



*Diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto con movimiento mecánico para la rehabilitación de la muñeca en personas adultas*

*Design and construction of a moving exoskeleton prototype mechanic for wrist rehabilitation in adults*

*Projeto e construção de um protótipo de um exoesqueleto móvel mecânico para reabilitação do punho em adultos*

Edwin Rodolfo Pozo <sup>I</sup>

[edwin.pozo@epoch.edu.ec](mailto:edwin.pozo@epoch.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-8931-3577>

Geovanny Guillermo Novillo <sup>II</sup>

[gnovillo@epoch.edu.ec](mailto:gnovillo@epoch.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-7761-5359>

Sócrates Miguel Aquino <sup>III</sup>

[saquino@epoch.edu.ec](mailto:saquino@epoch.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-6393-9408>

Javier Eduardo Guerrero <sup>IV</sup>

[javierguerreroj@gmail.com](mailto:javierguerreroj@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0001-0383-9819>

**Correspondencia:** [edwin.pozo@epoch.edu.ec](mailto:edwin.pozo@epoch.edu.ec)

Ciencias de la Salud  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 21 de mayo de 2024 \* **Aceptado:** 17 de junio de 2024 \* **Publicado:** 05 de julio de 2024

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- IV. Investigador Independiente, Ecuador.

## Resumen

Se desarrolló un prototipo automático de exoesqueleto para la rehabilitación de la muñeca en adultos, utilizando medidas antropométricas y software Adams View para el diseño, analizando la cinemática y dinámica de los movimientos de rehabilitación. Se validó la resistencia estructural estática y dinámica mediante simulación computacional con software CAE, evaluando deformaciones, esfuerzos y factores de seguridad. Las pruebas demostraron que el prototipo puede ejecutar movimientos precisos y seguros, con un error aceptable del 1.8%. Además, se validó su funcionamiento en personas adultas a través de pruebas con un especialista en fisioterapia, cumpliendo con diversos movimientos de la muñeca.

**Palabras clave:** Diseño Mecánico; Rehabilitador De Muñeca; Análisis Cinemático; Análisis Computacional; Medidas Antropométricas, Análisis Dinámico; Análisis Estático.

## Abstract

An automatic exoskeleton prototype was developed for wrist rehabilitation in adults, using anthropometric measurements and Adams View software for the design, analyzing the kinematics and dynamics of the rehabilitation movements. The static and dynamic structural resistance was validated through computational simulation with CAE software, evaluating deformations, stresses and safety factors. Tests showed that the prototype can execute precise and safe movements, with an acceptable error of 1.8%. In addition, its operation was validated in adults through tests with a physiotherapy specialist, complying with various wrist movements.

**Keywords:** Mechanical Design; Wrist Rehabilitator; Kinematic Analysis; Computational Analysis; Anthropometric Measurements, Dynamic Analysis; Static Analysis.

## Resumo

Foi desenvolvido um protótipo de exoesqueleto automático para a reabilitação do punho em adultos, utilizando medidas antropométricas e o software Adams View para o design, analisando a cinemática e dinâmica dos movimentos de reabilitação. A resistência estrutural estática e dinâmica foi validada através de simulação computacional com o software CAE, avaliando deformações, tensões e fatores de segurança. Os testes mostraram que o protótipo consegue executar movimentos precisos e seguros, com um erro aceitável de 1,8%. Além disso, o seu funcionamento foi validado

em adultos através de testes com um especialista em fisioterapia, obedecendo a vários movimentos do punho.

**Palavras-chave:** Projeto Mecânico; Reabilitador de Pulso; Análise Cinemática; Análise Computacional; Medidas Antropométricas, Análise Dinâmica; Análise Estática.

## Introducción

La investigación aborda el diseño de un prototipo orientado a la recuperación física de la muñeca tras una fractura, empleando un sistema mecánico de exoesqueleto como una alternativa más eficiente y rápida en el ámbito de la terapia física. En la situación actual en Ecuador, este tipo de rehabilitación no se encuentra disponible en los centros de rehabilitación públicos debido a la falta de recursos y actualización. Los centros privados que ofrecen esta rehabilitación tienen costos elevados, excluyendo a personas de recursos económicos medios y bajos y resultando en demoras en el proceso de recuperación y posible incapacidad parcial o total de la parte afectada.

