

## Diseño de sistema mecatrónico para terapia de extremidad superior de niños Mechatronic system design for children's upper limb therapy

Nancy Campos-Ceja <sup>a</sup>, Jorge Gudiño-Lau <sup>b</sup>, Silvia Magaña-Ciprian <sup>c</sup>, Saida Charre-Ibarra <sup>d</sup>,  
Janeth Alcalá-Rodríguez <sup>e</sup>, Miguel Durán-Fonseca <sup>f</sup>, Daniel Vélez-Díaz <sup>g</sup>

---

### Abstract:

This article presents a design of a mechatronic system to support children in their rehabilitation of the upper limb (shoulder, wrist and hand). A communication interface is designed using the arduino board to link the mechanical system and the man-machine software. In addition, it is make a game with the purpose of making the mechatronic system more attractive and serving as motivation so that children can advance in their physical therapies. The mechatronic system is designed in a CAD software with all its components, the electronic part is made with the arduino card to control the progress of the therapies and the game is created through a games platform. The experimental rehabilitation team is designed with the advice of therapists and approved by a rehabilitation center for children with motor problems.

### Keywords:

*Mechatronic system, rehabilitation, therapie.*

---

### Resumen:

Este artículo presenta un diseño de un sistema mecatrónico para apoyar a niños en su rehabilitación de la extremidad superior (hombro, muñeca y mano). Se diseña una interfaz de comunicación empleando la tarjeta Arduino para enlazar el sistema mecánico y el software hombre-máquina. Además, se realiza un juego con el propósito de que sea atractivo el sistema mecatrónico y sirva de motivación para que los niños puedan avanzar en sus terapias físicas. El sistema mecatrónico es diseñado en un software CAD con todos sus componentes, la parte electrónica es realizada con la tarjeta Arduino para controlar el avance de las terapias y el juego es creado mediante una plataforma de juegos. El equipo experimental de rehabilitación se diseña con la asesoría de terapeutas y abalado por un centro de rehabilitación de niños con problemas motrices.

### Palabras Clave:

Sistema mecatrónico, rehabilitación, terapia.

---

### Introducción

Las causas principales por las cuales las personas no cuentan con acceso a servicios de rehabilitación son la

escasez de personal capacitado para brindar terapias de rehabilitación y el elevado costo de estas, así como el creciente número de personas que requieren de dichas terapias [1].

---

<sup>a</sup> Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, <https://orcid.org/0000-0002-5980-1377>, Email: ncampos0@uocol.mx

<sup>b</sup> Autor de Correspondencia, Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, <https://orcid.org/0000-0002-0585-908X>, Email: jglau@uocol.mx

<sup>c</sup> Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, <https://orcid.org/0000-0002-0891-1066>, Email: smagana@uocol.mx

<sup>d</sup> Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, <https://orcid.org/0000-0002-3823-5388>, Email: scharre@uocol.mx

<sup>e</sup> Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, <https://orcid.org/0000-0002-0238-3952>, Email: janethalcala@uocol.mx

<sup>f</sup> Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, <https://orcid.org/0000-0002-0780-6192>, Email: mduran@uocol.mx

<sup>g</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Tlahuelilpan, <https://orcid.org/0000-0001-6488-2960>, Email: daniel@uaeh.edu.mx

Tissot, en 1780, clasifica el ejercicio ocupacional como: activo, pasivo y mixto; para esto, recomendó actividades como la costura, la música o la natación, entre otras. En la Primera Guerra Mundial, la fisioterapia aún no era considerada como profesión, a pesar de que llevaba años de practicarse; no fue, sino hasta la Segunda Guerra Mundial que se reconoció como a la terapia ocupacional como una profesión, Figura 1 [2].



Figura 1. Terapia ocupacional en la antigüedad [2].

Actualmente, los sistemas de rehabilitación robótica han surgido como un complemento a las terapias de rehabilitación tradicional, como se puede observar en la Figura 2; esto es, se proponen como mecanismos para proveer terapias de rehabilitación convencionales, incluso se estima que a largo plazo esta tecnología pueda reducir los costos de las terapias de rehabilitación. Investigaciones han demostrado que las terapias de rehabilitación robótica son efectivas como método de rehabilitación o como un complemento a las terapias de rehabilitación convencionales [3].



Figura 2. Sistemas de rehabilitación robótica [3].

