



## Hand prosthesis with 5 DOF using embedded systems Prótesis de mano con 5 GDL usando sistemas embebidos

A. Altamirano-Altamirano<sup>1</sup>, G.A. Valentino-Orozco<sup>2</sup>, A. Vera-Hernández<sup>1</sup>, L. Leija-Salas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CINVESTAV-IPN, Mexico D.F., Mexico

<sup>2</sup>Department of Bionic Engineering, UPIITA-IPN, Mexico D.F., Mexico  
email: aaltamiranoa@cinvestav.mx; Ph. (+52) 5557473800 Ext. 6212

**Abstract** — To propose a prototype of an artificial hand with 5 degrees of freedom with anthropomorphic characteristics and anthropometric dimensions. It is a modular prosthesis that will be attached to different types of prosthesis and connectors. This work is based on the anatomical and biomechanical features and functions of the hand to perform grasping movements performed by the fingers. For this, methodological development is proposed, which determine the primary and secondary functions of the prototype. Furthermore, this methodology defines the mechanical, electrical and electronic components that activate the hand movements, generating design alternatives from the creation of an overall scheme that is constituted of five stages: sensing, control, actuators, mechanisms and sourcing. The adaptation mechanism is a system of six links interlaced with joints of hinge type, similar to the proposed by *Dechev* [1]. As a result of this methodology, we obtained a prototype hand with 5 fingers, numbered I to V, with rigid mechanisms for achieving the flexion-extension movements of the fingers and also for the movement of the thenar prominence for opposition of the finger I with the other fingers. This prototype is a system that employs embedded systems to control the fingers. Each finger uses a different kind of actuators (servo, stepper motor and geared motor), also different controllers; this is because each one has not the same function in the hand.

**Keywords** — Anthropomorphic hand, rigid mechanism, modular prosthesis

**Resumen** — Proponer un prototipo de mano artificial con 5 grados de libertad, las características antropomórficas y dimensiones antropométricas. Es una prótesis modular que se adapta a distintos tipos de prótesis y conectores. Este trabajo se basa en las características anatómicas, biomecánicas y funciones de la mano para realizar movimientos de agarre de los dedos. Para esto, se propone el desarrollo metodológico, que determina las funciones primarias y secundarias del prototipo. Por otra parte, esta metodología define los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que activarán los movimientos de la mano, generando alternativas de diseño, creando un esquema general que se constituye de cinco etapas: sensado, control, actuadores, mecanismos y alimentación. El mecanismo adaptativo es un sistema de

seis eslabones entrelazados con uniones de tipo bisagra, similar al propuesto por *Dechev* [1]. Como resultado de esta metodología se obtuvo un prototipo de mano con 5 dedos, numerados del I a V, con mecanismos rígidos para realizar los movimientos de flexión-extensión de los dedos; así mismo, para los movimientos de la prominencia tenar para la oposición del dedo I con los demás dedos. Este prototipo emplea sistemas embebidos para controlar los dedos. Cada dedo usa distintos tipos de actuadores (servomotor, motor a pasos y motoreductores), y también distintos controladores; esto es porque cada dedo tiene una función distinta en la mano.

**Palabras clave** – Mano Antropomórfica, mecanismos rígidos, prótesis modular.

### I. INTRODUCCION

La pérdida de alguna extremidad superior, consecuencia derivada de un traumatismo, un mal congénito o de enfermedades degenerativas, repercute en la realización de actividades cotidianas de quien la padece. Con el uso de una prótesis, un individuo recobra la capacidad para realizar algunas de las funciones que perdió. La incidencia de amputaciones torácicas es un problema que se presenta en personas en edad productiva. Hay proyectos de investigación en los que se desarrollan modelos protésicos; varios de estos ofrecen diversas características, como versatilidad, rapidez y complejidad, siendo, en su gran mayoría, de procedencia extranjera con costos superiores a los 20,000 dólares. Contribuciones importantes se han hecho en el desarrollo de manos inteligentes como la mano *Utah/MIT* de *Jacobsen-Wood* et al. [2] y el brazo *Luke Arm* de *DARPA* [3]; algunas de éstas desarrolladas para la operación de sistemas humanoides, manipulando objetos pesados y con precisión, como la desarrollada por *Dario-Laschi* et al. [4].

