

Diseño de un Prototipo Electromecánico para la Emulación de los Movimientos de un Brazo humano

Electromechanical Design of a Prototype for Emulation Movements of a Human Arm

DOI: <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.12.2.2016.02>

Artículo de Investigación Científica - Fecha de Recepción: 20 de Noviembre de 2015, Fecha de Aceptación: 24 de Junio de 2016

Luisa Fernanda Gallo Sánchez*

Universidad de Ibagué/Grupo D+TEC, Línea de Investigación GIEM.
Ibagué (Colombia), luisa.gallo@unibague.edu.co

Mónica Alejandra Guerrero Ramírez

Universidad de Ibagué/Grupo D+TEC, Línea de Investigación GIEM.
Ibagué (Colombia), m_guerrero07@hotmail.com

Juan Diego Vásquez Salcedo

Universidad de Ibagué/Grupo D+TEC, Línea de Investigación GIEM.
Ibagué (Colombia), diegovasalce@hotmail.com

Miguel Ángel Alonso Castro

Universidad de Ibagué/Grupo D+TEC, Línea de Investigación GIEM.
Ibagué (Colombia), migueu_01@hotmail.com

Cómo citar este artículo:

L.Gallo, M.Guerrero, J.Vásquez y M. Alonso, "Diseño de un Prototipo Electromecánico para la Emulación de los Movimientos de un Brazo Humano", *INGE CUC*, vol. 12, No.2, pp. 17-25, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.12.2.2016.02>

Resumen– Esta investigación tiene como propósito el diseño y la construcción de la parte mecánica de un dispositivo que permite emular los movimientos del brazo humano, para encontrar una alternativa diferente en los procesos de rehabilitación, o para uso en industrias que requieren manejo de la robótica. Se presentan los pasos realizados en la primera fase de la investigación, que da como resultado el diseño y construcción del prototipo de un brazo robótico diestro: cinco dedos, mano, antebrazo, bíceps y hombro; con trece grados de libertad en total, junto con el diseño de una estructura para fijar los sensores al brazo del operador. El proceso se dividió en cinco partes: diseño y construcción de un dedo de prueba; estudio para la adquisición de motores incluidos en el funcionamiento del prototipo; diseño del hombro y antebrazo; diseño de mano y muñeca y, por último, el proceso de ensamblaje de las partes.

Palabras clave– Emulación; robots; prototipos; dispositivos; máquinas electrónicas; motores; brazo humano; industria.

Abstract– This investigation have to aims the design and build a device that can emulate the movements of the human arm, to find a different alternative in the rehabilitation process, or for use in industries that require handling robotics. Steps taken in the first phase of investigation, the design and construction of the prototype of a robotic arm dexterous are presented: five fingers, hand, forearm, biceps and shoulder; thirteen degrees of freedom in total, also with the design of a structure for attaching the sensors to the operator arm. The process is divided into five parts: design construction of a test finger; study for the buy to motors; design shoulder and forearm; design hand and wrist; and finally the process of assembling the parts.

Keywords– Emulation; robots; prototypes; devices; electronic machines; engines; human arm; industry.

*Autor de Correspondencia: luisa.gallo@unibague.edu.co

I. INTRODUCCIÓN

La idea de poder emular el funcionamiento del cuerpo humano ha sido, a lo largo del tiempo, uno de los mayores intereses de la ciencia. Desde la Antigüedad, el hombre ha construido diferentes dispositivos que le permitan emular sus movimientos, con el fin de ser empleados ya sea para estudiar su comportamiento fisiológico o para facilitar las labores en el diario vivir. Estos se diseñaron para funcionar automáticamente o empleando un sistema de control hombre - máquina. Pero fue hasta mediados del siglo veinte cuando se logró construir los primeros robots industriales, pesados, con electrónica compleja y con un rango de funciones muy limitado.

Luego de la construcción de los primeros robots, aún se trabaja en el diseño y fabricación de dispositivos capaces de emular la fisiología total del hombre. El interés constante de centros de investigación de universidades y empresas hace que se dispongan recursos humanos y económicos en el desarrollo de dispositivos óptimos que ejecuten, reemplacen, emulen o mejoren labores cotidianas; en particular se sigue investigando en el diseño y construcción de prototipos que iguallen los movimientos del cuerpo humano y que además tengan una apariencia física muy similar a la humana, como son los casos de los robots ASIMO (Advanced Step In Innovate Mobility) y Waseda University Humanoid, diseñado y construido en la Universidad Waseda [1], [2].

La ingeniería y la medicina han unido fuerzas y experiencias en la búsqueda de dispositivos que permitan mejorar la calidad de vida de las personas; esto ha permitido el diseño de instrumentos más precisos y eficaces en tratamientos reconstructivos, operaciones quirúrgicas o en el tratamiento de enfermedades. Actualmente se están empleando en áreas como la fisioterapia, en la que se busca ayudar a pacientes que presentan complicaciones en miembros superiores debido a malformaciones, mutilaciones o parálisis, buscando garantizar una recuperación más rápida y satisfactoria [3].

Por lo anterior, se han desarrollado diferentes sistemas que permiten darles naturalidad a los movimientos de los robots, como el implementado en la investigación [4], en la cual se desarrolló un brazo antropomórfico con comunicación inalámbrica para el control de una pinza, pero sin emular el movimiento real del brazo, debido a que es controlado por medio de comandos. De igual forma, en [5] se desarrolló una mano robótica, la cual trabaja bajo la configuración maestro-esclavo, teleoperada mediante Bluetooth, con guantes maestro, que emplea sensores en cada articulación de los dedos.