El grupo de investigación del Laboratorio de Mecatrónica y Robótica, de la Universidad de Los Andes, en Venezuela, desarrollaron el diseño de un dispositivo de rehabilitación pasiva, mostrado en la Figura 3, capaz de registrar y ejecutar las rutinas de rehabilitación para la articulación de la muñeca a través del uso de un

microcontrolador Arduino. Este dispositivo propuesto presenta características y funciones acordes con la mayoría de los requerimientos funcionales, tecnológicos, formales y ergonómicos, planteados en los apartados anteriores para atender las necesidades de los pacientes. Las formas de las geometrías propuestas en el dispositivo de rehabilitación son de fácil manufactura y ensamblaje, ya que se propuso el uso de perfiles y componentes comerciales de fácil acceso [4].

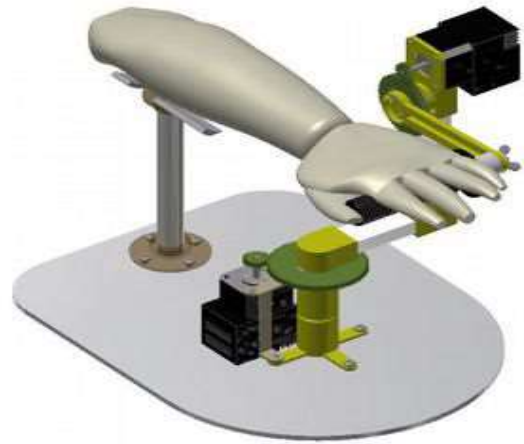


Figura 3. Robot de rehabilitación pasiva [4].

Las investigaciones respecto al uso y beneficio de este tipo de terapia han aumentado con el paso de los años, conforme al desarrollo de dispositivos. Existen múltiples equipos robóticos, como se muestra en la Figura 4, de diferentes marcas, para el tratamiento rehabilitador; los cuales tienen características comunes y específicas entre sí, pero con base en diferentes estudios no determinan diferencias en resultados [6].



Figura 4. Rehabilitación robótica [6].

El sistema robótico PABLO®, de la empresa tyromotion, es un dispositivo moderno de evaluación y terapia para la rehabilitación de pacientes con funciones motoras deterioradas, ver Figura 5. Generalmente, este sistema se utiliza para la rehabilitación neurológica de las extremidades superiores distales, pero también es usado para las extremidades superiores e inferiores, así como con aplicaciones de tronco y cabeza. La población objetivo no solo incluye pacientes neurológicos, sino también ortopédicos, pediátricos y geriátricos con déficits en el control de movimiento y fuerza, precisión, puntería, coordinación, control del tronco y equilibrio [7].



Figura 5. Robot Pablo® [7].

En la Figura 6, se muestra el robot DIEGO®, también de la compañía tyromotion, el cual es un dispositivo robótico de rehabilitación de brazos y hombros para pacientes con trastornos motores y cognitivos. Ofrece evaluaciones de la amplitud del movimiento en rango articular, así como terapias funcionales para las extremidades superiores. La configuración del paciente es rápida y fácil, se realiza mediante el uso de cabestrillos para brazos que se fijan a él de forma unilateral o bilateral. La especial construcción aérea de DIEGO® ofrece un rango de movimiento tridimensional. Es accesible tanto para pacientes móviles como para pacientes en sillas de ruedas [7].

Otros de los robots de tyromotion es AMADEO®, ver Figura 7; éste es un dispositivo asistido robótico y computarizado para la rehabilitación de manos y dedos de pacientes con trastornos motores y cognitivos. AMADEO® puede usarse en todas las fases de la rehabilitación de los dedos-manos. AMADEO® se puede adaptar a las necesidades de cada paciente; manos pequeñas y grandes, todos los dedos o solo dedos específicos. Para aplicaciones neurológicas, ortopédicas y pediátricas [7].



Figura 6. Robot DIEGO® [7].

Como se puede observar, hoy en día se tienen muchos avances en la terapia ocupacional, lamentablemente en la actualidad no se cuenta con el desarrollo tecnológico para suplantar también la falta de personal capacitado en esta área; además, el poco avance tecnológico que existe tiene un costo muy elevado. Por lo anterior, este proyecto de investigación apoya a niños en su terapia para que se puedan incorporar a las actividades cotidianas, mediante un sistema mecatrónico virtual accesible a para personas de escasos recursos económicos y sobre todo que cumpla con el objetivo de la rehabilitación.



Figura 7. Robot AMADEO® [7].

