



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE INGENIERIA EN BIOMEDICINA**

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA SILLA EXOESQUELÉTICA PARA PACIENTE
GERIÁTRICO CON ARTROSIS DEGENERATIVA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS EN BIOMEDICINA**

AUTORES: DAYANNA ESTEFANÍA SUÁREZ LÓPEZ

LEONARDO JOEL CALLATASIG MONTENEGRO

TUTOR: MICAELA NATALY VILLA ROSERO

Quito-Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Dayanna Estefanía Suárez López con documento de identificación N° 1720139920 y Leonardo Joel Callatasig Montenegro con documento de identificación N° 1724083348 manifestamos que:

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

Quito, 31 de julio del año 2024

Atentamente,



Dayanna Estefanía Suárez López
1720139920



Leonardo Joel Callatasig Montenegro
1724083348

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

Nosotros, Dayanna Estefanía Suárez López con documento de identificación No. 1720139920 y Leonardo Joel Callatasig Montenegro con documento de identificación No. 1724083348, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA SILLA EXOESQUELÉTICA PARA PACIENTE GERIÁTRICO CON ARTROSIS DEGENERATIVA, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros en Biomedicina en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 31 de julio del año 2024

Atentamente,



Dayanna Estefanía Suárez López
1720139920



Leonardo Joel Callatasig Montenegro
1724083348

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Micaela Nataly Villa Rosero con documento de identificación N° 0302002977, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA SILLA EXOESQUELÉTICA PARA PACIENTE GERIÁTRICO CON ARTROSIS DEGENERATIVA, realizado por Dayanna Estefanía Suárez López con documento de identificación No. 1720139920 y por Leonardo Joel Callatasig Montenegro con documento de identificación No. 1724083348, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 31 de julio del año 2024

Atentamente,



Ing. Micaela Nataly Villa Rosero MSc

0302002977

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA SILLA EXOESQUELÉTICA PARA PACIENTE GERIÁTRICO CON ARTROSIS DEGENERATIVA

DESIGN AND MANUFACTURE OF AN EXOSKELETAL CHAIR FOR A GERIATRIC PATIENT WITH DEGENERATIVE OSTEOARTHRITIS

Suárez López Dayanna Estefanía ¹, , Callatasig Montenegro Leonardo Joel ², ,
Villa Rosero Micaela Nataly ³, 

Resumen

El desarrollo de sillas exoesqueléticas emerge como una solución innovadora diseñada para proporcionar un soporte complementario a las articulaciones y disminuir la carga sobre ellas durante la actividad física. Sin embargo, estas sillas son manufacturadas con materiales no adecuados para resistir cargas y tampoco personalizados en base a la estructura biomecánica del paciente. Este artículo presenta el diseño y fabricación de una silla exoesquelética tipo ortosis pasiva que cumple con las características biomecánicas específicas y contribuye a la reducción del deterioro degenerativo de las articulaciones de las rodillas de una paciente geriátrica del asilo Betania. Para la manufactura de la silla se utilizó filamento ABS y tubería de acero estructural. El desempeño de la silla exoesquelética fue evaluado mediante pruebas de funcionamiento con el paciente, análisis de la marcha, y un análisis de elementos finitos identificando las zonas más críticas de esfuerzo y las posibles mejoras al prototipo.

Palabras clave: Análisis de marcha, Artrosis degenerativa, Elementos finitos, Silla exoesquelética.

Abstract

The development of exoskeletal chairs emerges as an innovative solution designed to provide complementary support to the joints and decrease the load on them during physical activity. However, these chairs are manufactured with materials that are not suitable to withstand loads and are not customized based on the biomechanical structure of the patient. This article presents the design and manufacture of an exoskeletal chair type passive orthosis that meets the specific biomechanical characteristics and contributes to the reduction of the degenerative deterioration of the knee joints of a geriatric patient of the Betania nursing home. ABS filament and structural steel tubing were used to manufacture the chair. The performance of the exoskeletal chair was evaluated through functional tests with the patient, gait analysis, and a finite element analysis identifying the most critical areas of stress and possible improvements to the prototype.

Keywords: Gait analysis, Degenerative osteoarthritis, Finite elements, Exoskeletal chair.

¹Estudiante, Carrera de Biomedicina, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

²Estudiante, Carrera de Biomedicina, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

³Profesor, Departamento de Biomedicina, Universidad Politécnica Salesiana Quito, Ecuador.

1. Introducción

La artrosis degenerativa también conocida como osteoartritis, es una enfermedad determinada por el deterioro gradual del cartílago que recubre los extremos óseos en las articulaciones del cuerpo humano. Esta afección se presenta con mayor frecuencia en manos, rodillas, cadera y columna vertebral, siendo más prevalente en personas de edad avanzada [1]. Este deterioro del cartílago genera dolor e inflamación debido a la fricción entre los huesos afectados. Además, factores como: sobrepeso, lesiones articulares y deformidades óseas favorecen al desarrollo de esta patología. De esta forma, su autonomía e independencia en pacientes geriátricos se ve afectada. Por lo que es necesario el uso de dispositivos que reduzcan los síntomas y mejoren la calidad de vida de los usuarios que lo padezcan [2].