Con la llegada de las impresiones 3D se ha facilitado la construcción de sistemas resistentes y ligeros. Estas piezas se pueden diseñar por medio de *software* como *Solidworks*, *CAD* o *Inventor*. Aunque existen diferentes materiales que se emplean en las impresiones 3D, como el PLA y el ABS, el biopolí-

mero PLA ha sido uno de los más empleados debido a sus propiedades químicas y a su bajo costo, como se concluye en [6] y en [7]; el PLA es un políéster termoplástico alifático que procede de recursos naturales (como el maíz, las raíces de tapioca, trozos de madera o caña de azúcar); entre sus principales características están su rigidez y que puede llegar a ser semicristalino o totalmente amorfo.

En la literatura revisada se encontraron diferentes prototipos electromecánicos que replican parcial o totalmente el movimiento de un brazo humano; para esta investigación, los artículos analizados fueron agrupados de acuerdo con los grados de libertad, funcionalidad de la muñeca y finalización de la extremidad; es así como en los artículos [8-15] se diseñaron brazos con 3 o más grados de libertad, posicionados sobre bases en forma vertical con giro de muñeca y terminado en pinza; por su parte, en el artículo [16] se diseñó un brazo con 4 grados de libertad, en posición vertical invertido. Por otro lado, en [17], [18] se implementaron brazos con 7 grados de libertad, con simulación de mano terminando en 3 dedos que tienen 2 grados de libertad por dedo, y finalmente en [19], [20] se menciona el diseño de una mano robótica completa con 3 grados de libertad por dedo.

Para complementar el estudio inicial y el estado del arte de esta investigación, se analizaron sistemas como el inMoov [21], en el que por medio de un *software* libre se permite trabajar con un sistema de robot humanoide. Este *software* presenta modelos con características similares al cuerpo humano, lo cual permitió usar sus sistemas como base de este diseño, sin embargo, al momento de considerar, por ejemplo, la independencia entre falanges de una mano real fue necesario apartarse de este sistema y realizar un diseño propio.

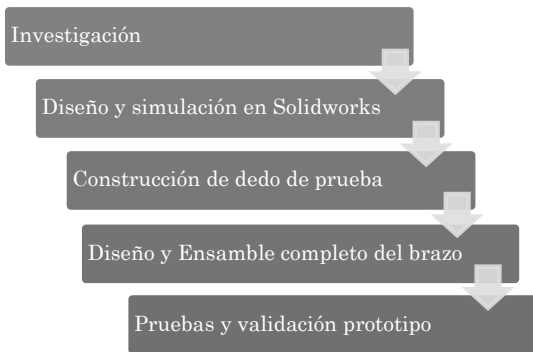
Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica realizada y el estudio de *software* disponibles, se logró un prototipo ideal para la emulación de brazo completo requerida, con un total de trece (13) grados de libertad, de los cuales diez (10) son para dar independencia a las falanges proximal y medial (exceptuando el pulgar, que al carecer de medial tendrá independencia al distal). Se implementó además el giro de la muñeca, la flexión del codo y el movimiento adelante - atrás del hombro.

En una segunda fase de este proyecto se desarrollará la parte de control del brazo mecánico, mediante acelerómetros y señales electromiográficas ubicadas en el operador; estas serán procesadas mediante un FPGA y transmitidas por RF a un segundo FPGA que controlará los motores del brazo para reproducir el movimiento emulado.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: la sección II muestra la metodología empleada en el diseño; en la sección III se explica la estructura del brazo propuesto y el diseño del brazo; la sección IV muestra los resultados de la construcción del brazo y la validación de este; finalmente, en la sección V se presenta las conclusiones y trabajos a futuro.

II. METODOLOGÍA

El proyecto se inició realizando una investigación que permite conocer e identificar el estado del arte referente al desarrollo de brazos mecánicos a nivel mundial. Después de esto se realizó el diseño y simulación del prototipo en el *software Solidworks*. El siguiente paso fue la construcción de un dedo de prueba que permitió definir los parámetros finales para el diseño completo del brazo y su ensamble; y por último se realizaron las pruebas y validación del prototipo.



III. DISEÑO DEL PROTOTIPO

A. Estructura de un brazo humano

El brazo humano presenta una serie de movimientos básicos que son realizados en diversas tareas del diario vivir: el mover del hombro hacia adelante, flexionar el antebrazo, girar la muñeca, y los agares cilíndrico, esférico, palmar, lateral y de gancho.

En el prototipo de brazo se tuvieron en cuenta las siguientes características:

- Articulación metacarpo falángico (MCP): el actuador está integrado en la palma y transmite el movimiento a través de un mecanismo de engranaje y tornillo sin fin, que permite la flexión/extensión de la falange proximal [22].
- Articulación proximal - medial (APM): el servomotor está integrado al proximal y medial. Transmite el movimiento a través del posicionamiento angular dado por el control.
- Articulación medial - distal (AMD): se conectó desde la falange distal con una inclinación de 30°, lo cual permite que la articulación APM se mueva conjuntamente con la articulación AMD.
- El sistema de giro para la muñeca está basado en un acople de dos engranes, de manera que el engrane impulsor es controlado por un servomotor.
- La flexión del codo está compuesta por un sistema de tornillo sin fin controlado por un servomotor, el cual está ajustado al antebrazo. El tornillo se encuentra acoplado a una caja de ajuste que le permite moverse con libertad dentro de ella [21].

