

REHABILITADOR VIRTUAL INTERACTIVO PARA MEJORAR LA MOVILIDAD DEL TOBILLO EN ADULTOS MAYORES

Muñoz Ruiz Angel Mauricio
maury_vc_ldu@hotmail.com

Universidad Técnica del Norte, Hospital del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social Ibarra

Resumen: El ser humano por naturaleza se deteriora a través del tiempo afectando en el aspecto físico y cognitivo, lo cual incide a que no puedan realizar actividades de la vida cotidiana. Cuando un músculo no se utiliza, tiende a acortarse, resultando en una rigidez articular, deformidades o contracturas que, sin el estímulo del movimiento o una terapia física, pierden buena parte de sus aptitudes, resultando en inactividad parcial o total del adulto mayor. Actualmente para tratar este problema de inactividad existen varios sistemas basados en mecanismos paralelos, que permiten mover y estirar los músculos y tendones suavemente mediante la realización de movimiento pasivo. En el presente trabajo se presenta un rehabilitador virtual interactivo de tobillo, el cual permite realizar los tres movimientos necesarios para la rehabilitación funcional del tobillo. Para lo cual se diseña un disco que permite al adulto mayor realizar movimiento activo libre, además se realiza el diseño de videojuegos en base a rutinas de fisioterapia lo cual permite optimizar el proceso de rehabilitación. Se realiza el diseño electrónico y de control del dispositivo y su interfaz con Unity y sus ambientes virtuales, para finalmente plasmar los resultados de la aplicación del dispositivo.

Abstract: The human being by nature is impaired through the time, it is affected to the physical and cognitive aspect and, in consequence affects to the way to not perform activities of daily living. When a muscle is not used, it tends to shorten, resulting a joint stiffness, deformities or contractures which, without a stimulus of the movement or physical therapy, lose much of their skills, resulting in partial or total inactivity of the older adult. To resolve this problem of inactivity there are several systems based on parallel mechanisms that allow to move and stretch the muscles and tendons smoothly conducting a passive movement. This work presents a virtual rehabilitator interactive of ankle, which allows do the three necessary movements for the functional rehabilitation of the ankle. For this problem, a disc was designed to allow the elderly to perform a free active

movement, also was realized the design of video games based on physical therapy routines allowing you to optimize the rehabilitation process. It is performed by the design electronic and control device and its interface with Unity and their virtual environments, to finally express the results of the application of the device.

Palabras Clave: Rehabilitador de tobillo, adulto mayor, movimiento activo, ambientes virtuales.

Introducción

Durante muchos años, se han realizado investigaciones relacionadas con el diseño de equipos de rehabilitación para el tobillo, que ayuden a fortalecer esta articulación, recuperar la movilidad, 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.

A partir de investigaciones realizadas se empieza a observar que las personas al acercarse a los 65 años sufren deterioro físico y cognitivo, este deterioro va aumentando paulatinamente conforme supera este límite [1]. Por otro lado se plantea que el movimiento pasivo es beneficioso para tanto para articulaciones dañadas como las saludables, entonces el movimiento activo sería mucho más efectivo, debido a que se involucra fuerza y movimiento propio del paciente, lo que no se hace en el movimiento pasivo. El envejecimiento saludable en un sentido general, es el proceso por el cual se recuperan las aptitudes físicas y cognitivas perdidas a causa de la edad o de un incidente traumático mediante terapia física [2]. La rehabilitación es benéfica para reducir la espasticidad, incrementar la potencia muscular y aumentar el control de la movilidad muscular (motricidad), mejorar las condiciones de pacientes con enfermedades neuromusculares, además el ejercicio mejora las condiciones cognitivas e

incluso proporcionar una disminución de padecer determinados tipos de demencia y enfermedad de Alzheimer [3]. Por otra parte los ambientes virtuales juegan un papel muy importante en la rehabilitación del adulto mayor ya que en base a estudios comprobados son utilizados para optimizar procesos de aprendizaje o reaprendizaje de patrones de movimiento, rehabilitación ortopédica, entrenamiento de equilibrio, movilidad en silla de ruedas y actividades funcionales en capacitación para la vida [4].

