos superiores a los considerados durante el diseño del prototipo.
8. Durante la operación, supervise continuamente el comportamiento del sistema y suspenda la prueba si identifica ruidos anormales, desalineaciones o cualquier condición que comprometa la seguridad del equipo.

Recomendaciones de Seguridad



Antes, durante y después de la operación del prototipo, tenga en cuenta las siguientes recomendaciones:

9. Finalizada la operación, libere completamente la tensión del mecanismo antes de desmontar el simulador o realizar cualquier ajuste.
10. 1. Mantenga el prototipo limpio y almacénelo en un lugar seco, protegido de la humedad, el polvo y agentes que puedan deteriorar sus componentes.



Mantenimiento Preventivo

Actividad	Descripción	Frecuencia
Inspección de la estructura	Verificar que el chasis y los componentes estructurales no presenten deformaciones, fisuras o daños visibles.	Antes de cada uso
Verificación de elementos de fijación	Comprobar que tornillos, tuercas, pernos y demás elementos de unión permanezcan correctamente ajustados.	Antes de cada uso
Limpieza del prototipo	Limpiar la estructura con un paño limpio y seco, eliminando polvo y suciedad. No utilizar productos abrasivos o corrosivos.	Staged deployment
Revisión del mecanismo de tracción	Verificar el funcionamiento del gato mecánico, comprobando que el accionamiento y el desplazamiento sean suaves y continuos.	Antes de cada uso



Mantenimiento Preventivo

Actividad	Descripción	Frecuencia
Inspección de las guías del riel	Confirmar que las guías estén limpias y libres de obstrucciones que afecten el desplazamiento del carro móvil.	Antes de cada uso
Revisión de la cojinería	Inspeccionar el estado de la cojinería y comprobar que no presente desprendimientos o deterioro.	Semanalmente o cuando se evidencie desgaste
Registro de novedades	Registrar cualquier anomalía detectada y realizar los ajustes necesarios antes de una nueva operación del prototipo.	Después de cada uso

Diagnóstico Básico de Fallas



Falla observada	Posible causa	Acción recomendada
El carro móvil no se desplaza correctamente	Obstrucción en las guías del riel o desalineación de los componentes.	Verificar la alineación del sistema y retirar cualquier elemento que impida el desplazamiento.
El gato mecánico no genera el desplazamiento o esperado.	El gato no está correctamente instalado o presenta un mal acoplamiento con la estructura.	Revisar los puntos de fijación y verificar el correcto ensamblaje del mecanismo.
Se presentan movimientos inestables durante la operación.	Elementos de fijación flojos o mal ajustados.	Inspeccionar y ajustar tornillos, tuercas y pernos antes de continuar con la operación.

Diagnóstico Básico de Fallas



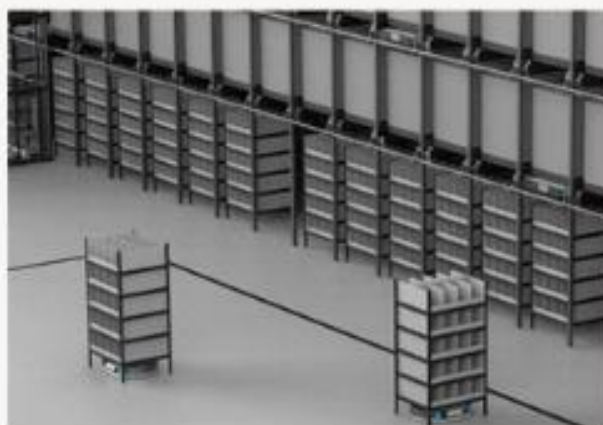
Falla observada	Posible causa	Acción recomendada
Se escuchan ruidos anormales durante el funcionamiento.	Desalineación de componentes o contacto inadecuado entre las piezas móviles.	Detener la operación e inspeccionar el sistema antes de reiniciar la prueba.
El simulador no permanece estable.	Los elementos de sujeción no fueron ajustados correctamente.	Verificar y ajustar nuevamente los sistemas de sujeción del simulador.

Importante: Si la falla persiste después de realizar las verificaciones descritas, suspenda la operación del prototipo hasta identificar y corregir la causa del inconveniente.