- Para el control del hombro se empleó un sistema similar al utilizado en el diseño de la muñeca, modificando la relación de los engranes para garantizar mayor seguridad y estabilidad.

B. Diseño del brazo

Para el diseño del brazo se consideraron los siguientes parámetros: funcionalidad, simetría corporal y peso. Para cumplir con estos requisitos y garantizar un prototipo simple y funcional, el brazo se desarrolló por etapas, comenzando con un diseño estándar de un dedo con sus dos grados de libertad. En la evaluación de la emulación del movimiento del dedo se analizaron la funcionalidad, el peso y sensibilidad a la señal de entrada. Una vez se garantizó el funcionamiento, se fabricaron los dedos, exceptuando el pulgar, que tuvo un tratamiento especial, debido a su diferencia anatómica con el resto; la muñeca, antebrazo, brazo y hombro se trabajaron con el mismo principio que el dedo de prueba. El diseño del brazo se dividió en las cinco etapas, que se describen a continuación:

1) Diseño del dedo inicial de prueba

La primera etapa, que consiste en el diseño de un dedo, se realizó buscando encontrar los motores adecuados para el funcionamiento de las articulaciones de los dedos de la mano. Originalmente se planteó utilizar servomotores de torque de 2Kg para el movimiento de los proximales de los dedos, pero su tamaño no favorecía el diseño similar a una mano real. Para lograr el torque necesario y garantizar una estructura anatómica se empleó un motor de caja reductora (motorreductor) en los proximales.

Basado en lo anterior se diseñó el sistema de engranaje y tornillo sin fin (Fig. 1) para la articulación MCP [23]. La Fig. 2 muestra el diseño final del dedo índice.

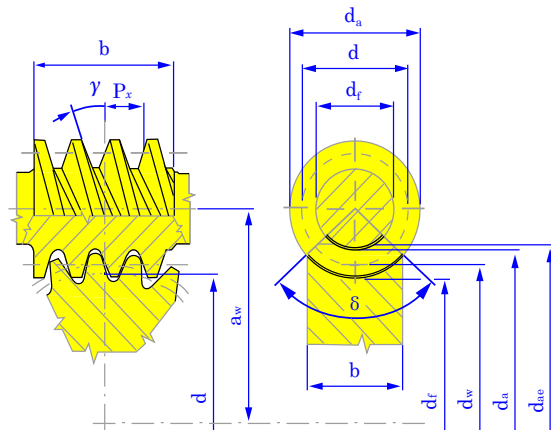


Fig. 1. Transmisión Sinfin – Corona
Fuente: [24].

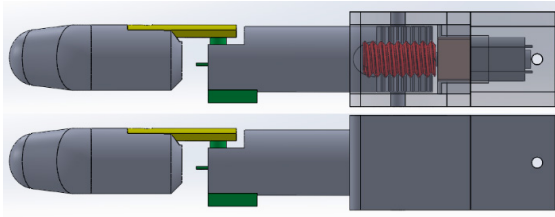


Fig. 2. Diseño del dedo índice articulado (*superior*). Vista del engranaje y tornillo sin fin (*inferior*) en Solidworks
Fuente: autores.

Cabe anotar que las dimensiones del servomotor, aun siendo las más pequeñas en el mercado actual (HK-5320 Ultra-Micro Digital Servo), siguen teniendo un tamaño mayor al de un dedo humano promedio. Es por esto que se decidió diseñar la mano tomando como base las dimensiones de este servomotor y siguiendo los parámetros de la proporción divina [25], teniendo en cuenta que en la emulación del movimiento del brazo no aplica la restricción de tener las medidas reales de una mano.

2) Diseño de la mano

Una vez garantizado que el funcionamiento del dedo cumpliera los requerimientos necesarios, se continuó con la construcción de la mano. Para esta parte se tuvo en cuenta que el diseño se basó en la mano de un hombre promedio, cuyo dedo índice normalmente es más corto que el dedo anular. En el caso del dedo meñique, se redujo en tamaño de manera proporcional con el fin de garantizar una estructura similar a la mano humana.

El dedo pulgar se diseñó con una inclinación de 45° del plano sagital de la mano, con el propósito de permitir un mayor agarre. A diferencia de los demás dedos, el pulgar trabaja con un sistema de dos engranajes movidos por medio de una polea [26], con el fin de conservar la proporción en tamaño que se lleva empleando (ver Fig. 3).

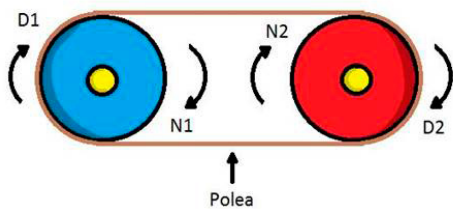


Fig. 3. Mismo sentido de giro
Fuente: Autores.

El dorsal de la mano se construyó con un sistema de segmentos para el cableado y unión de los dedos. En la Fig. 4 se puede observar el diseño de la mano (dorsal y palmar) y sus respectivos dedos.