Actualmente el objetivo de la rehabilitación geriátrica está enfocado a ofrecer terapias adicionales que ayuden al adulto mayor a superar traumas físicos y cognitivos sin enfrentar la frustración y la incomodidad que producen los métodos tradicionales de realizar fisioterapia, en otras palabras busca que el adulto mayor sea un ente activo en el proceso de rehabilitación. De no ser posible, se intenta lograr la capacidad de realizar el mayor número posible de actividades cotidianas. La recuperación suele ser rápida en pacientes jóvenes, pero el progreso es generalmente más lento en los pacientes de mayor edad.

Dentro de la rehabilitación existen tres modalidades de recuperación dependiendo del nivel de actividad que requiera el paciente: pasiva, asistida y activa. En la recuperación pasiva es el terapeuta el que moviliza las estructuras sin el esfuerzo del individuo. Una modalidad intermedia es la asistida, en la cual se combinan el esfuerzo del paciente y del terapeuta. La rehabilitación activa es cuando el individuo realiza todo el esfuerzo en los ejercicios [5].

Un ejemplo de máquinas utilizadas en la rehabilitación pasiva son las máquinas basadas en mecanismos paralelos, en los cuales la maquina es la encargada de inducir el movimiento en el adulto mayor, en la figura 1 se pueden ver algunos ejemplos.



Figura 1. Robots paralelos

Estos rehabilitadores aparte que resultan demasiado costosos no ofrecen todos los movimientos requeridos para la rehabilitación funcional del tobillo, tampoco contemplan todo el intervalo de los movimientos; eliminando de esta forma la capacidad de ofrecer terapias personalizadas y completas En la tabla 1 se muestran los tres movimientos que pueden realizarse en el tobillo con sus respectivos rangos de movimiento.

Tabla 1. Rangos de movimiento del tobillo.

| TIPO MOVIMIENTO | DE | MOVIMIENTO MÁXIMO |
|-----------------|----|-------------------|
| Dorso flexión | | 20.3° a 29.8° |
| Plantar flexión | | 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 26.0° |

Metodología

Para la investigación en curso en primera instancia se plantea el problema y los lineamientos fisioterapéuticos a seguir, así como también, los criterios de diseño del dispositivo para su óptimo funcionamiento, todo esto con la finalidad de reinsertar al adulto mayor en las actividades diarias. Seguidamente se realiza una recopilación bibliográfica acerca de la anatomía del tobillo y dispositivos utilizados para la recuperación en el adulto mayor, así como también, de los elementos electrónicos y de control que intervienen en la construcción del rehabilitador; a continuación, en base a los requerimientos del fisioterapeuta se plantean criterios de diseño del dispositivo así como también las condiciones de carga a las cuales estará sometido el disco, posteriormente se realiza el diseño mecánico del disco, para garantizar su funcionamiento se realiza también DCL y los cálculos correspondientes a esfuerzos normales y cortantes así como también de factor de seguridad y diagrama de esfuerzos, después de esto se realiza el diseño electrónico del dispositivo así como también el diseño del videojuego el cual se realiza en su totalidad con el software de Unity, seguidamente se realiza la construcción del dispositivo para finalmente se realizar pruebas de funcionamiento del dispositivo. Para la validación del rehabilitador de tobillo se realiza pruebas tanto en personas sanas como en pacientes que ingresan al hospital del IESS Ibarra. En primer lugar se realiza pruebas con una persona sana, para verificar que el dispositivo es capaz de alcanzar los rangos normales de movimientos articulares del tobillo. Los resultados con personas sanas son

recomendables para la certificación del dispositivo antes de ser probado con pacientes que tengan algún tipo de limitación articular o que requieren de una rehabilitación de tobillo. En segundo lugar se realizan las pruebas en 22 pacientes geriátricos con limitantes en su movimiento articular y con una valoración en riesgo de caídas entre moderado y alto.

Rehabilitador virtual interactivo de tobillo

Se diseña este dispositivo rehabilitador de tobillo de manera que proporcione movimientos de dorso flexión – plantar flexión y eversión – inversión los cuales pueden verse en la figura 2.

