

DISPOSITIVO BIOMÉDICO DESTINADO A LA REHABILITACIÓN DE TOBILLO POR MEDIO DE MOVIMIENTO PASIVO

¹Cerón Gutiérrez Adriana Carolina, ¹Gallegos González Sayra Anahí, ¹Moreno Gómez Diana Laura, ^{1,2}Marroquín Gutiérrez Francisco, ³García Murillo Mario A.

1. Universidad Politécnica de Pachuca: Programa Educativo de Biomédica.
2. Cuerpo Académico: Sistemas Mecatrónicos Inteligentes.
3. Instituto Tecnológico de Celaya: Departamento de Ingeniería Mecánica.

RESUMEN

Analizar, desarrollar, además de involucrar múltiples disciplinas, nos llevó a desplegar un prototipo con posibilidades de aplicación en campo de la Ortopedia, particularmente, la rehabilitación de tobillo, esta es una de las articulaciones de frecuente lesión. Para esto, hemos considerado los tipos de movimientos naturales del tobillo, el propósito es proporcionar una herramienta al físico terapeuta durante los ciclos de rehabilitación. Además, se consideran los tipos de lesión (esguince), y movimientos, clasificados como dorsiflexión, plantarflexión, eversión e inversión. Para la generación de los movimientos se utilizan actuadores lineales y sistemas inalámbricos, controlados por las analogías de sistemas de control dentro del área de Ingeniería Biomédica. El desarrollo del dispositivo despliega una diversidad de innovación tecnológica.

1. INTRODUCCIÓN

Existen múltiples razones científicas, sociales y por supuesto clínicas para continuar investigando y desarrollando tecnología apropiada para la rehabilitación de cualquier articulación. Muchas instituciones están en constante desarrollo en la búsqueda de nuevos instrumentos que ayuden a fortalecer partes del cuerpo humano, tales como: rodilla, cadera, brazos, tobillos entre otros.

En las últimas décadas, se han aprovechado nuevas tecnologías con la finalidad de emplearlos en el diseño construcción de máquinas, dispositivos y equipos rehabilitadores para emplearlos en el área en la Terapia Física [1]. Para la aplicación de estos debe considerar la anatomía del tobillo, por esta misma razón se requiere el apoyo de un especialista. Actualmente los centros dedicados a la rehabilitación ofrecen un servicio adecuado, pero insuficientes en personal, esto se transforma en un inconveniente cuando el terapeuta después de ciertas jornadas de trabajo puede llegar a cometer un error por agotamiento, provocando movimientos no deseados y en algunos incrementando la lesión. Durante el transcurso de los años han surgido en el ser humano el deseo de realizar mecanismos que simulen los movimientos de la anatomía humana, disminuir el trabajo repetitivo de un terapeuta, incrementar el número de servicio de terapias, reducir el tiempo de recuperación y ofrecer una mayor diversidad de terapias personalizadas con movimientos precisos y seguros.

El presente trabajo de investigación, tiene por objeto brindar un dispositivo biomédico que cumpla con los requerimientos necesarios, para llevar a cabo la rehabilitación del tobillo, bajo la supervisión de un especialista.

Muchos de los dispositivos, utilizan leyes de control, y generan modelos matemáticos y/o utilizan asistentes para la optimización de estas leyes de control, con la finalidad de eliminar singularidades [2-3].

El tobillo es una de las más importantes uniones del cuerpo (Fig. 1). Científicos y tecnólogos en colaboración con especialistas, realizan investigación en esta área, para dar rehabilitación de forma eficaz y fácil de usar [4].