#### *Biomecánica de la mano*

La mano se conforma por 27 huesos, formando distintas articulaciones entre ellos, estas son la carpometacarpiana (CMC), metacarpofalángica (MCF), articulación proximal interfalángica (PIF) y la articulación distal interfalángica (DIF); cada una de estas permite realizar, en conjunto, los siguientes movimientos: flexión-extensión, hiperextensión, abducción-aducción, circunducción y oposición (Figura 1).

Como dispositivo terminal, es un elemento que realiza movimientos de sujeción de objetos de manera fina y precisa, así también como con fuerza. Existen distintas formas de sujeción de objetos, las cuales están en función directa con la geometría del objeto [5]. Estas formas son obtenidas mediante el cambio en la cinemática de la mano.

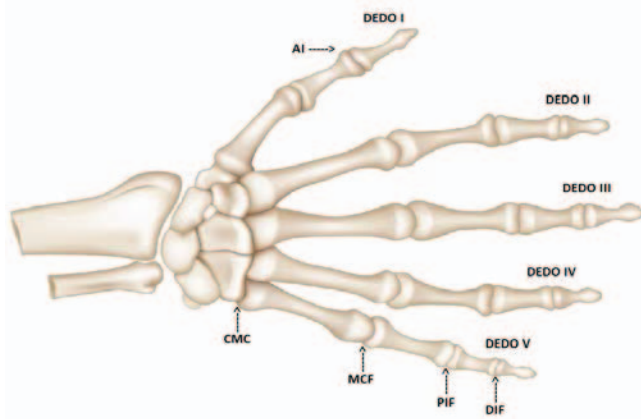


Figura 1. Articulaciones de la mano

Los movimientos de sujeción, que posee la mano humana, pueden generalizarse en 6 grupos: puntual, lateral, palmar, gancho, cilíndrico y esférico; estos grupos pueden ser reducidos a tres equivalentes mecánicos de envolvimiento, triple-pinza y sujeción de punta, que se asemejan a los patrones de agarre humanos [6]. El agarre puntual es para la sujeción de geometrías pequeñas y finas; se utilizan las puntas del dedo I y el dedo II. La sujeción palmar se usa para sostener objetos con geometrías variables de mayor longitud. El agarre lateral es para la sujeción de objetos delgados y planos donde ésta se realiza con la parte interna del dedo I y la parte lateral del dedo II. La sujeción de gancho se aplica regularmente al levantar o jalar objetos en los que se involucran cuatro o cinco dedos de la mano. La sujeción cilíndrica se emplea para hacer un agarre prensil de objetos con geometrías continuas como barras. Por último, la sujeción esférica se emplea para la sujeción de objetos con una circunferencia definida.

## II. METODOLOGÍA

La metodología de diseño de sistemas en ingeniería describe los elementos que refieren al proceso de solución a una propuesta, ésta incluye su análisis, evaluación, diseño y desarrollo. Para un prototipo de prótesis de mano se considera un proceso de diseño con los objetivos específicos, esto para establecer las funciones necesarias, los requerimientos específicos y características deseadas del sistema a desarrollar.

Los modelos referentes al proceso de diseño son dos: prescriptivos y descriptivos [7]. Los modelos prescriptivos motivan una forma de trabajo que termina, generalmente, en una metodología de diseño particular, lo cual puede generar múltiples diseños alternativos, desarrollando soluciones secundarias y seleccionando racionalmente el mejor diseño. Por otra parte, los modelos descriptivos son un proceso convencional y heurístico, que enfatiza la solución en las primeras etapas del proceso; un modelo descriptivo es elaborado mediante un diagrama de flujo que presenta una serie de etapas con ciclos de retroalimentación donde se muestran iteraciones.

### A. Procesos de diseño

Con base en la metodología de *M. J. French* [8] se obtiene un árbol de objetivos (Figura 1) que debe cumplir el modelo prototipo, el cual ofrece una estructura clara, útil y confiable para desarrollar el planteamiento. Este esquema muestra los objetivos principales, así como los secundarios que se desprenden.