## Diseño del Mecanismo

El diseño del sistema mecatrónico se lleva a cabo mediante el software SolidWorks; un software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D, debido a la bondad que este software ofrece para la simulación de los diseños. En la Figura 8 se observa el diseño del prototipo.



Figura 8. Diseño del sistema mecatrónico.  
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 9 se muestra la vista explosionada del prototipo en el que se observa a detalle cada elemento por el que está compuesto, la Tabla 1 contiene información sobre las piezas enumeradas.

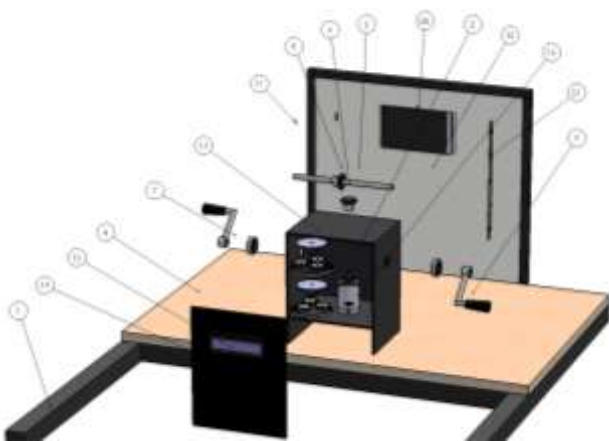


Figura 9. Vista explosionada del sistema mecatrónico.  
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 10 se muestran los componentes del diseño del mecanismo: un motor, que se comporta como dinamo; un generador eléctrico, destinado a la transformación de flujo magnético en electricidad mediante el fenómeno de la inducción electromagnética, generando una corriente continua; dos engranes planetarios, como el que se observa en la Figura 11, éstos permiten aumentar el torque de salida para generar una mayor corriente en el

dinamo; dos engranes cónicos, como se muestra en la Figura 12, los cuales ayudan a cambiar la dirección del giro en un ángulo de 90°; un eje; dos manivelas; dos rodamientos, que soportan el giro del eje, todo esto para que la fuerza aplicada por medio de las manivelas sea transmitida al dinamo [8] y [9].

Tabla 1. Lista de piezas.

No. Pieza	Nombre de la Pieza
1	Base del prototipo
2	Caja de mecanismo
3	Eje
4	Tabla de base
5	Engrane cónico
6	Engrane cónico
7	Rodamiento
9	Manivela
11	Marco de acrílico
12	Acrílico
13	Display
16	Motor
17	Engrane planetario
19	Tapa de caja
20	Pantalla LCD
21	Tira LED

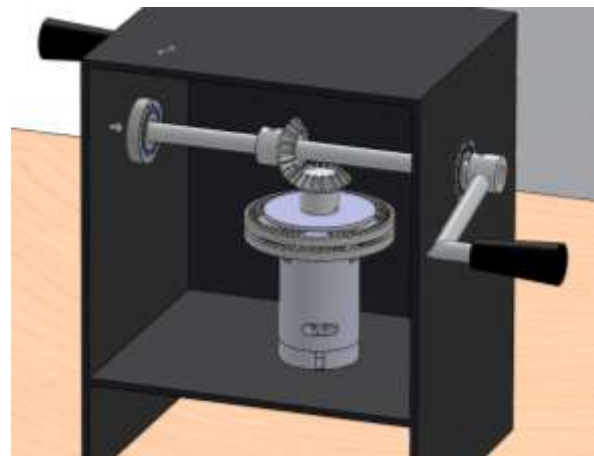


Figura 10. Diseño del mecanismo.  
(Fuente: Elaboración propia)

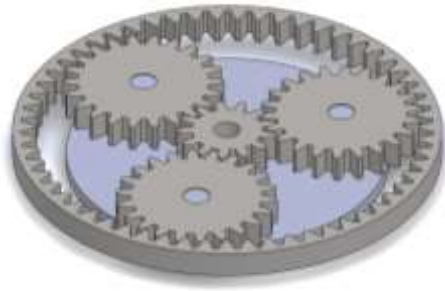


Figura 11. Diseño del engrane planetario.  
(Fuente: Elaboración propia)

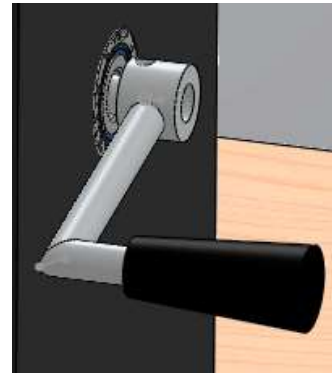


Figura 13. Manivela del prototipo.  
(Fuente: Elaboración propia)

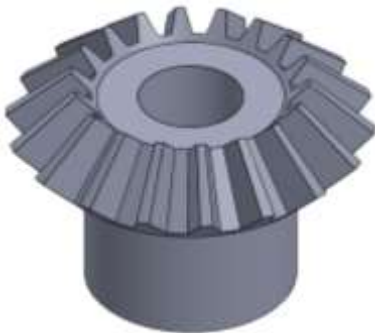


Figura 12, Diseño de engranes cónicos.  
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 14. Ejercicio terapéutico de agarre completo [10] y [11].