En el proceso de desarrollo del prototipo, se busca generar movimientos a través de un análisis detallado de posición, velocidad, aceleración y fuerza. Este análisis proporciona los torques necesarios para la selección adecuada de los motores que se utilizarán en la construcción del prototipo, contribuyendo así a generar los movimientos necesarios para la rehabilitación.

La carencia de un prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva para simular movimientos mecánicos en la rehabilitación de muñecas en adultos es el foco de este trabajo. Al concluir el estudio, se espera obtener un prototipo capaz de reproducir de manera más precisa los movimientos realizados durante la rehabilitación de la muñeca. Tras la realización del proyecto y su implementación en centros de rehabilitación locales a largo plazo, el objetivo es beneficiar a pacientes de recursos económicos limitados que necesiten rehabilitación, ofreciendo una variedad de terapias adaptadas a las lesiones específicas del paciente. Esto facilitará una reincorporación más rápida a las actividades diarias y mejorará la calidad de vida. La investigación busca contribuir al desarrollo tecnológico en el ámbito de la biomecánica a nivel local, creando una máquina con diseño y fabricación ecuatorianos.

## Materiales y métodos

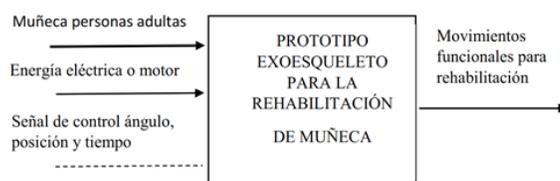
### Metodología de diseño

#### Análisis funcional

El análisis funcional se refiere a innovar a productos ya existentes, con nuevas soluciones, mejorando el producto con altos estándares de calidad a un costo más bajo.

Mediante el análisis funcional el cliente identifica él por qué adquiere el producto, así como establecer las funciones primarias para el correcto funcionamiento del equipo (Pulloquina et al., 2018).

**Figura 1:** Diagrama función primaria del prototipo exoesqueleto



#### Selección del mecanismo para el prototipo exoesqueleto

La meta principal del exoesqueleto prototipo es ejecutar los movimientos de rehabilitación utilizando tres servomotores, los cuales desempeñarán la función de replicar los movimientos de flexión, extensión, pronación, supinación, aducción y abducción. Para cada función del módulo, es esencial proponer diversas alternativas con el fin de elegir la opción más apropiada.

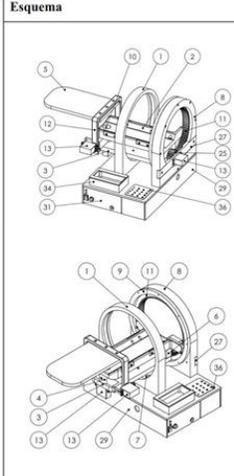
Un rehabilitador de muñeca seleccionado que permita realizar todos los movimientos requeridos para la rehabilitación y que cumpla con el requerimiento del especialista.

**Tabla 1:** Selección más adecuada del prototipo rehabilitador

CARACTERÍSTICA			
Movimiento Flexión -- Extensión	✓	✓	✓
Movimiento de Aducción -- Abducción	✓	✓	✓
Movimiento de Pronación -- Supinación			
SopORTE Fijo		✓	✓
Antropometría Humana	✓	✓	✓
Bajo error en movimiento	✓	✓	✓
Componentes Iguales		✓	✓
Total	4	6	6

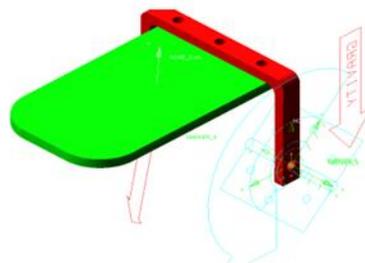
## Características del prototipo rehabilitador de muñeca seleccionado

Evaluadas las alternativas propuestas con sus diferentes criterios, se selecciona la más adecuada, los requerimientos son traducidos a criterios técnicos lo cual ayuda a tener un diseño del equipo. Se seleccionó un prototipo que permita la rehabilitación de la muñeca, mediante funcionamiento en base a mecanismos y que cumplan con movimientos para realizar la rehabilitación.