Por otro lado, como consecuencia de la degeneración articular asociada al envejecimiento y la actividad física en pacientes geriátricos, se generan afecciones significativas en sus articulaciones de las extremidades inferiores, las cuales soportan mayor carga y sostienen el peso corporal [3]. Por ello, la articulación de la rodilla, en particular, se encuentra sometida a una presión constante y experimenta un desgaste progresivo del cartílago junto a cambios estructurales en el hueso subyacente lo que se conoce como: artrosis degenerativa [4]. Este proceso no solo causa dolor agudo y crónico en la articulación, sino que también provoca fatiga crónica derivada de permanecer de pie durante períodos prolongados, lo cual limita la capacidad de caminar de estos pacientes por lo que requieren pausas frecuentes, lo que puede impactar negativamente a su estilo de vida y capacidad para llevar a cabo actividades diarias [5].

En respuesta a estas necesidades, los exoesqueletos presentan una integración ingenieril para interactuar de manera intuitiva y efectiva con el cuerpo humano. Estos sistemas se desarrollan con el propósito de satisfacer las necesidades motoras biológicas, ofreciendo un soporte no invasivo que se adapta externamente a las extremidades como una vestimenta adicional [6]. Entre estos dispositivos, el desarrollo de sillas exoesqueléticas emerge como una solución innovadora que proporciona un soporte complementario a las articulaciones y disminuye la carga sobre ellas durante la actividad física, ya que brinda la oportunidad de caminar y descansar cuando la persona lo requiera [7]. Sin embargo, estas sillas en su mayoría son manufacturadas con materiales que no son adecuados para resistir cargas y tampoco personalizados en base a la estructura biomecánica del paciente. Esta ausencia de selección de materiales apropiados reduce su durabilidad y aumenta el riesgo de fallas estructurales, de esta forma comprometiendo la seguridad y eficacia de las sillas exoesqueléticas.

En la última década, las sillas exoesqueléticas han avanzado significativamente como una solución tecnológica para mitigar la fatiga muscular y el desgaste articular asociados con actividades prolongadas de bipedestación y locomoción. Estos dispositivos biomecánicos emplean actuadores, sensores y materiales avanzados para proporcionar soporte ergonómico y, de esta forma, reducir la carga sobre las articulaciones [8].

Además, la necesidad de evaluar la mejora del movimiento en pacientes con esta afección ha motivado a analizar el efecto de las sillas exoesqueléticas sobre la marcha y el equilibrio al caminar para verificar si este dispositivo biomecánico se adapta al cuerpo del paciente sin añadir pesos adicionales, ni provocar desequilibrios que generen una marcha patológica [9]. Esta adaptación de produce de manera ergonómica mediante el uso de arneses biomecánicos, los cuales brindan mayor soporte a la parte superior del cuerpo y un punto de equilibrio óptimo. Por lo tanto, se obtiene una marcha equilibrada y se reduce los riesgos asociados con el cambio de postura [10].

El análisis de marcha permite la detección de posibles patologías, como en el caso de pacientes con artrosis degenerativa. Este análisis implica la observación y registro meticuloso de parámetros como: ángulos y medidas de la zancada, el tiempo de contacto con el suelo, la estabilidad temporal, el ángulo de paso y la simetría de la marcha en ambas extremidades [11].

Entre los usos más comunes de las sillas exoesqueléticas se encuentra la prevención de afecciones miotendinosas en grupos específicos de pacientes que permanecen de pie o en posiciones de flexión. Esto se logra mediante la aplicación de resortes de torsión que absorben y distribuyen la carga aplicada en los miembros inferiores, almacenando el estrés y el esfuerzo en el mecanismo. De esta manera, se evita la sobrecarga en las articulaciones de las rodillas y se previene el desgaste a largo plazo [12]. Sin embargo, estos dispositivos biomecánicos se ven limitados debido que son desarrollados para prevenir estas afecciones en pacientes adultos, pero no específicamente para pacientes geriátricos.

Por otra parte, el método de análisis de elementos finitos (FEA) en biomecánica es utilizado para simular y analizar las fuerzas y deformaciones en diseños tridimensionales [13]. Permitiendo reducir el costo experimental y disminuir la cantidad de ensayos prueba - error simulando la aplicación de dispositivos incluyendo materiales y condiciones de carga.

En este trabajo se presenta el diseño y construc-

ción de una silla exoesquelética tipo ortesis pasiva que cumple con las características biomecánicas específicas de la articulación de la rodilla y contribuye a la reducción del deterioro degenerativo de un paciente geriátrico del asilo Betania. El diseño y construcción de la silla exoesquelética consta de dos etapas: Diseño/modelado y fabricación. En la primera etapa, se realizó la toma de mediciones antropométricas de los miembros inferiores del paciente, tales como: nivel de perímetro, ángulos y longitudes [14]. Además, se diseña y ensambla el conjunto de piezas en el software SolidWorks para realizar un análisis de elementos finitos y obtener los valores de deformación, fuerza y desplazamiento. En la segunda etapa, se fabrica y ensambla físicamente la silla exoesquelética mediante el uso de tubería estructural de acero y filamento ABS para posteriormente efectuar pruebas de funcionamiento y análisis con el paciente.