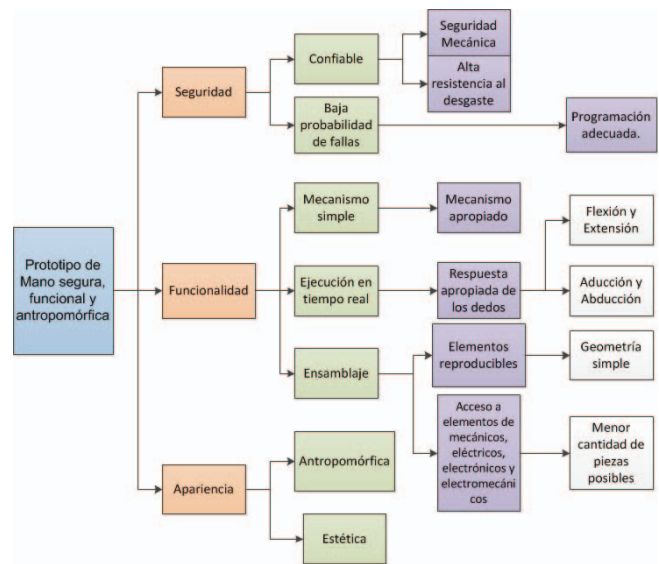


Figura 2. Árbol de objetivos de la mano

### B. Establecimiento de Funciones

Para el diseño de la mano, la función general del sistema es la sujeción de objetos; posteriormente, se debe descomponer en múltiples funciones secundarias (Figura 2). La primera función secundaria es la recepción de la señal para después llegar a la etapa de control del sistema, la cual se encarga de interpretar y procesar la señal para inmediatamente ejecutar el código adecuado para que el actuador desarrolle su función de forma adecuada, utilizando un acoplamiento para adaptarse al sistema y así ejecutar la trayectoria apropiada.

### C. Características de los componentes

Teniendo las especificaciones del equipo, es conveniente determinar la importancia relativa entre las especificaciones deseadas con base en su naturaleza, tomando mayor importancia aquellos que se sean indispensables para la operación del prototipo.

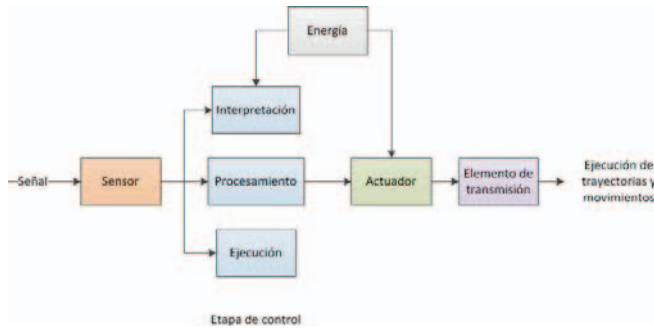


Figura 3. Diagrama de funciones del prototipo de la mano

### III. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

El prototipo propuesto es un sistema electro-mecánico de 15 uniones multi-articuladas para los cinco dedos de la mano. Cada dedo tiene un grado de libertad; para los dedos IV y V se tomará sólo un grado; a excepción del dedo I que tendrá dos grados de libertad. El mecanismo realiza las funciones de flexión-extensión para los cinco dedos, y para el dedo I deberá realizar la abducción-aducción palmar. El diseño de la mano es antropométrico y antropomórfico, contiene en su interior los elementos eléctricos y electrónicos para la ejecución de trayectorias y movimientos para la sujeción de los objetos; se compone de tres sistemas para su operación en conjunto:

1. Sistema Mecánico: mecanismos, estructura y carcasa.
2. Sistema Electrónico: control primario y secundario.
3. Sistema eléctrico: suministro de energía.

Este prototipo contiene el sistema de actuación electromecánica de prensión de los dedos, los mecanismos de flexo-extensión y abducción-aducción de los dedos, así mismo contendrá dos sistemas de control, uno central y un secundario. Físicamente, la prótesis, está construida con materiales resistentes al desgaste, corrosión y oxidación, como aluminio 6063-T6, Nylamid™ SL®, bronce B144 y acero inoxidable 304. El prototipo tiene un peso aproximado de 850 g, cumpliendo con la antropometría en de la mano en sus partes dentro de un intervalo de medidas de: 200 mm de largo, 150 mm de ancho y 50 mm de alto.