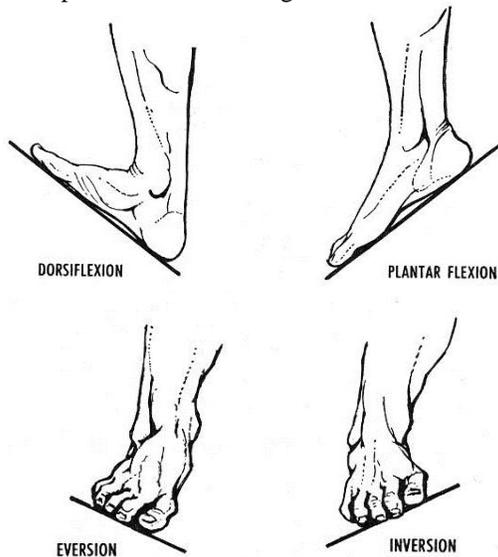


Figura 2. Movimientos del tobillo [6]

El diseño mecánico del disco se realizó en base a las medidas antropométricas del adulto mayor, movimientos de tobillo, dimensiones de los dispositivos electrónicos y de control que va a alojar en su interior y en base a medidas de dispositivos rehabilitadores similares, se establece los requerimientos del dispositivo:

- Brindar un rango de movimiento de dorso flexión y plantar flexión de 25° así como también un movimiento de eversión e inversión de 12°.
- Adaptarse a diferentes tamaños de pie.
- Que el disco no sobrepase 15 cm de altura y 35 cm de ancho.
- El material debe ser resistente a la carga aplicada.
- Tener un peso máximo de 5 kg.
- Al ser hecho con fines comerciales debe ser fácil de llevar, barato, adaptable, liviano y estéticamente agradable de ver.

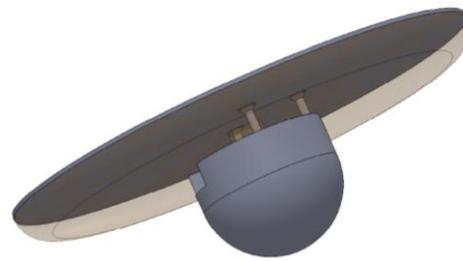


Figura 3. Diseño mecánico del disco.

En la figura 3 se muestra el disco, el cual en su interior aloja a todos los dispositivos de control del sistema rehabilitador, mismo que consta de tres partes principales que son la semi - esfera, plato y cubierta. Para el análisis de esta parte se toma en cuenta el peso total de la pierna de la persona que es 17,5 kilos que corresponde a una fuerza de 171.675 N.

El diagrama de cuerpo libre para realizar los cálculos del disco se muestra en la figura 4. Los valores de las reacciones que actúan en el plato y la semiesfera son:

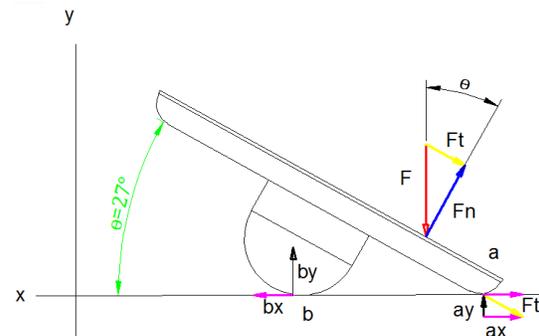


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre

$$by = 171,675 * (1 - \text{sen}(27) * \cos(27)) = 102,23 \text{ N}$$

$$bx = ax = 171,675 * (\text{sen}(27) * \text{sen}(27)) = 35,38 \text{ N}$$

$$ay = 171,675 * (\cos(27) * \text{sen}(27)) = 321,422 \text{ N}$$

Reacción tangencial en el plato

$$Ft(a) = 171,675 * \text{sen}(27) = 78 \text{ N}$$

Reacción tangencial en la semiesfera

$$Ft(b) = \sqrt{102,23^2 + 35,38^2} = 108,18 \text{ N}$$

Esfuerzos normales:

Madera

$$\sigma_1 = \frac{78 \text{ N}}{0,02 \text{ m} * 0,006 \text{ m}} = 0,65 \text{ Mpa}$$

Nylon

$$\sigma_2 = \frac{108,18 N}{0,017 m * 0,006 m} = 1,06 Mpa$$

$$\tau_{prom} = \frac{108,18 N}{\pi (0,003^2)m^2} = 3,82 Mpa$$

Factores de Seguridad

Tornillo

$$n = \frac{250 Mpa}{3,82 Mpa} = 65,44$$

Nylon

$$n = \frac{40 Mpa}{1,06 Mpa} = 37,73$$

Madera

$$n = \frac{30 Mpa}{0,65 Mpa} = 46,15$$

La parte electrónica y de control es manejada por el Arduino uno, el cual recibe las señales del sensor, las codifica y se envían a Unity para implementar la interacción con ambientes virtuales. El sensor utilizado es el ADLX335, es un acelerómetro analógico tri - axial, capaz de medir la variación de aceleración y posición en cualquiera de sus ejes. Véase figura 5.