2. Materiales y Métodos

La silla exoesquelética ha sido concebida como un modelo destinado a satisfacer las exigencias biomecánicas y ergonómicas del paciente. Este dispositivo ofrece un soporte complementario a las articulaciones de los miembros inferiores, con el objetivo de cumplir con sus necesidades específicas. En consecuencia, el proceso de desarrollo de la silla exoesquelética se divide en dos fases principales: el diseño/modelado, seguido por la fase de fabricación del dispositivo completo.

Las medidas antropométricas serán tomadas en el asilo Betania. Posteriormente, el diseño se generará en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, donde se encuentran los computadores con el software necesario. Se optó por utilizar SolidWorks debido a sus diversas herramientas que facilitan el proceso de diseño y modelado, además de contar con simulación de elementos finitos y generación de planos. Para el ensamblaje, se comunicó con la empresa “Armon Soluciones Industriales”, cuya experiencia en proyectos metalmeccánicos proporcionó valiosas recomendaciones para generar un diseño funcional. Para las evaluaciones finales, que incluyen el análisis de marcha, se captará el video en el asilo Betania donde analizaremos la marcha con y sin la silla exoesquelética, los videos se analizará en el laboratorio de rehabilitación de la Universidad Politécnica Salesiana utilizando el software Kinovea.

2.1. Diseño y Modelado

Esta etapa consta de la toma de mediciones antropométricas del paciente, seguido del diseño inicial que se adecua al paciente y sus necesidades. Posteriormente, se efectúa una etapa de ensamblaje total de los componentes diseñados para la silla exoesquelética y se lleva a cabo un análisis de elementos finitos, tales

como: valores de deformación, fuerza y desplazamiento. Además, se realiza los planos del ensamblaje.

2.1.1. Antropometría del paciente

La silla exoesquelética fue diseñada según medidas antropométricas extraídas de una paciente del asilo Betania, donde se generó una solicitud para autorizar la toma de medidas, fotos y videos con fines investigativos y que fue previamente aprobada. La paciente seleccionada es de sexo femenino de 89 años de edad con una estatura de 1.38 m y un peso de 50 kg. La paciente tiene antecedentes de alzheimer y artrosis degenerativa en los miembros inferiores, específicamente en las articulaciones de las rodillas. Como se observa en la (Figura 1) las medidas antropométricas obtenidas incluyen:

- Perímetros: Circunferencia de su cadera, muslo, pierna y talón.
- Longitudes: Distancia de las articulaciones de la rodilla al pie.
- Ángulos: Grados de inclinación con respecto a sus extremidades inferiores.

En la toma de medidas antropométricas se utilizó una cinta métrica debido a su flexibilidad y adaptabilidad al momento de rodear las extremidades inferiores, de esta forma, para las medidas longitudinales de igual manera se utilizó esta herramienta en las extremidades inferiores para obtener las medidas del paciente. En el caso de las medidas angulares se utilizó un goniómetro colocado de la forma que se obtenga el valor del ángulo de la cadera con respecto al muslo, de igual manera con la rodilla, el talón y para concluir el talón con respecto al pie.

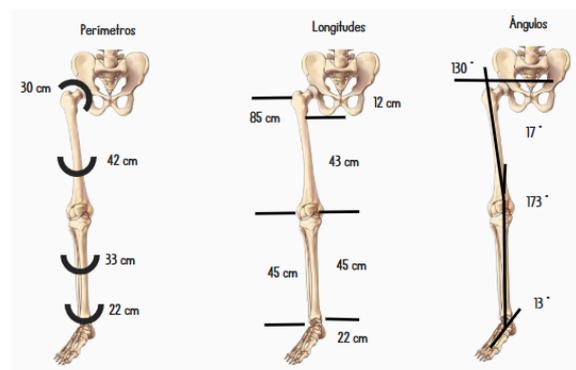


Figura 1. Medidas Antropométricas

2.1.2. Diseño de piezas en SolidWorks

Con las medidas adquiridas de la paciente se establece el inicio de la estructura en la cadera como centro de gravedad hasta el pie como base de apoyo final [15].

Con el fin de que el diseño de las piezas cumpla con los requisitos ergonómicos para el paciente, entre estos alinear automáticamente la columna vertebral en su posición natural, el diseño de las veintinueve piezas que tiene el dispositivo fue considerando no incomodar al contacto con los miembros inferiores.



Figura 2. Despiece de la silla exoesquelética

Posteriormente, se realiza un ensamblaje de la totalidad de las piezas en el software de SolidWorks para verificar su correcto dimensionamiento, y un adecuado ajuste entre las mismas. Además, se establecieron restricciones y una sujeción fija para poder verificar el movimiento de cada conjunto que compone la silla exoesquelética y que no existan desplazamientos incorrectos. En la Figura 3, se observa el diseño y ensamblaje total del dispositivo diseñado.