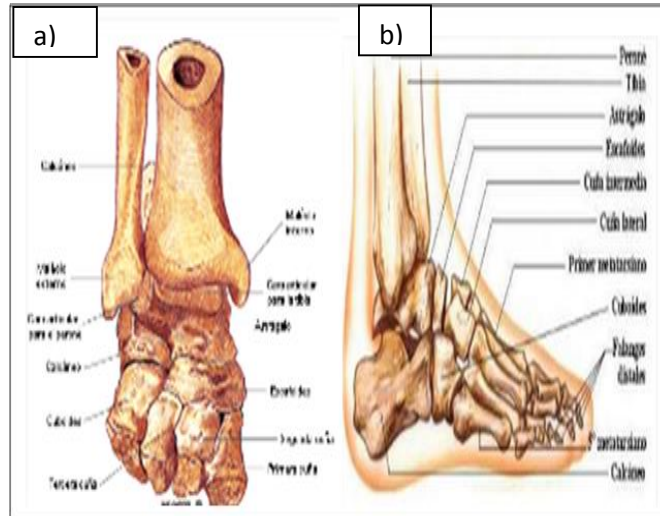


Figura 1: Estructura del Tobillo.

a) Vista frontal del tobillo [3].

b) Vista lateral del tobillo.

2. Teoría

A lo largo de este trabajo se abordarán conocimientos básicos para el óptimo desarrollo del presente prototipo. La rehabilitación tiene como objetivo mantener, recuperar y desarrollar el movimiento corporal humano. Existen dos tipos de ejercicios para rehabilitación: pasivos y activos. En los primeros, el terapeuta es el que moviliza las extremidades sin ningún esfuerzo del paciente, principalmente se utilizan para mantener la flexibilidad y el rango de movimiento de las articulaciones [5].

Cuando una persona que sufre alguna discapacidad motriz en los miembros inferiores requiere de constantes terapias de rehabilitación por un largo periodo de tiempo. Las terapias de rehabilitación son rutinas de ejercicios repetitivos bajo la supervisión de un fisioterapeuta. Sin embargo, algunas veces son mal realizadas por la falta de personal, el incremento de pacientes y el cansancio del terapeuta. Una alternativa para solucionar este problema es utilizando un dispositivo biomedico.

Para el óptimo desarrollo del presente trabajo hemos investigado los **procesos necesarios para la rehabilitación del tobillo**, tal es el caso de: Kinesioterapia (pasiva y activa), Kinesioterapia asistida, tipos de movimientos (dorsiflexión o flexión dorsal, la eversión, abducción y aducción).

En la figura 2 se muestran los tres movimientos que puede realizar el tobillo: 1) Dorsi/plantarflexión, 2) Inversión/eversión y 3) Abducción/aducción [6].

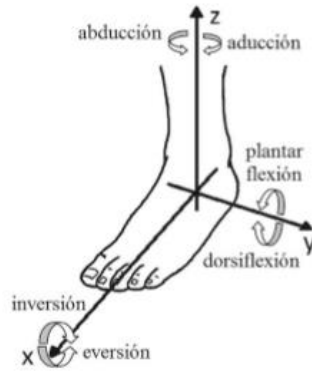


Figura 2: Movimientos angulares del tobillo con respecto a los tres ejes

Tabla 1 Intervalos de valores máximos para los movimientos de tobillo

Dorsiflexión	20,3° a 29,8°
Plantarflexión	37,6° a 45,8°
Inversión	14,5° a 22,0°
Eversión	10,0° a 17,0°
Abducción	15,4° a 25,9°
Aducción	22,0° a 36,0°

En la tabla 1 se muestran los máximos de los ángulos de tobillo para cada movimiento [6].

En la figura 3 se mencionan los productos que se pueden encontrar actualmente en el mercado.



Figura 3a



Figura 3b



Figura 3c



Figura 3d



Figura 3e

En la siguiente (Figura 3a) se muestra un dispositivo el cual no realiza ningún movimiento por sí solo, únicamente coloca el pie a una altura y después una persona especializada realiza los movimientos de rehabilitación [7].

En el aparato (Figura 3b) se observa que solo genera un tipo de movimiento y que este tiene que ser controlado por una persona especialista [7].