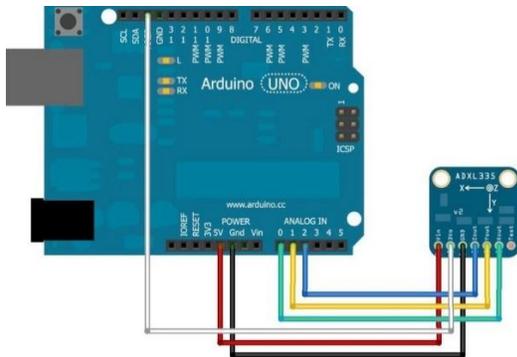


Figura 5. Diagrama del circuito de control

Los ambientes virtuales se diseñaron en base a especificaciones fisioterapéuticas y en base a rutinas establecidas para realizar la rehabilitación funcional del tobillo; aspectos como el color, las figuras, el sonido y el tamaño siguieron estos requerimientos.

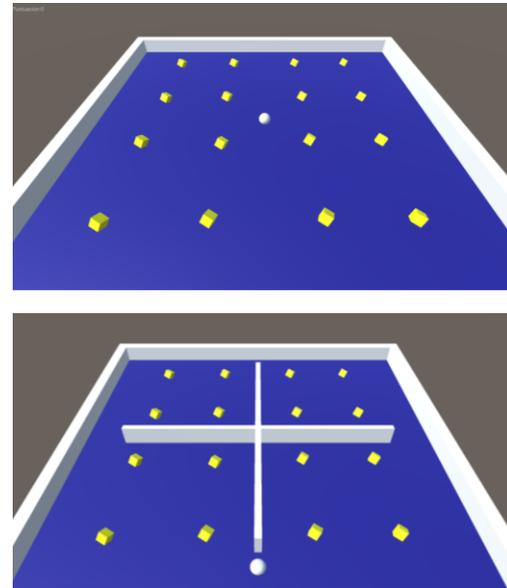


Figura 6. Ambientes virtuales

En la figura 6 se observa dos de estos ambientes virtuales diseñados específicamente para el adulto mayor. Esta interfaz gráfica mediante videojuegos le permite interactuar al paciente con su rehabilitación, y al ser interactivo se garantiza la maximización de resultados en cualquier tipo de terapia física que se realice. El objetivo del videojuego es atrapar los cubos flotantes que están en el entorno con la esfera, con esto este dispositivo permite que el paciente inconscientemente realice movimientos de flexo extensión / plantar flexión así como también movimientos de inversión / eversión, los cuales son necesarios para la rehabilitación funcional del tobillo.

Este rehabilitador aumenta los rangos de movimiento del tobillo, mejora el equilibrio, mejora la concentración, y la propiocepción así como también la coordinación y memoria.

Todo esto lleva a que el adulto mayor reduzca considerablemente su riesgo de caída aumentando su confianza y mejorando su estilo de vida.

El sistema propuesto mejora al sistema actual de realizar fisioterapia en el cual el paciente es un receptor de órdenes por parte del terapeuta.

“REHABILITARSE TIENE Q SER DIVERTIDO”. Este es el eslogan del rehabilitador. La idea es que el adulto mayor realice su rehabilitación de manera divertida; en otras palabras, el paciente va a divertirse y sin darse cuenta va a rehabilitar el tobillo.

Pruebas de funcionamiento

Una vez realizado el diseño mecánico, electrónico, virtual, se procede a realizar las pruebas de funcionamiento del rehabilitador. Para lo cual primero se realiza pruebas con una persona sana, para verificar que el dispositivo es capaz de alcanzar los rangos normales de movimientos articulares del tobillo. Los resultados con personas sanas son recomendables para la certificación del dispositivo antes de ser probado con pacientes que tengan algún tipo de limitación articular o que requieren de una rehabilitación de tobillo. A continuación, se presentan los resultados experimentales del rehabilitador virtual interactivo cuando se aplica a una persona sana como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Terapia en paciente sano

En la primera prueba se selecciona un paciente sano con una altura de 165 cm y peso de 65 kg, en donde el paciente llega a realizar movimientos de dorso flexión – plantar flexión, así como también eversión – inversión dentro de los rangos normales por lo que podemos concluir que los resultados obtenidos indican un buen desempeño del rehabilitador.