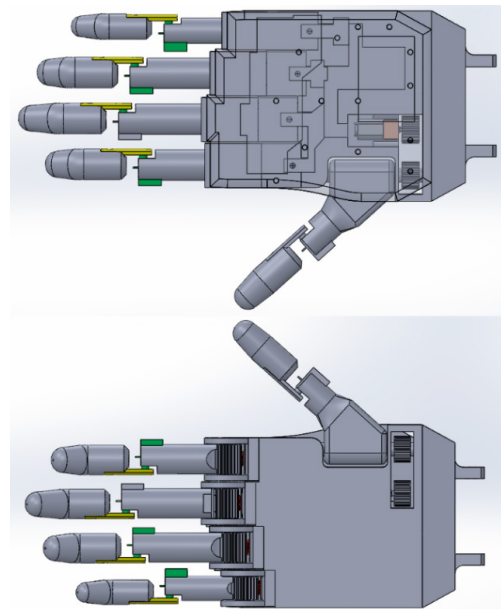


Fig. 4. Vista de la mano palmar (*superior*). Vista de la mano dorsal (*inferior*) en Solidworks
Fuente: Autores.

3) Diseño de la muñeca y antebrazo

Como ya se explicó, el sistema trabajado se compone de dos engranajes acoplados, donde el engranaje impulsor es controlado por el servomotor. La relación de engranes es 1:2, lo que reduce las revoluciones a la mitad; pero aun así permite tener un sistema eficiente y de respuesta rápida para la emulación.

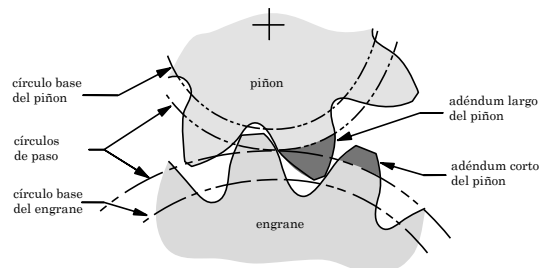


Fig. 5. Dientes de engranes con perfiles modificados, con adenda largos y cortos para evitar la interferencia y el rebaje
Fuente: [28].

El servomotor está asegurado por medio de tornillos a la base interna de la muñeca para garantizar mayor estabilidad. Las piezas que conforman el antebrazo se diseñaron huecas, con el propósito de instalar los circuitos de control de los motores. Además su ajuste se realizó por medio de láminas perforadas que se unen mediante tornillos y tuercas de seguridad. Las piezas que conectan el bíceps fueron extraídas de [21] y fueron rediseñadas para unirlas al antebrazo de manera firme y segura, con un pasador de ajuste;

por otra parte, las piezas que unen el antebrazo al servomotor del tornillo sin fin fueron diseñadas y ajustadas por tornillos y tuercas de seguridad al antebrazo. En la Fig. 6 se observa la estructura de la muñeca y el brazo diseñado hasta el antebrazo.

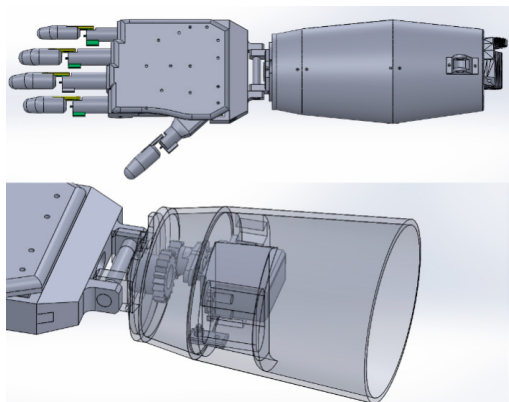


Fig. 6. Vista final de la etapa (*superior*).
Vista Isométrica de la muñeca (*inferior*). Solidworks
Fuente: Autores.

4) Diseño de bíceps y hombro

Estas piezas se diseñaron partir del *software* inMoov [21], con el propósito de dar una forma humanoide al brazo y ahorrar tiempo y material en las pruebas del diseño. No obstante, estos modelos fueron rediseñados, para garantizar los parámetros requeridos en la emulación, como en el caso del ajuste del servomotor del tornillo sin fin al antebrazo y el sistema de conexión antebrazo - bíceps.

Para el diseño del hombro se partió del mismo principio de funcionamiento empleado en la muñeca, y se le rediseñó el engranaje con un sistema que permite mayor estabilidad al piñón central por medio de una arandela de ajuste. El hombro se ajustó al bíceps por medio de tornillos y tuercas de seguridad. El diseño se observa en la Fig. 7.

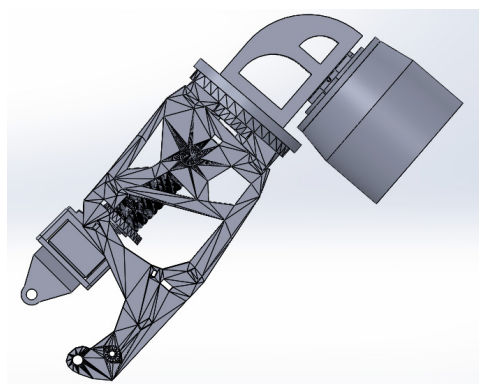


Fig. 7. Vista lateral de bíceps y hombro
ensamblados en Solidworks
Fuente: Autores.

La unión entre el antebrazo y el resto del brazo se efectuó por medio de pasadores, con el propósito de permitir un mejor desplazamiento al momento de realizar las funciones del tornillo sin fin y facilitar su separación cuando se requiera realizarle mantenimiento. En la Fig. 8 se observa el diseño completo del brazo en el Solidworks.