Figura 15. Ejercicio terapéutico de agarre con fuerza [10] y [11].

### Principio de funcionamiento del mecanismo manivela

La mecánica de la terapia mediante el prototipo consta de algo simple; mediante las manivelas mostrada en la Figura 13, la terapia funciona como binamual, lo que hace que el paciente tenga una mejor rehabilitación de los músculos y mayor sincronización, después como primer instancia el paciente realiza el ejercicio terapéutico de agarre completo (Figura 14) y agarre con fuerza (Figura 15) al momento que este se apoya de ellas para hacer moverlas de forma oscilante y comenzar con su terapia, estos movimientos permiten al paciente desarrollar motricidad y fuerza en su miembro superior.

Dentro del estudio de movimiento se cuenta con varias opciones para crear la animación, algunas de las utilizadas en la simulación del prototipo son "Girar el modelo"; que permite dar una vista completa del diseño del prototipo, "Explosionar"; muestra cada una de las piezas que contiene el diseño, "Contraer"; devuelve todas las piezas a su posición original después de explosionar el prototipo, "Motor" permite dar movimiento angular a una pieza seleccionada del prototipo y con la que se simula el movimiento del motor, como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Estudio de movimiento en Solidworks.  
(Fuente: Elaboración propia)

### Circuito eléctrico

El diseño del circuito del sistema mecatrónico se lleva a cabo en el software de Proteus; un software de automatización de diseño electrónico, ya que permite la simulación de los diseños eléctricos y trabaja en conjunto con la programación del Arduino nano el cual muestra el funcionamiento del circuito a través del código con formato “.hex”.

En la Figura 17 se muestra el diseño del circuito para conducir la energía transformada por el mecanismo y el motor, el cual está compuesto de un sensor de corriente ACS712, una tira de leds WS2812B, una pantalla LCD de 7 pulgadas, una fuente de 12 V y un Arduino nano.

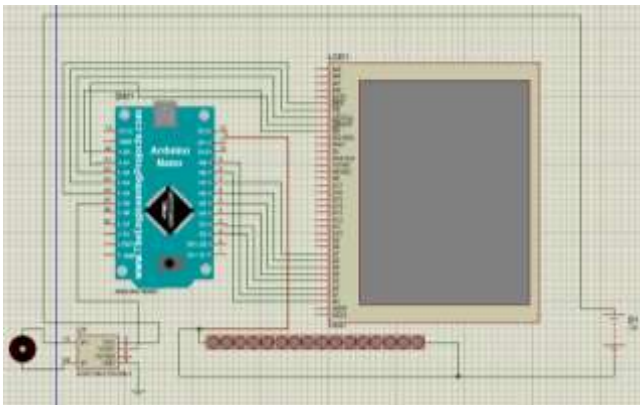


Figura 17. Diseño del circuito.  
(Fuente: Elaboración propia)

El pin D12 del Arduino nano está conectado al WS2812B mientras que el pin A5 está conectado al sensor de corriente y la pantalla LCD mantiene la conexión con el Arduino.

El funcionamiento del circuito se basa en la medición de la energía transformada, mediante el sensor de corriente ACS712, la información obtenida de este se usa en la

programación general del circuito contenida en el Arduino Nano, uno de los elementos programados con relación a esto es la tira de leds WS2812B que resulta como uno de los estimulantes visuales del sistema mecatrónico, otro de ellos es el videojuego, el cual se presenta en la pantalla LCD colocada también en el circuito.

### Diseño del videojuego como estimulación visual

El diseño del videojuego se lleva a cabo en el software Unity; un motor de videojuego multiplataforma creado por Unity Technologies, pues permite múltiples libertades a la hora de diseñar cualquier tipo de aplicación, la programación es en lenguaje C# y se lleva a cabo en el software de Visual Studio, estos dos trabajan en conjunto para brindar una mejor experiencia al desarrollador.