Esquema	Nombre
	1. Riel de movimiento
	2. Placa soporte de antebrazo
	3. Placa de Unión
	4. Placa de Abducción - aducción
	5. Placa soporte de mano
	6. Soporte de Placas
	7. Guia de movimiento
	8. Soporte engranaje planetario
	9. Guia de fijación de engranaje planetario
	10. Eje de Motor movimiento de abducción - aducción
	11. Engranaje Planetario
	12. Soporte U
	13. Servomotor
	25. Piñón
	27. Soporte motor posterior
	29. Base
31. Botonera	
34. Pantalla LCD	
36. Teclado	

## Diseño de elementos para el movimiento de flexión-extensión

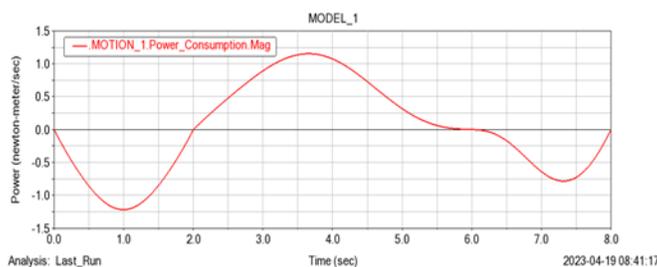
Con el uso del Software SolidWorks se modela los elementos que intervendrán en el movimiento de la rehabilitación, para exportar al software Adams View.



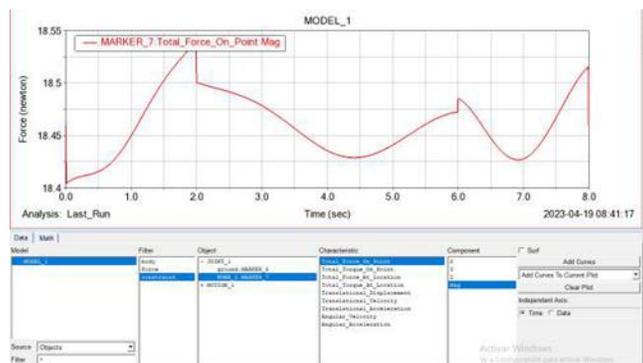
*Figura 12-3: Unión de elementos y ubicación de fuerzas en Adams View*

En los resultados se requiere conocer la potencia y la fuerza resultante necesaria para que el mecanismo cumpla con el movimiento requerido para la rehabilitación, mediante Adams View se obtiene los datos.

**Figura 3:** Potencia máxima requerida para flexión - extensión de rehabilitación en Adams View



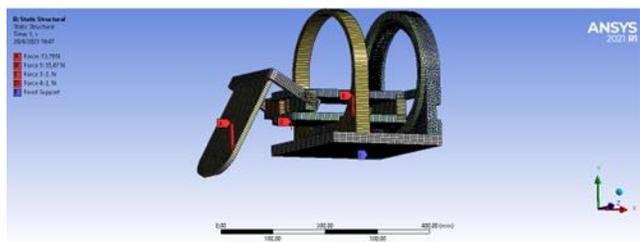
**Figura 4:** Fuerza resultante del eje para flexión - extensión de rehabilitación en Adams View



### Diseño estático de elementos mediante simulación computacional

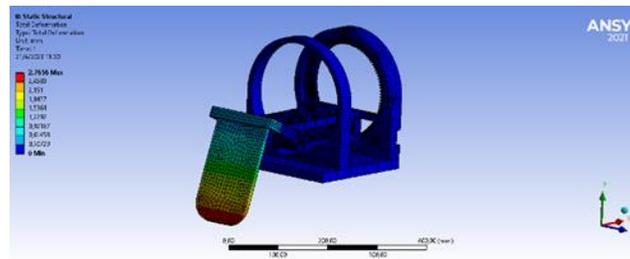
En Static Structural de Ansys se procede a realizar el mallado de todos los elementos y colocar las fuerzas que actúan sobre el prototipo como peso de la mano, peso de antebrazo y peso de motores.

**Figura 5:** Mallado y fuerzas en prototipo a 60° Ansys



Resolviendo en Static Structural se puede encontrar la deformación total cuando se aplican todas las fuerzas y el factor de seguridad en todo el prototipo.