Almacenamiento y Transporte

Almacenamiento

- Con el fin de preservar las condiciones físicas y funcionales del prototipo, se recomienda almacenarlo en un lugar limpio, seco y protegido de la humedad, el polvo y la exposición directa a la luz solar. Antes de almacenarlo, verifique que todos los componentes se encuentren limpios, correctamente ensamblados y sin tensión aplicada al mecanismo de tracción.



Almacenamiento y Transporte



Transporte

- Cuando sea necesario trasladar el prototipo, se recomienda desmontar los componentes removibles siguiendo el procedimiento de armado en orden inverso. Durante el transporte, asegure cada pieza para evitar golpes, deformaciones o daños en la estructura. Evite colocar objetos pesados sobre el prototipo y utilice un medio de transporte que garantice su estabilidad durante el desplazamiento.



Recomendaciones para el Transporte

- Transportar el prototipo completamente descargado, sin tensión en el mecanismo de tracción.
- Proteger los componentes con material acolchado para evitar impactos.
- Sujetar adecuadamente las piezas durante el traslado.
- Verificar el estado general del prototipo antes de volver a ensamblarlo.





Información de Contacto



Proyecto

Prototipo Biomédico para el Acompañamiento en la Rehabilitación Física de Pacientes con Afectaciones en el Nervio Ciático Asociado con Discopatía Lumbar

Email

danachelsytorres@javerianacali.edu.co

Bibliografía

- [1] B. W. Koes, M. W. van Tulder, y W. C. Peul, "Diagnosis and treatment of sciatica," *BMJ*, vol. 334, n.º 7607, pp. 1313–1317, jun. 2007. DOI: 10.1136/bmj.39223.428495.BE
- [2] GBD 2021 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators, "Global burden of 288 causes of illness and injury in 204 countries and territories, 1990–2021," *Lancet*, 2022.
- [3] D. Hoy et al., "A systematic review of the global prevalence of low back pain," *Arthritis Rheum.*, vol. 64, n.º 6, pp. 2028–2037, 2012.
- [4] Organización Mundial de la Salud, "Low back pain fact sheet," OMS, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/low-back-pain>
- [5] C. Vanti et al., "Vertical traction for lumbar radiculopathy: a systematic review," *Archives of Physiotherapy*, vol. 11, art. 7, 2021. DOI: 10.1186/s40945-021-00102-5
- [6] H. Tanabe et al., "Immediate effect of mechanical lumbar traction in patients with chronic low back pain: A crossover, repeated measures, randomized controlled trial," *J. Orthop. Sci.*, vol. 26, n.º 6, pp. 953–961, 2021. DOI: 10.1016/j.jos.2020.09.013
- [7] F. Asiri et al., "Effects of patient-specific three-dimensional lumbar traction on pain and functional disability in patients with lumbar intervertebral disc prolapse," *Nigerian Journal of Clinical Practice*, vol. 23, n.º 4, pp. 498–502, abr. 2020. DOI: 10.4103/njcp.njcp_285_19
- [8] C. Vanti et al., "The effects of the addition of mechanical traction to physical therapy on low back pain? A systematic review with meta-analysis," *Acta Orthop. Traumatol. Turc.*, vol. 57, n.º 1, pp. 3–16, 2023. DOI: 10.5152/j.aott.2023.21323
- [9] Organización Mundial de la Salud, *Rehabilitation 2030: A Call for Action*. Ginebra, Suiza: WHO Press, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/initiatives/rehabilitation-2030>
- [10] J. Hartvigsen et al., "What low back pain is and why we need to pay attention," *Lancet*, vol. 391, n.º 10137, pp. 2356–2367, 2018. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)30480-X
- [11] F. Balagué, A. Mannion, F. Pellisé, y C. Cedraschi, "Non-specific low back pain," *Lancet*, vol. 379, n.º 9814, pp. 482–491, 2012. DOI: 10.1016/S0140-6736(11)60610-7
- [12] I. Wegner et al., "Traction for low-back pain with or without sciatica," *Cochrane Database Syst. Rev.*, n.º 9, art. CD003010, 2013. DOI: 10.1002/14651858.CD003010.pub5
- [13] S. Standring, *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*, 41.^a ed. London: Elsevier, 2016.
- [14] K. L. Moore, A. F. Dalley y A. M. R. Agur, *Clinically Oriented Anatomy*, 8.^a ed. Philadelphia, PA: Wolters Kluwer, 2018.