Figura 3. Ensamblaje de la silla exoesquelética

2.1.3. Análisis mediante elementos finitos

Con el fin de evaluar la resistencia estructural se lleva a cabo el análisis estático por elementos finitos, mediante la sustitución de variables continuas por componentes discretos con comportamientos definidos y restringidos. Como se ilustra en la Figura 4 el método comienza con la subdivisión de la geometría en unidades pequeñas

conocidas como elementos conectados mediante nodos para formar una malla. El tamaño de los elementos varía entre 10 y 50 milímetros lo que optimizado mediante técnicas basadas en la curvatura combinada con un total de 56,453 nodos. Además, se facilita el análisis por el uso de procesadores multinúcleo para acelerar el proceso de mallado especialmente en figuras de menor tamaño que presentan errores en el método de mallado de la estructura completa [16].

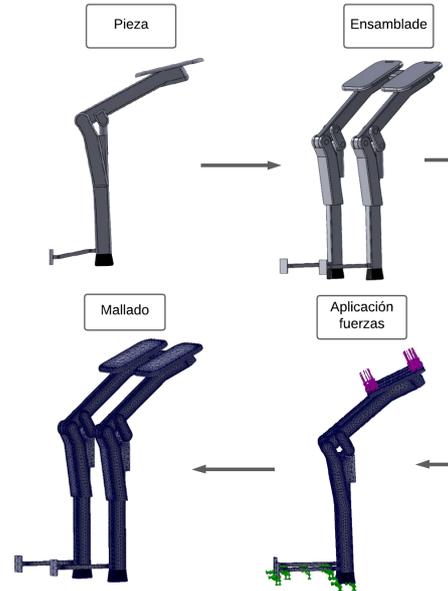


Figura 4. Diagrama de análisis de elementos finitos

Una vez generada la malla sobre el ensamblaje, se aplican restricciones en la base de la estructura para evitar movimientos libres considerando que se está analizando una posición estática. Posterior a esto, se calcula el equilibrio estático asegurándose de posicionar el centro de gravedad en la figura modelada. Se añaden cargas externas que simulan la carga derivada del peso de la paciente (490 N), considerando que esta se divide de forma igual para cada pierna, como se indica en las ecuaciones 1 y 2.

$$F = m * g \quad (1)$$

$$N = kg * m/s^2 \quad (2)$$

Con la carga aplicada en cada asiento de la estructura, se procede a analizar la fuerza, el desplazamiento y la deformación resultantes en la silla. La carga se aplica desde el asiento hacia el centro de gravedad [17].

2.2. Fabricación de la silla exoesquelética

2.2.1. Selección de materiales

En esta etapa cada componente se selecciona con el objetivo de optimizar su resistencia y durabilidad.

El émbolo, los asientos y las abrazaderas del pie se fabricaron en filamento ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) mediante manufactura aditiva. Con propiedades de elasticidad de 2.5 GPa y resistencia a la tracción de 50 MPa. Además, su temperatura ideal de 230 °C proporciona mayor longevidad y capacidad para soportar altas temperaturas. El ABS también ofrece una combinación ideal de rigidez y ductilidad, permitiendo ser estirado bajo esfuerzo sin romperse. Estas características lo hacen adecuado para piezas funcionales y prototipos robustos [18].

En las partes superior e inferior se utilizó tubería de acero inoxidable AISI 304, destacado por sus propiedades mecánicas superiores, incluyendo una resistencia a la tracción de 460 a 110 MPa y un módulo de elasticidad de 190 a 210 GPa. Además, este material posee una notable resistencia a la corrosión y una excelente capacidad de soldadura, lo que facilita su manipulación y reduce los requerimientos de mantenimiento.

2.2.2. Fabricación y Ensamblaje físico

El proceso de fabricación y ensamblaje físico comienza con la generación de planos detallados, para guiar todas las etapas de producción. Los planos están en formato A4 a escala 1:2. Cada pieza se presenta desde la vista frontal y laterales para proporcionar detalle completo. Se definen las dimensiones necesarias para la fabricación de la silla, incluyendo cotas de las caras, diámetros y radios de circunferencias, así como el largo y ancho de las piezas. Es indispensable que cada pieza sea claramente identificable y medible en los planos, los cuales servirán como guía para la fabricación y el ensamblaje físico del exoesqueleto.

El ensamblaje se realizó con los planos generados de la silla exoesquelética tipo ortesis pasiva, es así como el procedimiento inicia mediante la preparación del acero inoxidable AISI 304, adquirido en tubería rectangular de 6 m con un espesor de 1 mm. Las medidas antropométricas de la paciente establecen los parámetros dimensionales para las piezas de la estructura sólida de acero. Además, se empleó una tubería circular para el émbolo, la cual se unió mediante soldadura. Esta configuración en la parte inferior del ensamblaje proporciona robustez y estabilidad al soportar las cargas y servir como base de apoyo para el centro de gravedad de la paciente geriátrica, minimizando así cualquier riesgo de deslizamiento [19].