En el dispositivo (Figura 3c) los movimientos están motorizados, pero no están definidos los rangos que se manejan, además no tienen un dispositivo que puede delimitarlos por lo que en todo el momento de la terapia es necesario que un especialista este supervisando las rutinas [7].

Este dispositivo (Figura 3d) ofrece movimientos circulares bien definidos y el sistema mecánico está diseñado para mover el peso del pie con relativa facilidad, combina dos movimientos y tiene que ser usado de forma manual [7].

Los movimientos son circulares, estos son iguales al movimiento natural tobillo, limitados por las dimensiones del aparato, es automático y controlado con un control que sobresale (teach-pendant), a su vez el usuario controla el tiempo y la velocidad bajo parámetros preestablecidos por el fabricante (Figura 3e) [7].

Para diseño y fabricación, se considera la estructura de los tipos de dispositivos (robots), clasificados en: tipo serie y manipuladores paralelos.

Los dispositivos (robots) tipo serie están formados por una cadena cinemática abierta, con una estructura similar al brazo humano (fig. 4a). En caso de los dispositivos paralelos está integrado por dos plataformas, una fija y otra móvil, unidas por varias cadenas cinemáticas en paralelo, constituido por cadenas cinemáticas cerradas (Fig. 4b) [8].

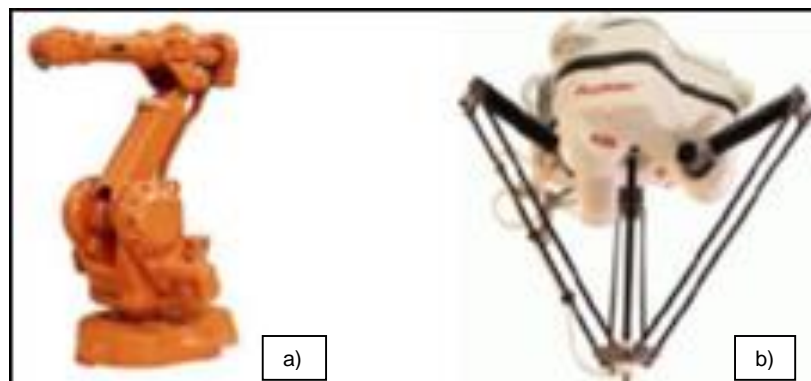


Figura 4: a) Robot tipo serie y b) Robot tipo paralelo

3. Parte Experimental

En este trabajo, se consideran las tipologías, y rangos (ángulos) que forma de manera natural el movimiento del tobillo: dorsiflexión, plantarflexión, inversión, eversión, abducción y aducción. Estos rangos de movimientos se establecieron por la Asociación para el Estudio de la Osteosíntesis (AO), y la Academia Americana de Cirujanos Ortopédicos (AAOS). Como primer método, se realizó el análisis en CAD, con la finalidad de analizar y visualizar la dinámica de todos elementos, además de la sincronización de movimientos del RPR. Mediante esto, es posible encontrar la posición ideal de los tres actuadores lineales: A1, A2 y A3, (Fig. 5). Todos juntos emulan los movimientos de acuerdo a tipologías y rangos (ángulos) del tobillo de manera sincronizada. Mediante un sensor analógico (transductor) se obtienen lecturas de movimiento, y el ángulo deseable. Esto responde a una señal eléctrica que produce una perturbación inducida, la aplicación de una fuerza (Fig. 7). Mediante esta información, es posible personalizar la rehabilitación.