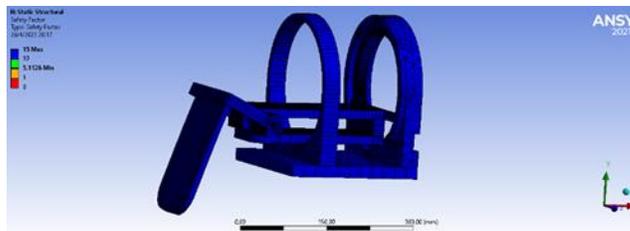
*Figura 6: Deformación máxima en prototipo a 60° Ansys*



## Diseño dinámico de elementos mediante simulación computacional

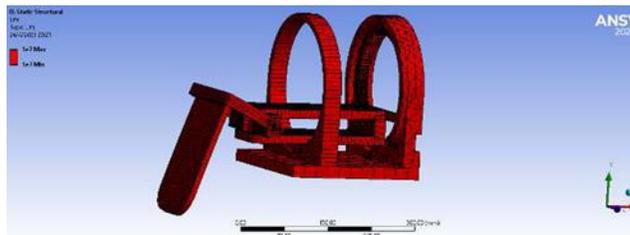
Aplicando la teoría de Soderberg mediante Workbench Static Structural se procede a calcular el factor de seguridad para cargas dinámicas obteniendo un factor de seguridad  $n = 5.1$  como se aprecia en la figura.

*Figura 7: Diseño de prototipo caso dinámico a 60°*



Mediante el análisis de vida se tiene que los elementos están diseñados para una vida infinita.

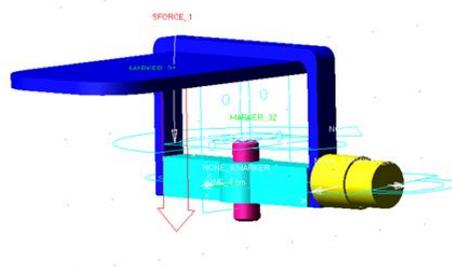
*Figura 8: Factor de seguridad dinámico en prototipo a 60°*



## Diseño de elementos para el movimiento de abducción – aducción

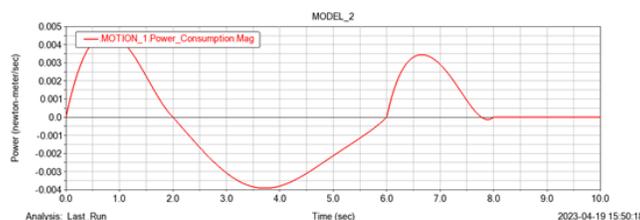
Con el uso de SolidWorks se modela los elementos que intervendrán en el movimiento de la rehabilitación, para exportar al software Adams View.

**Figura 9:** Uniones de elementos, fuerzas y motores en Adams View



En los resultados se requiere conocer la potencia y la fuerza resultante necesaria para que el mecanismo cumpla con el movimiento requerido para la rehabilitación, mediante el software Adams View se obtiene los datos.

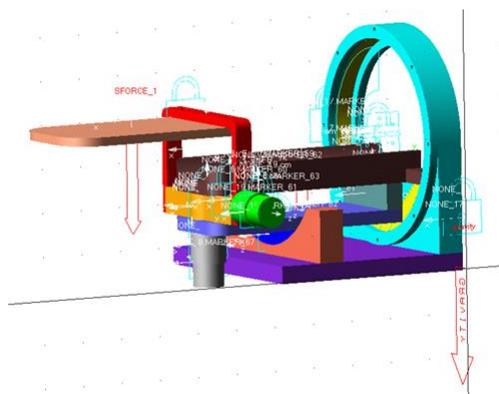
**Figura 10:** Potencia máxima requerida para aducción - abducción de rehabilitación en Adams View



### Diseño de elementos para el movimiento de pronación – supinación

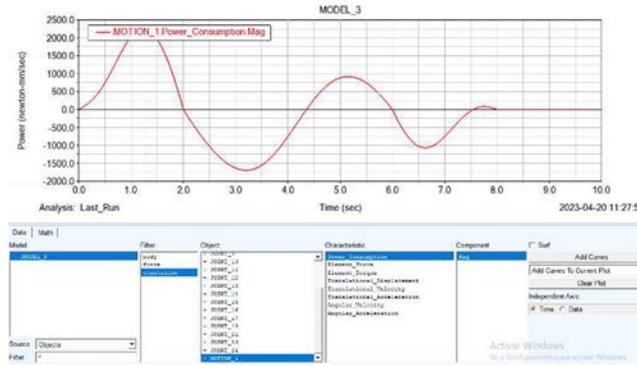
Con el uso de SolidWorks se modela los elementos que intervendrán en el movimiento de la rehabilitación, para exportar al software Adams View.