Para la parte superior de la silla, las piezas como el émbolo y las sujeciones, se imprimieron en filamento ABS. Este material fue seleccionado por sus propiedades mecánicas y su resistencia, adecuadas para soportar el peso de la paciente. El proceso de impresión se realizó a una temperatura de 230°C,

óptima para la impresora 3D LulzBot. Fue necesario considerar un incremento de 1 mm en los planos de impresión para garantizar un ajuste preciso de las piezas mediante presión, empleando topes y uniones. Además, se utilizó un adhesivo de dos componentes como medida de seguridad adicional para evitar posibles rupturas o desprendimientos en la estructura de ABS.

Una vez ensambladas estas piezas, se obtuvo una estructura compuesta por las partes superior e inferior (ver Figura 5). Se añadió un soporte para el pie con revestimiento de caucho antideslizante con el fin de prevenir deslizamientos en el piso. Una vez finalizada la estructura robusta se incorporaron componentes textiles, incluyendo agarraderas tipo arnés para asegurar la parte superior de la paciente y se utilizó velcro en las áreas de las piernas, cadera y pies para permitir un ajuste personalizado para una estructura más segura y estable.



Figura 5. Ensamblaje de la silla exoesquelética

2.3. Análisis de la marcha

Dentro del análisis de la marcha se evaluó a la paciente mediante la filmación de un ciclo de la marcha completo sin el uso de la silla exoesquelética y con el uso de la misma. Mediante el uso del software Kinovea, se obtuvo la variación del ángulo de la rodilla en la marcha de la paciente, debido a que es la articulación presentada en el exoesqueleto. Esta información se compara en dos etapas donde se usa el dispositivo y donde se da una marcha libre sin la silla exoesquelética. Estos valores permiten realizar el análisis para verificar si existe una variación en la comodidad e independencia de la persona que pueden presentarse de acuerdo a como se indica en la referencia [20].

El análisis de la marcha fue dividido en cinco secciones que permiten verificar la variación de los ángulos para dos casos: sin el uso de la silla y con el uso de la

misma.

Las cinco secciones a las que se hace referencia corresponden a las fases de la marcha que se detallan a continuación:

- Primera fase (Fase de apoyo)
- Segunda fase (Despliegue del talón)
- Tercera fase (Fase de oscilación)
- Cuarta fase (Apoyo de talón)
- Quinta fase (Apoyo plantar)

3. Resultados

3.1. Desempeño de la silla exoesquelética

El desempeño de la silla exoesquelética depende directamente de su capacidad para soportar cargas y brindar estabilidad. El diseño prescinde de elementos eléctricos y electrónicos debido que la movilidad y soporte proporcionados se logran exclusivamente mediante principios mecánicos y materiales adecuados que se adaptan al movimiento de los miembros inferiores. Para ello, se utilizan ajustes que mantienen fija la posición de tal forma que se sujeta la parte inferior mediante correas, y en el caso de la cintura y muslos se utiliza velcro para una sujeción fija de la estructura al cuerpo de la paciente.

A través de un diseño preciso (los planos se pueden encontrar adjuntos a este documento), se desarrolló un modelo adaptado a las medidas antropométricas de la paciente, lo que permitió realizar una proyección 3D. Esta proyección facilitó la visualización de posibles mejoras y ajustes previos a la fabricación física de la silla, es así como se obtiene una estructura óptima para su posterior implementación.

3.1.1. Análisis de Elementos finitos

Este análisis proporcionó resultados como: esfuerzo de Von Mises de 277.6 MPa (ver Figura 6), un desplazamiento de 37.20 mm (ver Figura 7) y una deformación elástica de 0.025 mm/mm (2.5) (ver Figura 8). Los valores obtenidos fueron consistentes en los miembros inferiores, es decir se repite el mismo procedimiento para ambos lados debido a que es una estructura unificada. Además los resultados se encuentran dentro los límites de los materiales, garantizando la funcionalidad de la estructura.

Finalmente, los resultados obtenidos en el análisis de deformación unitaria mostraron que la mayor deformación se concentraba en la sujeción fija del caucho antideslizante en la parte inferior y final del diseño,

atribuible a las características del material de caucho, que tiende a flexionarse y deformarse bajo carga.

Este proceso de análisis por elementos finitos proporcionó información que permitirá ajustar y mejorar el diseño de la silla además de asegurar su funcionalidad y la comodidad de la paciente durante su uso.

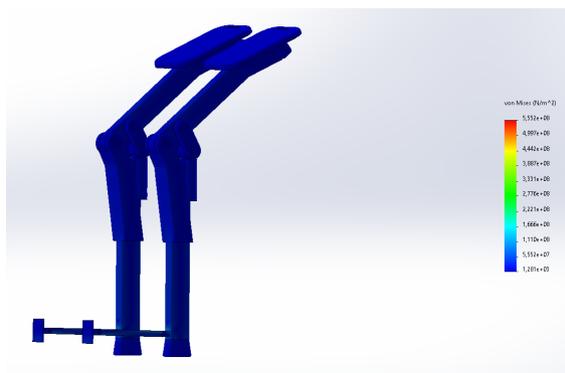


Figura 6. Comportamiento de la tensión equivalente (Von Mises)