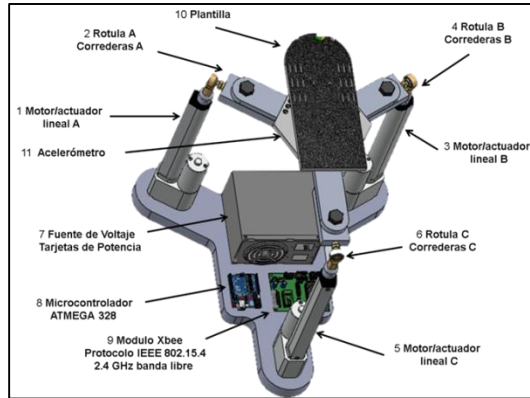


Fig. 5 Diseño general del RPR con 3 GDL

El RPR es un sistema Mecatrónico, cuenta con 3GDL, además de tres eslabones articulados. La movilidad (cinemática) es mediante tres actuadores lineales (A1, A2 y A3) debidamente sincronizados, y cada uno de estos cuenta con su respectivo mecanismo: un brazo deslizante sobre una corredera, asociada a una Junta universal de Hooke (rotula), y se encuentra conectado a su correspondiente actuador lineal (Fig. 6c). Mediante este conjunto de mecanismos, es posible reducir la fricción debido al peso de la pierna del paciente sobre el RPR. La sincronía de los actuadores lineales, considerando tipologías y rangos (ángulos) del tobillo. Mediante la programación, las rutinas de los movimientos, es mediante la combinación de A1, A2 y A3, (Tabla 2).

Tabla 2: Combinación de movimientos (Fig.2a) de los actuadores lineales (AL), dorsiflexion (1), plantarflexión (2), inversión (3), eversión (4), abducción (5), aducción (6).

AL	1	2	3	4	5	6
A1	si	Si	x	Si	Si	si
A2	si	si	Si	X	Si	si
A3	si	x	X	X	x	x

La tabla 1, muestra las combinaciones de los movimientos que cada actuador lineal debe realizar, y así llevar a cabo la rehabilitación. Es necesario mencionar que cada tobillo (izquierda/derecha) requiere de rutinas diferentes, asimismo, de que todas las lesiones en cada paciente son diferentes. En la Figura 6, se exponen todos los elementos que constituyen el RPR. En la Fig. 6a se encuentran todos los actuadores, en la Fig. 6b, de muestran las dimensiones del RPR, y en Fig.6c, se muestran los elementos mecánicos: rotulas, rieles, brazo, conectado al actuador lineal. Los análisis se basaron en la teoría de falla estática para materiales dúctiles (Von Mises), y mediante estos resultados, es posible determinar el movimiento del todo el sistema del RPR.

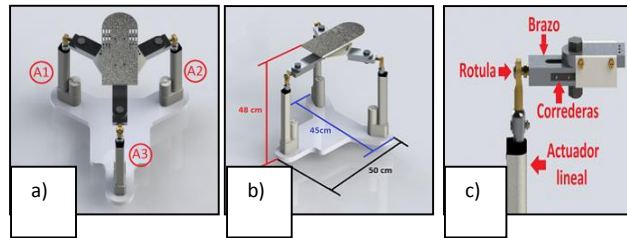


FIG. 6 a) Diseño general del RPR, aquí se muestra la posición de los actuadores lineales, b) Dimensiones recomendadas por los especialistas, c) Elementos mecánicos: rotula, brazo deslizante sobre una corredera asociada a una junta, conectada a su correspondiente actuador lineal.

Modelo matemático

Ecuaciones que describen la Cinemática Directa, las dimensiones consideradas se encuentran en la Figura 6b.

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} Ax \\ Ay \\ AlturaBase + A1 - A2 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$Ax = 25$$

$$Ay = 22.5$$

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} Bx \\ By \\ AlturaBase + A2 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$Bx = -25$$

$$By = 0$$

$$\vec{C} = \begin{bmatrix} Cx \\ Cy \\ AlturaBase - A1 - A2 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$Cx = 25$$

$$C_y = -22.5$$

Para todos los casos:

$$A_1 = 45 * \tan(\psi)/2$$

$$A_2 = 50 * \tan(\theta)/2$$

Ecuaciones que describen la Cinemática Inversa

Ecuaciones de los ángulos de Euler

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \tan^{-1}((B(3) - Pac(3))/50) \\ \tan^{-1}((A(3) - C(3))/50) \end{bmatrix}$$