El juego se desarrolla en un entorno 2D, en la Figura 18 se observa el diseño del fondo del juego que luego mediante la programación hacemos que este se repita infinitamente. En la Figura 19 se muestra el diseño del personaje, hecho en arte de pixeles.



Figura 18. Fondo del videojuego.  
(Fuente: Elaboración propia)

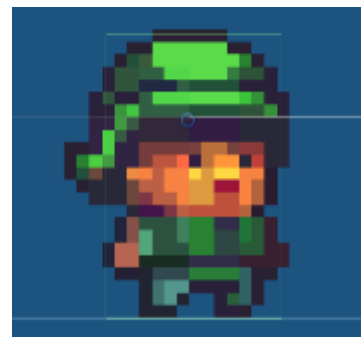


Figura 19. Diseño del personaje.  
(Fuente: Elaboración propia)

La dinámica del videojuego, que funciona como medio de estimulación visual para el paciente, consta de una programación que está relacionada a la terapia y que tiene como finalidad dar mejores resultados. Por medio de la programación cuando el paciente hace el movimiento oscilante en las manivelas, el juego da inicio una vez alcanzada cierta cantidad de corriente monitoreada por el sensor de corriente.

El movimiento del jugador depende del movimiento oscilante que hace el paciente por medio de las manivelas, y que se mide a través del sensor de corriente, una vez que este movimiento mecánico es convertido en corriente eléctrica gracias al mecanismo interior del prototipo, mediante la programación se establece el mínimo de corriente que el paciente debe generar para que el jugador comience a andar, por lo que esto resulta en un medio de estimulación visual para la realización o continuación de la terapia.

### Resultados experimentales

En esta sección se muestran los resultados experimentales realizados a través de una serie de simulaciones del programa diseñado para emular el comportamiento del circuito creado para el sistema mecatrónico. En la Figura 20 se muestra la simulación del circuito a través del software Proteus 8.9, se observa que el encendido del circuito comienza con el motor girando, éste envía una señal al sensor, el cual es el encargado de que la tira de led WS2812B comience su funcionamiento.

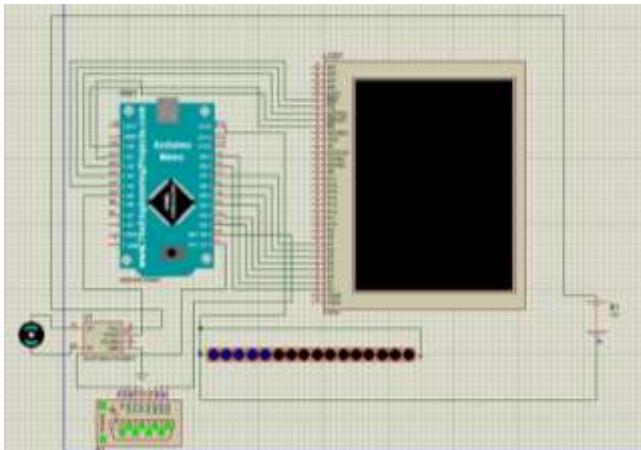


Figura 20. Simulación del circuito en Proteus.  
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 21 se muestra el inicio del juego enlazado con Arduino.



Figura 21. Simulación del Inicio del juego.  
(Fuente: Elaboración propia)

Al iniciar la simulación, al mismo tiempo en Proteus y en Unity, se presiona la tecla indicada para que se inicie el juego; en las Figuras 22 y 23 se puede ver el avance del jugador junto al avance de la tira led WS2812B en la simulación.

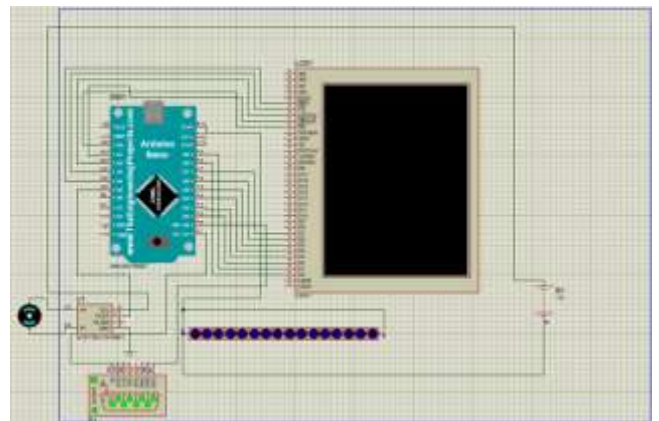


Figura 22. Simulación Proteus 3.  
(Fuente: Elaboración propia)