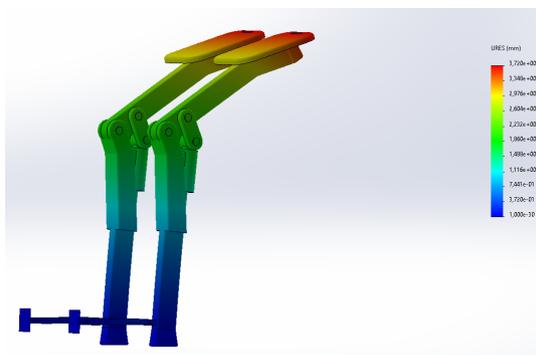


Figura 7. Comportamiento del desplazamiento estático

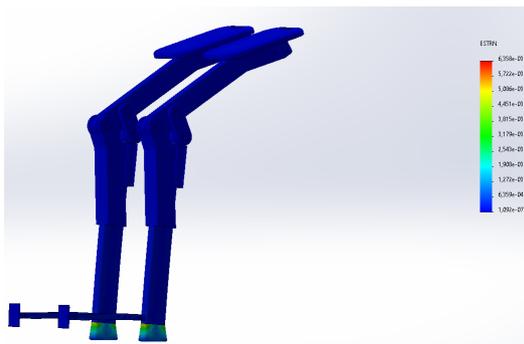


Figura 8. Comportamiento de la deformación elástica

3.1.2. Pruebas de funcionamiento

Con el diseño implementado, se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento de ensamblado y de

confortabilidad. En la prueba de ensamblado se verificó que las piezas que componen la estructura de la silla exoesquelética estén correctamente sujetadas, evitando así posibles daños al paciente. Este permite prevenir cualquier desequilibrio que pueda provocar lesiones o heridas. Para ello, se realizaron dos pruebas con la silla exoesquelética en días distintos donde la paciente procedió a familiarizarse con la silla, de este modo se le solicitó que se siente y se levante con el dispositivo sujetado a su cuerpo en la parte superior e inferior. La segunda prueba consta del análisis de confortabilidad en donde se analiza el comportamiento del dispositivo pasivo en situaciones de cotidianidad. Para esto, se colocó el dispositivo a la paciente y se le pidió que camine, con el objetivo de evaluar posibles incomodidades o piezas que puedan estar en contacto con la paciente, evitando así cualquier riesgo de herirse.

A través de las pruebas realizadas, se observó que la paciente puede sentarse y caminar con la silla exoesquelética. Sin embargo, se identificó cierta incomodidad en su uso debido que la silla es un exoesqueleto, es decir, una estructura externa al cuerpo. Por lo tanto, es necesario un periodo de uso regular para que la paciente se acostumbre al funcionamiento de la silla exoesquelética. Con el tiempo, se espera que la paciente pueda utilizar la silla como una extensión de su cuerpo, facilitando sus actividades diarias sin mayor dificultad como se muestra en la figura 9. Por otro lado, la silla exoesquelética proporciona un apoyo seguro cuando la persona está de pie, y permite la movilidad del paciente al sentarse, flexionar las piernas y arrodillarse.



Figura 9. Pruebas de funcionamiento

3.1.3. Análisis de marcha

Los resultados del análisis de la marcha se observa en las figuras 10 y 11, mientras que los valores exactos de los ángulos se indican en las tablas 1) y 2).

Paciente sin silla	Ángulos
Primera fase	14°
Segunda fase	15°
Tercera fase	22,9°
Cuarta fase	11,6°
Quinta fase	14,3°

Tabla 1. Variación del ángulo de la rodilla sin silla

Cinemática angular de la rodilla

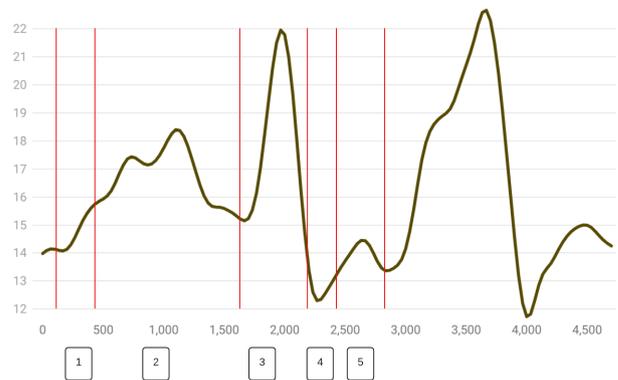


Figura 10. Marcha sin silla exoesquelética

Paciente con silla	Ángulos
Primera fase	15,3°
Segunda fase	14,3°
Tercera fase	22,2°
Cuarta fase	11,5°
Quinta fase	12,1°