- [15] S. Standring, *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*, 41.^a ed. London: Elsevier, 2016.
- [16] A. I. Kapandji, *Fisiología Articular: Tronco y Raquis*, 6.^a ed. Madrid: Médica Panamericana, 2007.
- [17] N. Bogduk, *Clinical and Radiological Anatomy of the Lumbar Spine*, 5.^a ed. Edinburgh: Churchill Livingstone, 2012.
- [18] A. A. White y M. M. Panjabi, *Clinical Biomechanics of the Spine*, 2.^a ed. Philadelphia, PA: Lippincott, 1990.
- [19] J. P. G. Urban y S. Roberts, "Degeneration of the intervertebral disc," *Arthritis Research & Therapy*, vol. 5, n.º 3, pp. 120–130, 2003. DOI: 10.1186/ar629
- [20] F. Marchand y A. M. Ahmed, "Investigation of the laminate structure of lumbar disc anulus fibrosus," *Spine*, vol. 15, n.º 5, pp. 402–410, 1990.
- [21] J. A. Hides, C. A. Richardson y G. A. Jull, "Multifidus muscle recovery is not automatic after resolution of acute, first-episode low back pain," *Spine*, vol. 21, n.º 23, pp. 2763–2769, 1996.
- [22] M. Nordin y V. H. Frankel, *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*, 4.^a ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
- [23] A. Nachemson, "The load on lumbar disks in different positions of the body," *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 45, pp. 107–122, 1966.
- [24] K. Sato, S. Kikuchi y T. Yonezawa, "In vivo intradiscal pressure measurement in healthy individuals and in patients with ongoing back problems," *Spine*, vol. 24, n.º 23, pp. 2468–2474, 1999.
- [25] M. A. Adams y W. C. Hutton, "The effect of posture on the role of the apophysial joints in resisting intervertebral compressive force," *Journal of Bone and Joint Surgery*, vol. 62, n.º 3, pp. 358–362, 1980.
- [26] D. Davis, M. Taqi y A. Vasudevan, "Sciatica," en *StatPearls*. Treasure Island, FL: StatPearls Publishing, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507908/>
- [27] K. Olmarker y B. Rydevik, "Pathophysiology of sciatica," *Orthopedic Clinics of North America*, vol. 22, n.º 2, pp. 223–234, 1991.
- [28] J. P. Valat, S. Genevay, M. Marty, S. Rozenberg y B. Koes, "Sciatica," *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, vol. 24, n.º 2, pp. 241–252, 2010. DOI: 10.1016/j.berh.2009.11.008
- [29] M. C. Battié, T. Videman, E. Levalahti, K. Gill y J. Kaprio, "Heritability of low back pain and the role of disc degeneration," *Pain*, vol. 131, n.º 3, pp. 272–280, 2004. DOI: 10.1016/j.pain.2007.01.010
- [30] D. F. Fardon et al., "Lumbar disc nomenclature: Version 2.0," *Spine Journal*, vol. 14, n.º 11, pp. 2525–2545, 2014. DOI: 10.1016/j.spinee.2014.04.022