5) Diseño de estructura de soporte y fijación de los sensores

Para esta etapa se implementó una muñequera, con un sistema de tamaño ajustable. Esto permitió garantizar que cualquier persona puede utilizarlo. Se trabajó en un material elástico, posicionado un poco más arriba de la muñeca hasta la mitad del antebrazo. En la parte superior de la estructura se utilizó un sistema de ajuste para la tarjeta de desarrollo del FPGA (DE0-Nano) de Altera.

Los acelerómetros localizados en las falanges se ubicaron en sistemas independientes de anillos ajustables, debido a que los usuarios presentan anatomías muy diferentes. El cableado se hace por medio de conectores hembra - hembra de los acelerómetros hacia la tarjeta. En la Fig. 12 se observa el sistema de fijación.

III. VALIDACIÓN Y RESULTADOS

La construcción de las piezas se implementó con una impresora 3D, a partir de archivos STL (STereoLithography); las piezas fueron impresas con un proceso llamado modelado por deposición fundida (MDF); el sistema divide la pieza en capas y calcula las trayectorias de la boquilla para depositar el material, hasta conformar la pieza en su totalidad; después funde el material para depositarlo por la boquilla en capas del grosor requerido.

Las primeras piezas que conforman el dedo de prueba fueron impresas en PLA de color blanco, para garantizar que el diseño cumplía con las especificaciones requeridas. En esta prueba se logra garantizar que el material resiste la fuerza aplicada por medio de los motores, para el peso total del dedo (30g.) y que los motores trabajaran fuera de su corriente de *stall*, evitando así daños posibles en ellos. En la Fig. 9 se observa el dedo construido para pruebas.

Una vez se garantizó el correcto funcionamiento del dedo de prueba, se diseñaron e imprimieron las piezas de los dedos junto con la pieza de la palma para ajustarlos. Se destaca que aunque las piezas terminales de los dedos ajustaban al palmar, no había firmeza. Por ello se diseñaron una serie de soportes que permitieron ajustarlas. Para el caso del pulgar, se imprimieron sus piezas y a través de una banda se conectaron el engranaje del motor con el dedo pulgar.

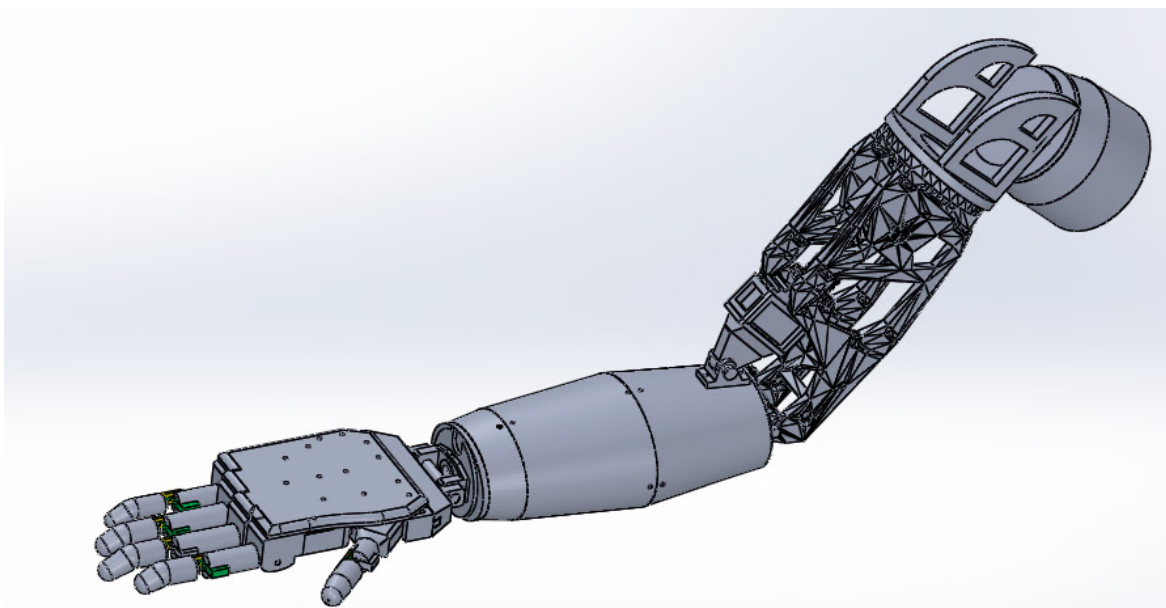


Fig. 8. Diseño final del brazo en Solidworks
Fuente: Autores.



Fig. 9. Dedo impreso en PLA blanco
Fuente: Autores.

Las pruebas de movimiento de motores se realizaron con un FPGA, programado a partir de VHDL. La adquisición y control con FPGA permiten mayor velocidad y sus múltiples ventajas, entre las cuales se destaca su capacidad para diseñar bloques que ejecuten tareas específicas, y la gran cantidad de puertos que posee permite realizar un control óptimo.

A continuación se imprimieron las demás piezas hasta la muñeca (ver Fig. 10), con el propósito de probar qué tipo de servomotor podía cumplir con el torque para generar el giro de la muñeca y que soporte el peso de la mano junto con motores y cableado. Las pruebas mostraron que el servomotor con características de torque de 11kg/cm cumplía a cabalidad con dicho requerimiento.