**Figura 11.** Uniones de elementos, fuerzas y motores en Adams View



En los resultados se requiere conocer la potencia y la fuerza resultante necesaria para que el mecanismo cumpla con el movimiento requerido para la rehabilitación, mediante Adams View se obtiene los datos.

**Tabla 2:** Comparación de factores de seguridad carga estática y dinámica



Elemento	Movimiento Flexión – Extensión 60°		Movimiento Abducción – Aducción 0°		Movimiento Pronación – Supinación 30°	
	n estático	n dinámico	n estático	n dinámico	n estático	n dinámico
Riel de movimiento	15	15	15	15	15	15
Placa soporte de antebrazo	15	15	15	15	15	15
Placa de Unión	15	15	15	15	15	15
Placa de abducción aducción	15	15	15	15	15	15
Placa soporte de mano	15	15	15	13,3	15	12,9
Soporte de Placas	15	15	15	15	15	15
Guía de movimiento	15	15	15	15	15	15
Soporte U	15	15	15	11,2	15	10,4

## Resultado y discusión

### Resultados

Durante las pruebas de funcionamiento del prototipo se verificaron que los ángulos estén dentro del rango de movilidad para cada uno de los movimientos.

**Figura 12:** Prototipo exoesqueleto rehabilitador de muñeca



## Plan de pruebas

En el proceso de diseño y construcción se realizaron pruebas de todo el mecanismo en dos fases.

- Prueba de funcionalidad es la verificación que los elementos cumplan con los movimientos correctos y se obtengan los resultados deseados.
- Prueba resistencia es evaluar el comportamiento de cada componente del mecanismo en casos extremos.

## Pruebas en vacío

Pruebas que se realizan para comprobar y verificar el funcionamiento del prototipo exoesqueleto sin aplicar cargas durante un periodo determinado sin presentar ningún inconveniente.

Con la prueba en vacío se calcula la potencia mínima que necesita el exoesqueleto para su funcionamiento en cada uno de los movimientos.

**Tabla 3: Potencia de servomotores sin carga**

Tipo de prueba	Motor 1		Motor 2		Motor 3	
	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)
Arranque sin carga	0.09	5	0.09	5	0.09	5
Potencia	0.45		0.45		0.45	

En la tabla se puede observar las pruebas realizadas al prototipo automático exoesqueleto sin carga, midiendo los diferentes ángulos máximos para cada una de los tipos de rehabilitación tanto para la mano derecha como la mano izquierda. Para medir el ángulo de cada movimiento se utilizará un goniómetro.

**Tabla 4: Prueba de prototipo exoesqueleto sin carga**

Movimiento	PRUEBA SIN CARGA					
	Mano Izquierda			Mano Derecha		
	Ángulo prototipo	Ángulo medido Goniómetro	% Error	Ángulo Prototipo	Ángulo medido Goniómetro	% Error
Flexión	50	49.5	1	50	49.5	1
Extensión	35	34.5	1.43	35	34	1.43
Aducción	25	25	0	25	25	0
Abducción	30	29.5	1.66	30	29.5	1.66
Pronación	90	89	1.11	90	89	1.11
Supinación	60	59	1.66	60	59.5	0.83
	Promedio		1.14	Promedio		1

Pruebas que se realizan para comprobar y verificar el funcionamiento del prototipo exoesqueleto aplicando cargas durante un periodo determinado sin presentar ningún inconveniente.

En la tabla se puede observar las pruebas realizadas al prototipo automático exoesqueleto con carga, midiendo los diferentes ángulos para cada una de los tipos de rehabilitación tanto para la mano derecha como la mano izquierda. Para medir el ángulo de cada movimiento se utilizaró un goniómetro.