Tabla 2. Variación del ángulo de la rodilla con silla

Cinemática angular de la rodilla

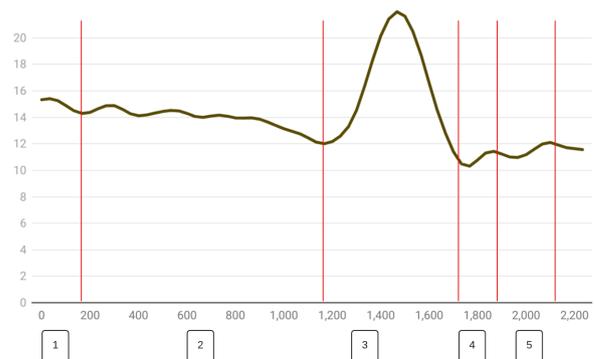


Figura 11. Marcha con silla exoesquelítica

En los pacientes geriátricos que padecen de artrosis degenerativa la marcha se ve significativamente afectada por causa del dolor y la rigidez en sus articulaciones. Esto resulta en una flexión de rodilla donde

se limita de 20 a 30 grados. La flexión y extensión de la cadera y el tobillo de similar manera se reducen, de forma que la cadera alcanza solo de 20 a 30 grados de flexión y 5 a 10 grados de extensión [21]. Como resultado la marcha es más lenta, con pasos cortos y una cadencia menor. Por este motivo, los pacientes geriátricos utilizan apoyos (bastones y andadores) para reducir el dolor y mejorar la estabilidad durante el ciclo de la marcha.

En base a los resultados obtenidos, se identifica que la marcha del paciente se vio restringida por el dolor en la rodilla, resultando en un ligero arrastre del pie al caminar. Al repetir el análisis con la silla exoesquelética, se observaron variaciones en las fases de la marcha (Ver Tabla 1 y 2) Esto se debe a que el paciente requiere tiempo para adaptarse a la silla y determinar si su uso sigue afectando la marcha o si, con el uso continuo, la marcha vuelve a los parámetros normales (Ver Tabla 1)

De esta forma, se observó una variación en los ángulos de la marcha con el uso de la silla exoesquelética. Estas variaciones pueden atribuirse a la necesidad de tiempo para que el paciente se adapte a la silla. A largo plazo, se espera que la marcha se normalice y los parámetros de los ángulos de la rodilla se estabilicen. Estos resultados subrayan la importancia de un período de adaptación y un seguimiento continuo para evaluar la efectividad a largo plazo de la silla exoesquelética.



Figura 12. Marcha con silla exoesquelítica

4. Conclusiones y trabajos futuros

La artrosis degenerativa causa deterioro en las articulaciones y provoca pérdida de autonomía e independencia, en este caso en particular las articulaciones de las rodillas de la paciente de 89 años del asilo Betania se han afectado por esta patología, para lo cual la silla exoesquelética fabricada cumple con los requerimien-

tos mecánicos que estas articulaciones desempeñan en el ciclo de la marcha y en la posición de sedestación, tales como: facilitar un movimiento controlado durante la marcha y permitir movilidad al sentarse y flexionar las piernas. Además, mediante un análisis de modelo estático por elementos finitos se obtuvo la fuerza, deformidad y desplazamientos de la estructura permitiendo visualizar la integridad del ensamblaje que soporta cargas mayores a 490 N.

La silla exoesquelética centra su diseño en la ergonomía de la paciente mediante el uso de medidas antropométricas tomadas antes de su diseño y fabricación física. Mediante la proyección 3D y un análisis de elementos finitos realizados previa a la construcción de la estructura, se obtiene un dispositivo óptimo, seguro y fácil de utilizar para la paciente. Asimismo, una de las ventajas de esta silla exoesquelética es el uso de materiales que por sus dimensiones y composición, alcanzan un peso máximo de 0.92 kg que no representa incomodidad para la paciente durante su uso prolongado.

Al obtener los parámetros de ángulos y medidas de la zancada durante el análisis de la marcha, se determina que la paciente geriátrica del asilo Betania presenta una patología en su marcha en conjunto de dolor y rigidez en sus articulaciones de los miembros inferiores por la reducción de sus grados de flexión y extensión. Sin embargo, al realizar las mismas pruebas con el uso de la silla exoesquelética se observaron variaciones en las fases de la marcha por lo que la paciente requiere tiempo para adaptarse al dispositivo y de esta forma determinar si su uso continuo aporta al mejoramiento de su ciclo de zancada y reducción del desgaste articular.

Como trabajo futuro, se propone realizar análisis posteriores al uso continuo de la silla exoesquelética, y así verificar su mejoramiento en el ciclo de la marcha de la paciente. Por otra parte, se plantea la utilización de un sistema adaptable que permita modificar la silla de manera regulable y mejorar su adaptabilidad a varios pacientes. De igual forma, se propone el uso de un pistón hidráulico o neumático el cual permita un descenso controlado del dispositivo.