El siguiente paso fue ajustar la muñeca al antebrazo y a las respectivas piezas que lo conectarían al tornillo sin fin y al bíceps. En las piezas de antebrazo se instalaron los controladores y se realizaron perforaciones en la tapa del antebrazo para el cableado de los motores. Para las piezas utilizadas de Inmoov [21] se diseñaron algunas láminas perforadas para mayor estabilidad de estas. El tornillo sin fin, una vez impreso, fue suavizado en un torno para evitar que la porosidad de las capas del material generara daños e inconvenientes en el movimiento de este.

Las piezas del hombro se ensamblaron aparte para revisar que la relación entre engranajes garantizara un buen funcionamiento, pero el movimiento propuesto en este punto presenta un límite con respecto al motor y, por consiguiente, para garantizarlo se redujeron los grados de movimiento a 45 grados hacia adelante y hacia atrás. Una vez realizada la prueba se unió al resto del brazo y se realizaron los ensayos de movimiento, que permitieron detectar debilidad en el piñón del hombro, para soportar el torque ejercido; por esto se imprimió esta pieza con un refuerzo en capas para darle mayor resistencia.

El brazo se unió a una base de 1.65 metros de altura, para permitir un mejor movimiento y libertad a la hora de ser operado. El material utilizado en la base fue acero, para darle mayor estabilidad y el peso necesario para soportar y mantener estable el brazo. En la Fig. 11 se observa el brazo totalmente ensamblado y ajustado a la base.

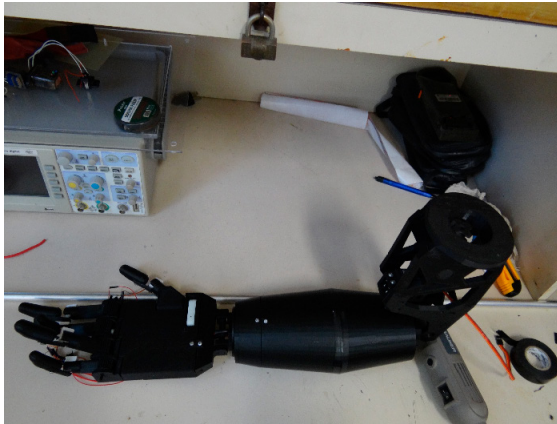


Fig. 10. Ensamblaje del brazo antes de unir al bíceps
Fuente: Autores.

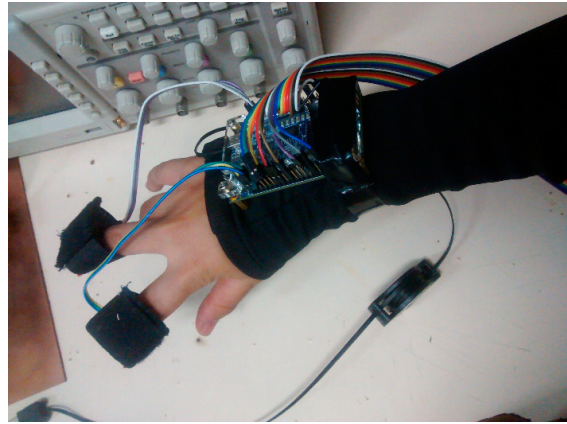


Fig. 12. Estructura de fijación de los sensores a la brazo del usuario
Fuente: Autores.



Fig. 11. Brazo impreso en PLA negro
Fuente: Autores.

El sistema de fijación de los sensores implementados para las pruebas del brazo fue confeccionado en velcro, que gracias a su elasticidad permite realizar pruebas en personas con manos de diferentes dimensiones. Los sensores fueron unidos a cada dedo por medio de dedales ajustables al usuario. En la Fig. 12 se puede observar el sistema de guante empleado en el usuario, con los sensores y el sistema de desarrollo del FPGA.

Para la validación de este prototipo se verificaron los ángulos de movimiento de cada articulación contra la fisiología humana. Para este propósito se emplearon diferentes tipos de motores de acuerdo con su funcionalidad, para garantizar así la correcta emulación. En la parte de la mano se usaron dos tipos de motores: un microservo motor HK-5320 [29] ultra micro y motor microrreductor con relación 100:1; estos motores permitieron lograr los ángulos que se presentan en la tabla 1. Se concluye que el prototipo responde de manera adecuada a los movimientos de la mano real, con un rango aceptable en la emulación.

TABLA 1. COMPARACIÓN GRADOS DE MOVIMIENTO
DEDOS MANO HUMANA VS. PROTOTIPO

GRADOS DE MOVIMIENTO		
PARTE	Mano	Prototipo
Metacarpo	100°	90°
Primer Falange	90°	145°

Fuente: Autores. [30]

El dedo pulgar se diseñó con una inclinación de 45° del plano sagital de la mano, con el propósito de permitir el agarre. A diferencia de los demás dedos, el movimiento es generado por dos engranes conectados a una banda. La ventaja de este diseño, aparte de poder cumplir con las características humanas, consiste en que permite conservar una relación 1:1 entre engranes y evita inconvenientes en el momento de control del motor [31].