Donde:

$$Pac = (A + C)/2$$

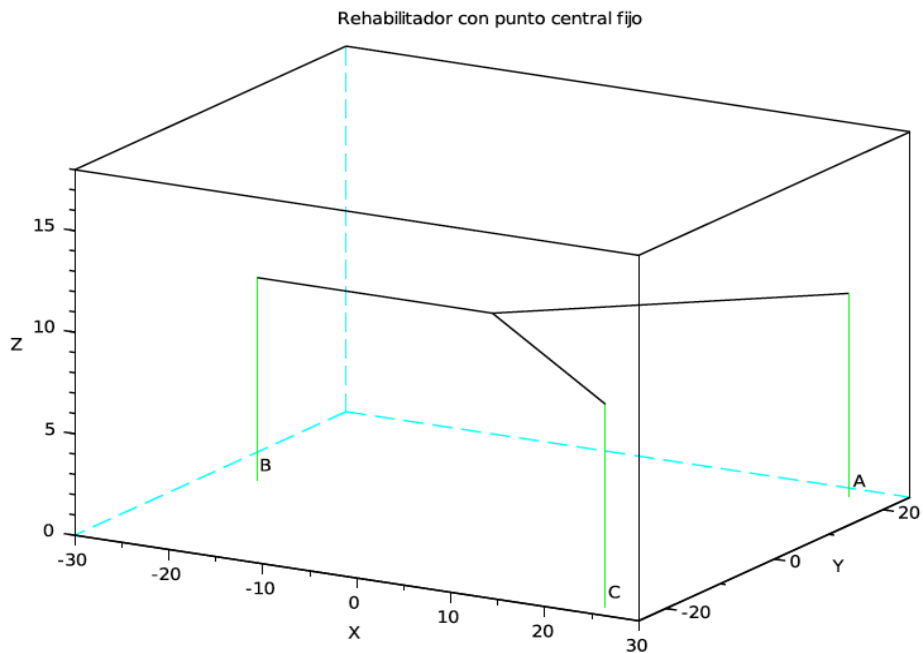


Figura 7: Representa los movimientos (Fig.2) considerando los ángulos o valores de la (tabla 1), CA, B y C representan los valores lineales A=A, B=A2 y C=A3 (Fig.5).

4. Conclusiones

Como conclusión final hemos desarrollado un prototipo para la rehabilitación del tobillo, alcanzado con estos los objetivos planteados. Mediante simulaciones y cálculos matemáticos, se determinó el tipo de material a utilizar, así como las fuerzas, momentos, tensiones y desplazamientos, todos estos son necesarios para la óptima rehabilitación de forma autónoma y personalizada.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] S. O'Discoll, N. Giori. "Continuous Passive Motion (CPM): Theory and principles of applications". *Journal of Rehabilitation Research and Development*. Vol. 32. 2000. pp. 179-188
- [2] <http://www.fisioavila.e.telefonica.net/enciclopedia/esqueleto/tobillo.htm>.
- [3] A. Blanco Ortega, E. Quintero Mármol, G. Vela Valdés, G. López, H. R. Azcaray Rivera. "Control of virtual prototype for ankle rehabilitation". 2012 Eighth International Conference on Intelligent Environments. IEEE.2012.
- [4] <http://ciclobasico.com/los-huesos/>
- [5]. Neiger H., Gosselin P., Lacombe M.T. Fisioterapia técnicas pasivas. Médica Panamericana, 1998.
- [6]. Y. Tsoi, H. Xie, S. Q. Design and Control of a Parallel Robot for Ankle Rehabilitation. International.
- [7]. A. E. Gil García, Et Al., "Rehabilitador para tobillo por movimiento pasivo (automatizado)," Maestría en Ciencias, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2008.
- [8] I. A. Bonev, "the true origins for the parallel robots," institute of electrical and electronics engineers, 2003.