La segunda prueba se realiza con pacientes adultos mayores del hospital del IESS con cierto tipo de limitaciones funcionales y con un alto riesgo de caídas, tal como se muestra en la figura 8.



Figura 8. Paciente geriátrico rehabilitándose

El riesgo de movilidad es un factor importante para la valoración del adulto mayor que ingresa a hospitalización, es así que se puede clasificar en tipos de riesgos bajo, moderado y alto. El riesgo bajo, comprende a pacientes que a pesar de tener limitaciones fisiológicas son capaces de moverse por su propia cuenta; riesgo moderado, comprende a aquellos pacientes con movilidad limitada que requieren rehabilitación y riesgo alto, comprende a aquellos pacientes que requieren supervisión de 24 horas ya que su movilidad es muy compleja. Esta escala de riesgo de caídas se maneja internamente en la institución para identificar el tipo de ayuda que requiere el paciente.

Resultados

Como resultado se tiene como base un promedio de recuperación de 2.04 en relación con la cantidad anterior la cual era alrededor de 0.73, se concluye entonces que el rehabilitador cumple con los requerimientos pautados anteriormente.

Conclusiones

Los resultados presentados confirman que efectivamente la implicación de movimiento activo en la rehabilitación de adultos mayores muestran cambios sustantivos en la funcionalidad del tobillo que permite mejorar la función musculoesquelética en el adulto mayor, incrementa rangos de movimientos del tobillo, mejorar el equilibrio y reducir con esto el riesgo de caídas que son muy frecuentes en adulto mayor lo que convierte en un aspecto crítico para su bien estar y salud.

Los resultados del análisis de la evidencia sugieren que la rehabilitación asistida por realidad virtual supone un complemento terapéutico eficaz para la rehabilitación de la marcha y la función motora, mejorando el balance y el control postural en sujetos adultos mayores, además mejora la propiocepción, la concentración y la memoria.

Recomendaciones

En futuros trabajos el dispositivo propuesto se extenderá a ejercicios de rehabilitación de tobillo más complejos añadiendo los movimientos de cabeceo y alabeo. Además, el dispositivo no sólo garantizará la ejecución del ejercicio, sino que podrá acelerarlo tras un número de repeticiones. Tal evolución del tiempo de ejecución permitirá al paciente realizar los ejercicios originales sin modificaciones.

Se recomienda realizar la adaptación para poder utilizar este método de rehabilitación no solo en el

adulto mayor sino q también en niños y atletas de alto rendimiento, para entrenar el equilibrio o que necesiten recuperar el tobillo.

La utilización de la herramienta Ardunity es esencial para poder integrar la parte electrónica comandada por la placa Arduino y la plataforma Unity, ya que al no utilizar dicha herramienta se pueden producir muchos errores de compilación, interacción, enlace y comunicación. Además que hace más fácil la calibración del acelerómetro.