Para la muñeca se empleó un servomotor MG-995[32], que permite levantar un peso de hasta 8 kg con un voltaje de 5V a 1A; con esto se logró realizar un movimiento rotatorio de la mano de hasta 160°, teniendo en cuenta que la muñeca de una persona puede girar 175° [33]. La parte del antebrazo usa un tornillo sin fin para realizar el movimiento arriba-abajo de la mayor parte del prototipo; debido a esto

se empleó el servomotor HD-1501[34], que permite levantar hasta 10 kg utilizando 5V a 2^a; con esto se tiene un movimiento de 30° soportando el peso de la extremidad, sin llegar a obtenerse el ángulo alcanzado por un brazo real. Por último, en la parte del hombro se usó el mismo servomotor HD-1501, ya que con facilidad es capaz de mover y sostener todo el peso del brazo; esto permitió obtener un movimiento de 45° adelante-atrás del prototipo sostenido a la base de este.

IV. CONCLUSIONES

El prototipo desarrollado corresponde a un brazo diestro electromecánico, que consta de 5 dedos, con dos grados de libertad en cada uno, movimiento de giro de la muñeca, flexión del codo y movimiento atrás - adelante del hombro, cuyas dimensiones responden a la proporción anatómica de un brazo humano.

La proporción de la mano es mayor a una mano promedio, debido a la necesidad de cumplir con el objetivo de la independencia de las falanges proximal y medial, para garantizar la emulación de un brazo humano. Un desarrollo futuro incluirá un micromotor que cumpla las funciones del empleado en este prototipo y que permita disminuir las dimensiones de la mano.

La construcción final permitió validar los movimientos básicos del brazo y observar el desempeño del prototipo. Las pruebas fueron realizadas por medio del sistema de desarrollo De0-Nano de Altera, luego de haber implementado un programa de control para sus respectivos movimientos.

Otros investigadores involucrados con este proyecto están trabajando en la identificación y tratamiento de las señales de acelerómetros asignados para el movimiento de los dedos y las señales electromiográficas provenientes del antebrazo y hombro humano.

Se espera en que un futuro se amplíe los grados de libertad del brazo electromecánico, debido a que la estructura posee un sistema de ensamblaje por piezas, lo cual permite ser modificado para este propósito. Estos grados de libertad serían la independencia de la articulación distal, el movimiento adelante-atrás de la muñeca, el movimiento rotatorio del hombro y el movimiento hacia los lados del proximal de los dedos.

Una vez completada la emulación, como tercera fase del proyecto, se espera que sea aplicada en pacientes en rehabilitación con el propósito facilitar su proceso de recuperación y realizar un histórico del proceso terapéutico, que permita analizar cuantitativamente el avance del paciente. Adicionalmente, se podrán ampliar las áreas de estudio en el proceso de adquisición y comportamiento del brazo humano, para así poder rediseñar el dispositivo de manera que permita un comportamiento similar al de un brazo en perfectas condiciones.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Ibagué, a la Dirección de Investigaciones y al programa de Ingeniería Electrónica.

VI. FINANCIACIÓN

Artículo derivado del proyecto de investigación "Emulación de los Movimientos del Brazo, Empleando FPGA". Financiado por el Grupo D+TEC, Línea de Investigación GIEM, Universidad de Ibagué. Fecha de inicio: marzo de 2014. Fecha finalización: noviembre de 2015.

REFERENCIAS

- [1] Honda Robotics. ASIMO. [Online]. Available: <<http://world.honda.com/ASIMO/>>
- [2] Waseda University, WasedaUniversity Humanoid. [Online]. Available: <http://www.humanoid.waseda.ac.jp/history.html>.
- [3] J. M. Dorador González, Robótica y prótesis inteligentes, Revista Digital Universitaria, vol. 6, no.1, pp. 2-15, 2004.
- [4] C. Natale Ciro, F. Castaldo, A. Cirillo, P. Cirillo, U. Ferrara, L. Palmieri. Real Time Control of an Anthropomorphic Robotic Arm using FPGA. Altera Innovate Italy Desing Contest 2011. SUN Ingegneria. Napoles, Italia. Dipartimento di ingegneriadell' informazione, 2011
- [5] A. M. Zaid, A. Yaqub, M. R. Arshad, and S. Wahab, UTHM Hand: Mechanics Behind The Dexterous Anthropomorphic Hand. World Academy of Science, Engineering and Technology [online], vol. 5, no. 2, pp. 331-335, 2011. Available: <http://waset.org/publications/9570/uthm-hand-mechanics-behind-the-dexterous-anthropomorphic-hand>.
- [6] L. Xiao, B. Wang, G. Yang, and M. Gauthier, "Poly(Lactic Acid)-Based Biomaterials: Synthesis, Modification and Applications," in Biomedical Science, Engineering and Technology, InTech, 2012.
- [7] A. A. Relaño Pastor, "Estudio comparativo de piezas ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida", Proyecto Fin de Carrera. Departamento de Ciencia e Ingeniería de los materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos II de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [8] S. González Mejía and A. Ortiz Rosas, "Desarrollo de un brazo robótico móvil para la tele operación desde un pc bajo el estándar IEEE 802.11b," Ingenium, vol. 4, no. 8, p. 5, Feb. 2009. <http://dx.doi.org/10.21774/ing.v4i8.128>
- [9] D. Rivas, F. Manjarres, J. Mena, J. L. Carrillo-Medina, V. Bautista, M. Erazo, M. Perez, O. Galarza, and M. Huerta, "Inverse engineering design and construction of an ABS plastic, six DOF robotic arm structure," in 2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), 2015, pp. 352-357. <http://dx.doi.org/10.1109/icara.2015.7081173>
- [10] J. Vachalek, L. Capucha, P. Krasnansky, and F. Toth, "Collision-free manipulation of a robotic arm using the MS Windows Kinect 3D optical system," in 2015 20th International Conference on Process Control (PC), 2015, pp. 96-106. <http://dx.doi.org/10.1109/pc.2015.7169945>
- [11] H.-J. Kim, Y. Tanaka, A. Kawamura, S. Kawamura, and Y. Nishioka, "Improvement of position accuracy for inflatable robotic arm using visual feedback control method," in 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015, pp. 767-772. <http://dx.doi.org/10.1109/AIM.2015.7222630>