Referencias

- [1] D. Del, R. H. Vásquez, . Erick, R. P. Ocaña, . Karen, P. Ocaña, E. Renán, and K. P. Ocaña, "Prevención de enfermedades crónicas degenerativas en adultos mayores: Una mirada desde la experiencia de vinculación con la sociedad. 1 para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato," 2019. [Online]. Available: <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/12/prevencion-enfermedades-cronicas.html>

- [2] G. R. G. Menéndez, W. I. L. Mendoza, A. M. C. Toro, M. P. A. Acurio, O. S. N. Arroyo, and C. R. M. Fischer, “Ejercicios físicos terapéuticos para la rehabilitación de artrosis degenerativa en adultos mayores. una revisión teórica,” *Lecturas: Educación Física y Deportes*, vol. 28, 2023.
- [3] M. Musso, A. S. Oliveira, and S. Bai, “Influence of an upper limb exoskeleton on muscle activity during various construction and manufacturing tasks,” *Applied Ergonomics*, vol. 114, p. 104158, 1 2024.
- [4] C. Dhanavade, I. Dalvi, R. Gupta, and R. Barge, “Chairless chair,” *International journal of advance scientific research and engineering trends*, pp. 1–3, 2021.
- [5] I. Kouki, A. Courties, and J. Sellam, “Artrosis de la rodilla,” *EMC - Tratado de Medicina*, vol. 26, no. 4, pp. 1–7, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1636541022471777>
- [6] L. N. Romero, “Abstract utilization of a lower limb exoskeleton vs. conventional physical therapy in order to improve functional mobility in patients with spinal cord injury (sci): A meta analysis,” 2023.
- [7] U. R. Chae, K. Kim, J. Choi, D. J. Hyun, J. Yun, G. H. Lee, Y. G. Hyun, J. Lee, and M. Chung, “Systematic usability evaluation on two harnesses for a wearable chairless exoskeleton,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 84, p. 103162, 7 2021.
- [8] S. Dooley, S. Kim, M. A. Nussbaum, and M. L. Madigan, “A passive leg-support exoskeleton adversely affects reactive balance after simulated slips and trips on a treadmill,” *Journal of Biomechanics*, vol. 151, p. 111533, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929023001021>
- [9] Y. yi Li and J. Gan, “Effect of wearable chair on gait, balance, and discomfort of new users during level walking with anterior loads,” *Journal of Safety Research*, vol. 87, pp. 27–37, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022437523001159>
- [10] U. R. Chae, K. Kim, J. Choi, D. J. Hyun, J. Yun, G. H. Lee, Y. G. Hyun, J. Lee, and M. Chung, “Systematic usability evaluation on two harnesses for a wearable chairless exoskeleton,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 84, p. 103162, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169814121000809>
- [11] S. Sunil, R. Kapoor, and J. B. Singh, “Reversion of strain induced martensite to achieve high strength and ductility in aisi 304 l,” *Materials Characterization*, vol. 205, 11 2023.
- [12] Z. Yan, B. Han, Z. Du, T. Huang, O. Bai, and A. Peng, “Development and testing of a wearable passive lower-limb support exoskeleton to support industrial workers,” *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 41, no. 1, pp. 221–238, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0208521621000012>
- [13] A. Raizer, E. P. Elias, J. V. da Silva, M. V. F. da Luz, V. L. Coelho, V. M. A. Raupp, and M. Telló, “A comparative analysis of grounding in different structures: Operational vs. finite element method models,” *Electric Power Systems Research*, vol. 230, p. 110243, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779624001317>
- [14] T. Luger, T. J. Cobb, R. Seibt, M. A. Rieger, and B. Steinhilber, “Subjective evaluation of a passive lower-limb industrial exoskeleton used during simulated assembly,” *IIEE TRANSACTIONS ON OCCUPATIONAL ERGONOMICS & HUMAN FACTORS*, vol. 7, no. 3-4, SI, pp. 175–184, OCT 2 2019.
- [15] E. D. Padilla and E. D. Padilla, “Aplicaciones de los aceros inoxidable,” *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, vol. 2, pp. 11–22, 7 1999. [Online]. Available: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/2114>
- [16] N. S. Aldeguer, “Desarrollo de modelos biomecánicos de la rodilla mediante método de elementos finitos,” 10 2020. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/151820>
- [17] R. Larrainzar-Garijo, J. R. Caeiro, M. Marco, E. Giner, and M. H. Miguélez, “Experimental validation of finite elements model in hip fracture and its clinical applicability,” *Revista Espanola de Cirugia Ortopedica y Traumatologia*, vol. 63, pp. 146–154, 3 2019.
- [18] R. A. G. León, B. A. Isidro, and W. Q. Quintero, “Diseño de una máquina de termoconformados para la fabricación de filamento abs y pla,” *Informador técnico, ISSN 0122-056X, ISSN-e 2256-5035, Vol. 85, N.º. 1, 2021, págs. 34-51*, vol. 85, pp. 34–51, 2021. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7868817&info=resumen&idioma=ENG%20>

- [19] J. A. Neto, V. Azevedo, S. De Lucca, and M. Bandini, “Use of exoskeleton at work – what the current literature says about it ?” *Safety and Health at Work*, vol. 13, p. S151, 2022, abstracts of the 33rd International Congress on Occupational Health 2022 (ICOH 2022) 6–10 February 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2093791121013226>
- [20] T. Langlais and P. Mary, “Alteraciones de la marcha,” *EMC - Pediatría*, vol. 58, no. 2, pp. 1–9, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1245178923477116>
- [21] J. Perry and J. M. Burnfield, “Pathological gait,” in *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*, 2nd ed. Thorofare, NJ: Slack Incorporated, 2024, ch. 5, pp. 145–205.