Bibliografía

- [1] T. De la fuente Bacelis, E. Quevedo Tejero , A. Jiménez Sastré y M. Zabala Gonzales, «Funcionalidad para las actividades de la vida diaria en el adulto mayor,» *Universidad Juarez Autonoma de Tabasco*, p. 2, 2010.
- [2] A. Ferrer, F. Formiga, H. Sanz, E. Monserrate y D. Verges, «Envejecimiento satisfactorio e indicadores de fragilidad en adultos mayores,» *Elsevier Doyma*, pp. 1 - 8, 2014.
- [3] N. S. Msc. Ladinez Parra, K. Dra. Contreras Valencia y A. Dr. Castillo Villamil, «Proceso de envejecimiento, ejercicio y terapia,» *Revista cubana de salud publica*, p. 9, 2012.
- [4] A. Alvear Suarez y G. E. Quintero Ramirez, «Ambientes virtuales para rehabilitaci'on física y cognitiva,» de *Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference*, Panama, 2012.
- [5] N. S. Msc. Landinez Parra, K. Dra. Contreras Valencia y A. Dr. Castro Villamil, «Proceso de envejecimiento, ejercicio y fisioterapia,» *Revista cubana de salud publica*, pp. 2-3, 2012.
- [6] V. V. A., «Anatomía funcional y biomecanica del tobillo y del pie,» *Revista española Reumatol*, vol. 3, nº 77, p. 30, 2003.
- [7] S. P. Santillana Hernández, G. R. Alvarado Moctezuma, G. Medina Beltrán, R. M. Gomez Ortega y Cortez Gonzalez, «Caidas en el Adulto mayor,» *Revista Médica Mexicana del Seguro Social*, pp. 1 - 5, 2002.
- [8] L. F. Nagua Cuenca y A. P. Tupiza Yajamin, «Diseño y construccion de un prototipo autoático para rehabilitacion pasiva de lesion por esguince de tobillo,» Sangolqui, Ecuador, 2015.
- [9] N. S. Msc. Ladinez Parra, K. Dra. Contreras Valencia y A. Dr. Castro villamil, «Proceso de envejecimiento, ejercicio y terapia,» *Revista cubana de salud pública*, vol. 4, nº 38, p. 19, 2012.
- [10] G. A. Moreno, «Insidencia de la actividad fisica en el adulto mayor,» *Revista internacional de medicina y ciencias de actividad fisica y deporte*, vol. 5, nº 19, pp. 1 - 16, 2005.
- [11] J. M. Molina y V. Matellan , «Robots Autonomos: Arquitectura y control,» *Rama de estudiantes IEEE*, 2006.
- [12] E. Lopez, «Punto Fape,» Punto Fape, 2010. [En línea]. Available: <http://www.puntofape.com/movilidad-articular-12208/>. [Último acceso: 14 Junio 2017].
- [13] P. Jurschik Giménez, M. A. Escobar Bravo, C. Nuin Orrio y T. Botigué Satorra, «Criterios de fragilidad del adulto mayor,» *Elsevier Doyma*, pp. 1-7, 2010.
- [14] H. I. Ibarra, «Registro de produccion,» 2017.
- [15] C. H. Guzman Valdivia, J. L. Carrera Escobedo, A. Blanco Ortega, O. Oliver Salazar y F. Gomez Becerra, «Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitacion del tobillo: TobiBot,» Mexico, 2014.
- [16] C. H. Guzman Valdivia, J. L. Carrera Escobedo, A. Blanco Ortega, M. A. Oliver Salazar y F. A. Gomez Becerra, «Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitacion del tobillo: TobiBot,» Mexico, Centro nacional de investigacion y desarrollo tecnológico, 2014, p. 4.
- [17] F. A. Gomes Becerra, A. Blanco Ortega y L. G. Vela Valdez, «Rehabilitador de tobillo basado en una mesa XY,» Cuernavaca, Morelos, Mexico, 2013.
- [18] I. J. I. Godoy, «Robot paralelo para la rehabilitacion de tobillo,» Cuernavaca, Morelos, Mexico, 2012.
- [19] V. Gatica Rojas, E. Elgueta Cancino, C. Vidal Silva , M. Cantin López y J. Fuentealba Arcos, «Impacto del entrenamiento del balance a travez de realidad virtual en una poblacion de adultos mayores,» *International Journal of Morphology*, vol. 28, nº 1, pp. 1 - 6, 2010.
- [20] T. R. Francisco, «EFISIOTERAPIA,» Universidad de Granada, 01 11 2004. [En línea]. Available: <https://www.efisioterapia.net/articulos/propiocepcion-introduccion-teorica>. [Último acceso: 15 06 2017].
- [21] S. L. Enric, «Robots and robotic devices,» 7 Abril 2017. [En línea]. Available: <http://economia-empresa.blogs.uoc.edu/empresa/conceptos-definiciones-robots/>.
- [22] A. Documentation, «California State University Long Beach,» Fall, 2015. [En línea]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-an-arduino>. [Último acceso: 25 Mayo 2017].
- [23] C. Del Castillo, A. Lozano y A. Nieto, «Robots Autonomos e Inteligentes de nueva generacion,» *Tendencias 21*, 2014.

- [24] R. d. Censo, «Instituto nacional de estadística y censos,» 2010.
- [25] A. Blanco Ortega, H. R. Azcaray Rivera, L. J. Morales Mendoza y F. R. Vazques Bautista, «Maquina de rehabilitacion de tobillo: Prototipo virtual y fisico,» Cuernavaca, Morelos, Mexico, 2013.
- [26] Zona diet, «Zona diet,» [En línea]. Available: <http://www.zonadiet.com/tablas/pesoideal.cgi>. [Último acceso: 1 Julio 2017].