- [12] P. A. Rey Molina and K. Urrego, "Diseño e implementación de un prototipo de brazo robótico en 3D para la manipulación de cajas en una matriz de almacenamiento," *Redes Ing.*, vol. 3, no. 2, pp. 32–40, 2012.
- [13] J. G. Hoyos Gutiérrez, J. E. Cardona, L. M. Capacho, F. Prieto y M. Cisneros Pérez, "Position based visual servoing of a robotic arm rv2aj implemented in matlab and java." *Colombian Journal of Advanced Technologies*, vol. 2 no. 18, pp. 18-22, 2011.
- [14] Moinul Bhuiyan and Muhammad Muaz Bin Hanafi. 2 Two Degree of Freedom Plotter using Robotic Arm. Julio de 2015.
- [15] M. Molina Cárdenas, P. Pedroza Barrios, K. M. Gaitán Moreno, J. F. Salgado Arismendy, and M. C. Ordoñez, "Diseño y Construcción del Prototipo de un Brazo Robótico con Tres Grados de Libertad, como Objeto de Estudio," *Ingeniare*, no.18, pp.. 87-94, 2015.
- [16] Y. Huang, J. Li, Q. Huang, and P. Souères, "Anthropomorphic robotic arm with integrated elastic joints for TCM remedial massage," *Robotica*, vol. 33, no. 2, pp. 348–365, Feb. 2015. <http://dx.doi.org/10.1017/S0263574714000228>
- [17] B. Fang, D. Guo, F. Sun, H. Liu, and Y. Wu, "A robotic hand-arm teleoperation system using human arm/hand with a novel data glove," in 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2015, pp. 2483–2488. <http://dx.doi.org/10.1109/ROBIO.2015.7419712>
- [18] H. Jiang, J. P. Wachs, M. Pendergast, and B. S. Duerstock, "3D joystick for robotic arm control by individuals with high level spinal cord injuries.," *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, vol. 2013, p. 6650432, Jun. 2013.
- [19] A. Ganiev, H.-S. Shin, and K.-H. Lee, "Study on Virtual Control of a Robotic Arm via a Myo Armband for the Self-Manipulation of a Hand Amputee," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, no. 2, pp. 775–782, 2016.
- [20] M. A. Pérez Romero, A. T. Velázquez Sánchez, C. R. Torres San Miguel, L. M. Sáez, P. F. Huertas González, and G. M. Urriolagoitia Calderón, "Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada," *Rev. Fac. Ing.* no. 65, pp. 46–59, 2012.
- [21] Gael Langevin. Inmoov. Open source [online]. <<http://www.inmoov.fr>
- [22] C. A. Quinayás Burgos, M. Muñoz Añasco, Ó. A. Vivas Albán, and C. A. Gaviria-López, "Diseño y construcción de la prótesis robótica de mano UC-1," *Ing. y Univ.*, vol. 14, no. 2, p. 223, 2011.
- [23] R. L. Norton, "Engranés Helicoidales, Cónicos y de Tornillo Sin Fin", en *Diseño de Maquinas*, 4ª ed. Prentice Hall, 2011, pp. 630-635.
- [24] J. F. Arroyave, C. A. Romero y C. A. Montilla, *Ingeniería inversa de un reductor de tornillo sinfin - corona*. *Scientia et Technica* [online], vol. 17, nº 52, pp. 204-210 Available: dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4271876.pdf
- [25] Bach, "La proporción áurea", *Dibujo Técnico*, pp. 1-15, 2010. Available: <https://plasticavegadeo.files.wordpress.com/2010/08/15-la-proporcion-aurea.pdf>
- [26] J. E. Shigley and L. D. Mitchell, "Engranés Rectos", *Diseño de Ingeniería Mecánica*, 3ª Ed. McGraw-Hill, 2010, pp. 602-668.
- [27] J. E. Shigley and L. D. Mitchell, "Engranés Rectos", *Diseño de Ingeniería Mecánica*, 2010, 3ª ed. McGraw-Hill, pp. 602-668.
- [28] R. L. Norton, "Engranés Rectos", en *Diseño de Maquinas*, 4ª ed. Prentice-Hall, 2011, pp. 543-596.
- [29] HobbyKing's. Datasheet, [Online] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__17540__HK_5320_Ultra_Micro_Digital_Servo_1_7g_0_05sec_0_075kg.html
- [30] E. L. Juan García. Cirugía ortopédica y traumatología. *Biomecánica de los dedos de la mano*. Available: <http://documents.mx/documents/biomecánica-de-los-dedos-dela-mano.html>
- [31] R. MCRae, *Ortopedia y Fracturas*. Madrid: Marban, 2006.
- [32] *Electronicos Caldas*. Hoja de datos. http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG995_Tower-Pro.pdf
- [33] R. MCRae, *Ortopedia y Fracturas*. Madrid: Marban, 2006.
- [34] Pololu Corporation. Robotics and electronics. Available: <https://www.pololu.com/product/1057>