- [31] A. Bozzao et al., "Lumbar disk herniation: MR imaging assessment of natural history in patients treated without surgery," *Radiology*, vol. 185, n.º 1, pp. 135–141, 1992. DOI: 10.1148/radiology.185.1.1523293
- [32] Organización Mundial de la Salud, *World Report on Disability*. Ginebra: WHO Press, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240685215>
- [33] O. Airaksinen et al., "Chapter 4: European guidelines for the management of chronic nonspecific low back pain," *European Spine Journal*, vol. 15, supl. 2, pp. S192–S300, 2006. DOI: 10.1007/s00586-006-1072-1
- [34] G. Bronfort et al., "Effectiveness of manual therapies: The UK evidence report," *Chiropractic & Osteopathy*, vol. 18, art. 3, 2010. DOI: 10.1186/1746-1340-18-3
- [35] S. M. Rubinstein et al., "Spinal manipulative therapy for chronic low-back pain," *Cochrane Database of Systematic Reviews*, n.º 2, art. CD008112, 2011. DOI: 10.1002/14651858.CD008112.pub2
- [36] C. A. Richardson, P. W. Hodges y J. Hides, *Therapeutic Exercise for Lumbopelvic Stabilization*, 2.ª ed. Edinburgh: Churchill Livingstone, 2004.
- [37] J. A. Hayden, M. W. van Tulder, A. Malmivaara y B. W. Koes, "Exercise therapy for treatment of non-specific low back pain," *Cochrane Database of Systematic Reviews*, n.º 3, art. CD000335, 2005. DOI: 10.1002/14651858.CD000335.pub2
- [38] R. Melzack y P. D. Wall, "Pain mechanisms: A new theory," *Science*, vol. 150, n.º 3699, pp. 971–979, 1965. DOI: 10.1126/science.150.3699.971
- [39] G. J. van der Heijden et al., "The efficacy of traction for back and neck pain: A systematic, blinded review of randomized clinical trial methods," *Physical Therapy*, vol. 75, n.º 2, pp. 93–104, 1995. DOI: 10.1093/ptj/75.2.93
- [40] M. Krause, K. M. Refshauge, M. Dessen y R. Boland, "Lumbar spine traction: Evaluation of effects and recommended application for treatment," *Manual Therapy*, vol. 5, n.º 2, pp. 72–81, 2000. DOI: 10.1054/math.2000.0235
- [41] J. Clarke et al., "Traction for low back pain with or without sciatica," *Cochrane Database of Systematic Reviews*, n.º 2, art. CD003010, 2007. DOI: 10.1002/14651858.CD003010.pub4
- [42] G. L. Pellecchia, "Lumbar traction: A review of the literature," *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, vol. 20, n.º 5, pp. 262–267, 1994. DOI: 10.2519/jospt.1994.20.5.262
- [43] A. A. Harte, G. D. Baxter y J. H. Gracey, "The efficacy of traction for back pain: A systematic review of randomized controlled trials," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 84, n.º 10, pp. 1542–1553, 2005. DOI: 10.1016/j.apmr.2003.06.013
- [44] H. D. Saunders, "Lumbar traction," *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, vol. 5, n.º 1, pp. 6–10, 1983. DOI: 10.2519/jospt.1983.5.1.6

- [45] S. Tadano et al., "Lumbar mechanical traction: A biomechanical assessment of change at the lumbar spine," *BMC Musculoskeletal Disorders*, vol. 20, art. 155, 2019. DOI: 10.1186/s12891-019-2545-9
- [46] D. H. Chow, E. M. Yuen, L. Xiao y M. C. Leung, "Mechanical effects of traction on lumbar intervertebral discs: A magnetic resonance imaging study," *Musculoskeletal Science and Practice*, vol. 29, pp. 78–83, 2017. DOI: 10.1016/j.msksp.2017.03.007
- [47] J. M. Fritz, W. Lindsay, J. W. Matheson y G. P. Brennan, "Is there a subgroup of patients with low back pain likely to benefit from mechanical traction? Results of a randomized clinical trial and subgrouping analysis," *Spine*, vol. 32, n.º 26, pp. E793–E800, 2007. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31815d6ebc
- [48] N. Carvajal Tello, W. González Marmolejo y A. Segura Ordoñez, "Diseño y desarrollo tecnológico de un dispositivo terapéutico para la rehabilitación física en el ámbito hospitalario," *Revista Salud Uninorte*, vol. 35, n.º 2, pp. 250–263, 2019. DOI: 10.14482/sun.35.2.617.1
- [49] D. S. Fernández Parra y E. J. Mora Tola, "Diseño y construcción de un equipo de rehabilitación tipo tracción lumbar con terapia continua e intermitente," tesis de grado, Universidad del Azuay, Ecuador, 2011.
- [50] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 9.ª ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2011.
- [51] Ministerio de la Protección Social, Decreto 4725 de 2005. Bogotá, Colombia: Gobierno de Colombia, 2005. [En línea]. Disponible: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/lists/bibliotecadigital/ride/de/dij/decreto-4725-de-2005.pdf>
- [52] G. Gallego Ruiz, *Análisis de posibles modificaciones en el diseño actual de un equipo de tracción lumbar, proyecto de fin de carrera*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2006. [En línea]. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/2924>
- [53] W. M. Park, K. Kim y Y. H. Kim, "Biomechanical analysis of two-step traction therapy in the lumbar spine," *Manual Therapy*, vol. 19, n.º 6, pp. 527–533, 2014. DOI: 10.1016/j.math.2014.05.004
- [54] H. Farajpour y N. Jamshidi, "Effects of different angles of the traction table on lumbar spine ligaments: A finite element study," *Clinics in Orthopedic Surgery*, vol. 9, n.º 4, pp. 480–488, 2017. DOI: 10.4055/cios.2017.9.4.480