**Tabla 5:** Prueba de prototipo exoesqueleto con carga

PRUEBA CON CARGA						
Movimiento	Mano Izquierda			Mano Derecha		
	Ángulo prototipo	Ángulo medido Goniómetro	% Error	Ángulo Prototipo	Ángulo medido Goniómetro	% Error
Flexión	50	49	2	50	48.5	3
Extensión	35	35	0	35	35	0
Aducción	25	24	4	25	24.5	2
Abducción	30	29.5	1.6	30	29	3.3
Pronación	90	89	1.1	90	89	1.1
Supinación	60	59	1.6	60	58.5	2.5
	Promedio		1.71	Promedio		1.9

## Conclusiones

- El análisis cinemático y dinámico de los movimientos generados por el exoesqueleto prototipo en la rehabilitación de la muñeca se llevó a cabo mediante software computacional. Esto facilitó la elección de los servomotores DS3220 PRO 30KG, que presentan un torque par de bloqueo de 39.5 kg/cm, asegurando el desarrollo de los movimientos sin contratiempos.
- La simulación computacional con software CAE no solo permitió validar la resistencia estructural, con factores de seguridad de 15 en el caso estático y 10.4 en el caso dinámico, sino que también posibilitó la verificación de los movimientos antes de la fase de construcción.
- Se llevó a cabo la validación del funcionamiento del prototipo exoesqueleto con la participación de una especialista en fisioterapia, quien verificó cada uno de los movimientos. Según las pruebas realizadas, se determinó que el prototipo es capaz de generar movimientos como flexión, extensión, aducción, abducción, pronación y supinación, contribuyendo así a la rehabilitación de la muñeca en pacientes.

## Referencias

1. Barrera, Daniela Verónica Lema. 2013. Comparación estadística de medidas antropométricas entre mestizos, indígenas y afro ecuatorianos de la Región Sierra del Ecuador . Quito :
2. UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO , 2013.
3. Cárdenas, Pablo César Ávila. 2018. DESARROLLO DE UN PROTOTIPO AUTOMÁTICO PARA
4. REHABILITACIÓN DE MUÑECAS CON 2 GRADOS DE LIBERTAD. Cuenca : UNIVERSIDAD
5. POLITÉCNICA SALESIANA, 2018.
6. Cardoso, Julio Tovar. 2020. Física Mecánica. [En línea] 2020. <https://juliotovar.wixsite.com/fismec/movimiento-mecanico>.
7. Castañeda, José Santiago Bohórquez. 2020. Simulación de análisis dinámicos de membranas electrohiladas de ácido poliláctico (PLA) con grafeno. Tunja, Colombia : Universidad Antonio Nariño, 2020.
8. Champi, Luis Enrique Huanca. 2020. DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MANO PARA LA AUTO-
9. TERAPIA ASISTIDA EN BASE A UN PATRÓN DE MOVIMIENTO. Lima : PUCP, 2020.
10. CLAUSER, CHARLES E. 1969. WEIGHT, VOLUME, AND CENTER OF MASS OF SEGMENTS OF THE
11. HUMAN BODY. Ohio : PATTERSON AIR FORCE BASE, 1969.
12. Pulloquina, J. L., Aquino, S. M., Pozo, E. R., Cruz, P. J., & Zambrano, O. I. (2018). Dynamic model of a parallel robot type 3UPS+ 1RPU for knee rehabilitation. 2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA), 1–6.
13. Diseño de un Dispositivo de Rehabilitación para la Articulación de Muñeca desde el Enfoque de
14. la Ingeniería Concurrente. Morales, Edgar Ceballos. 2017. 2017, HAL open science, págs. 78-103.
15. Diseño de un rehabilitador para muñeca. Toapanta, Gissela. 2017. 2017, Memorias del I

16. Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación, págs. 263274.
17. Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. Alejandro, Cardona Chávez Manuel. 2020. 2020, Revista Ingeniería Biomedica, págs. 63-73.
18. G. Mosquera, G. Toapanta. 2019. Dispositivo mecatrónico . Ibarra : Universidad Técnica del Norte, 2019.
19. Kutuk, M. Erkan. 2019. An Exoeskeleton Design Robotic Assisted Rehabilitation: Wrist & Forearm. Canada : Springer Nature Switzerland, 2019. Mendez, Deira Sosa. 2017. DESARROLLO DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DEL HOMBRO. México : Universidad Tecnológica de la MIXTECA, 2017.
22. Norton, Robert. 2013. Diseño de Maquinaria Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. México : McGRAW-HILL, 2013

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).