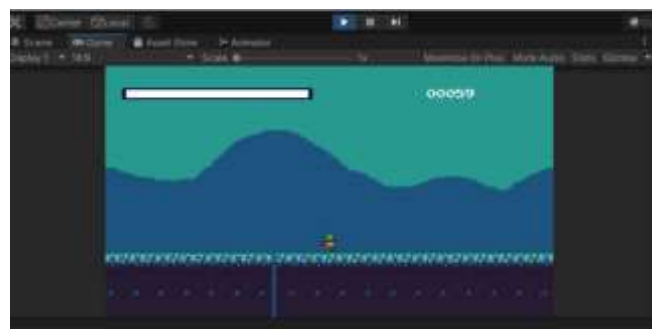


Figura 23. Simulación Unity 3.  
(Fuente: Elaboración propia)

Como se pudo apreciar en las Figuras 20 al 23 el avance del jugador es indicado por el funcionamiento de la tira de led WS2812B y el indicador en el juego mostrando un óptimo funcionamiento para la simulación del circuito del sistema mecatrónico.

## Conclusiones

Gracias a las investigaciones realizadas sobre cada una de las variantes que engloban el tema de este proyecto se pudo llevar a cabo el diseño del sistema mecatrónico y las necesidades encontradas en la demanda de estos dispositivos, de una forma satisfactoria y con los resultados esperados. Cada parte del diseño del sistema mecatrónico está pensado y estudiado a profundidad para obtener los mejores resultados en una terapia del miembro superior, cuidando la integridad del paciente. En cuanto a la accesibilidad económica del prototipo, también se pensó en eso, se eligieron los materiales correctos para que estos funcionaran con el diseño y que no incrementaran demasiado el costo de fabricación.

Además de poder llevar a cabo el diseño del sistema, tenemos la posibilidad de dar a conocer un poco más y crear consciencia de este tipo de problemáticas que pueden ser no muy conocidas por el resto de la sociedad, afectando la calidad de vida del paciente y de sus allegados.

Como trabajo futuro es llevarlo a la práctica con pacientes (niños) con problemas motrices de la extremidad superior, dado que los centros de terapia de la región fueron cerrados debido a la pandemia por el COVID-19.

## Referencias

- [1] MeliáOliva, J. F. 2008. Historia de la fisioterapia. Editorial Colegio Fisioterapeutas de la Comunidad Valenciana. España. 2008.
- [2] Pérez, Brea-Rivero, Martínez-Piédrola. "Origen de la Terapia Ocupacional en España". Revista de Neurología. 2007.
- [3] Vidrios-Serrano, C. A., Maldonado-Fregoso, B. R., Bonilla-Gutiérrez, I., Mendoza Gutiérrez, M. O., & González-Galván, E. J. "Integración de Un Sistema Robótico de Terapia Ocupacional para Extremidades Superiores con Estimulación Visual/Táctil de Los Pacientes". Revista mexicana de ingeniería biomédica. 2018.
- [4] Ceballos, Edgar, Díaz-Rodríguez, M, Paredes, J.L. y Vargas, P. "Desarrollo de un Robot de Rehabilitación pasiva para la articulación de la muñeca mediante la implementación de un microcontrolador Arduino UNO". UIS Ingenierías, vol. 16, no. 1, pp. 59-68. 2017.
- [5] Magaña, P. L. Introducción a la rehabilitación robótica para el tratamiento de la enfermedad vascular cerebral. Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación. 2016.
- [6] Cabalo C, Pascual A. Entrenamiento en habilidades de automanejo en personas con enfermedades crónicas: un estudio cuasi-experimental. 2012. Universidad de Salamanca. IX Jornadas Científicas Internacionales de investigación sobre personas con discapacidad. Salamanca; INICO.
- [7] [www.tyromotion.com](http://www.tyromotion.com)
- [8] F. eer, E. Johnston, J. DeWolf. "Mecánica de Materiales", cuarta edición, Mc Graw Hill, México, 2007.
- [9] J. Shigley, C. Mischke, "Diseño en ingeniería mecánica". Sexta edición, Mc Graw Hill, México. 2002.
- [10] [www.flintrehab.com](http://www.flintrehab.com)
- [11] B. Le Veau B, "Biomecánica del movimiento Humano". Primera Edición, Editorial Trillas, México, 1991.