### IV. DESARROLLO

La mano humana es capaz de sujetar y manipular objetos con formas y tamaños diferentes; esto es debido a que cuenta con 14 falanges, 5 metacarpianos, 8 carpianos, músculos y tendones que proporcionan a la estructura ósea de la mano la posibilidad de ejecutar movimientos con exactitud y fuerza de manera estable y con destreza [9].

El prototipo propuesto en este artículo, que llamaremos *BioLAREMUS*, es un sistema de 5 grados de libertad, cuenta con 15 uniones móviles que son múltiples grados de libertad, pero en conjunto sólo proporcionan un grado de libertad para los dedos II-V y dos para el dedo I; y la capacidad de mover los dedos I, II, III, IV y V en: flexión y extensión y para el dedo I, también se incluye, la abducción y aducción; los dos primeros movimientos serán realizados por un sistema rígido de eslabones unidos. Estos serán actuados por 2 motores de C.D. con reductores para los dedos III y IV- V; 2 motores a pasos que actuarán en los dedos I y II. El dedo I también será operado por un servomotor que realizará la aducción y abducción. Este sistema será capaz de realizar las 6 prensiones descritas en la introducción.

La característica del agarre adaptativo de la mano *BioLAREMUS* es pasiva. No hay sensores o computadores en el diseño para coordinar activamente el movimiento de las falanges de los dedos.

#### a) Dedos II-V y su mecanismo de activación

Basándonos en el sistema propuesto por *Dechev* [4], se propone un mecanismo similar de 6 eslabones que se implementará en los cinco dedos de la mano (Figura 3).

Los dedos II-V de la mano humana tienen la misma forma y proporción relativa, exceptuando el tamaño de cada uno de sus elementos, pues acorde a la antropometría de la mano humana [9], cada dedo tiene un tamaño distinto a los demás.

El dedo está conectado a la palma de la mano en una unión tipo bisagra a través del eslabón 1, el cual será el eje de rotación de cada dedo, y su alineación está definida respecto a la palma de la mano. Está actuado por la traslación y rotación del eslabón 6 en una unión de deslizamiento sobre el eje *x*. Este deslizamiento se da por un elemento que se sujeta al extremo derecho del eslabón 6 y se desplaza linealmente dentro de un orificio en la palma de la mano. Esto da al dedo un solo grado de libertad, permitiéndole moverse a través de un espacio específico dedicado a éste (Figura 4).

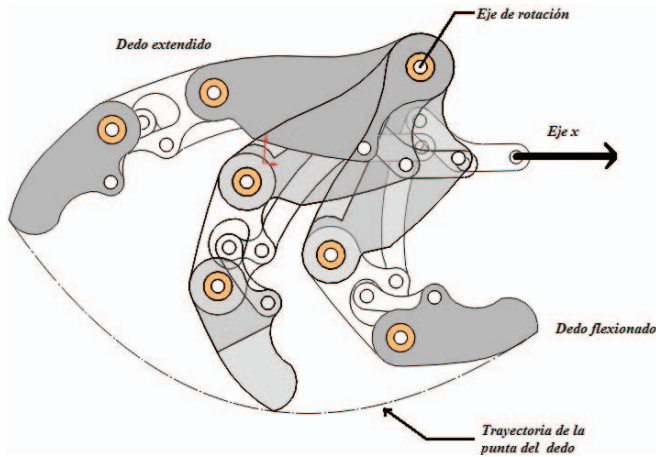


Figura 4 Mecanismo de dedo de 6 eslabones.

b) *Dedo I y su mecanismo de activación*

El dedo I es una readaptación del mecanismo de los dedos II-V, la estructura de los eslabones 1-6 es la misma. El tamaño del eslabón 1 (metacarpo para este caso) aumenta, esto debido a que el dedo ya no sólo contiene el mecanismo rígido que le da el movimiento, sino también contendrá el actuador que le da las funciones de flexión y extensión.

Este dedo está enlazado a la palma de la mano mediante un segundo actuador del tipo *servomotor* (Figura 5). Esto le proporciona al dedo un segundo funcionamiento, característico del dedo I, que será la aducción y abducción palmar, al que también se define como una rotación palmar (Figura 6). Este funcionamiento se emula mediante la rotación del eje de sujeción del dedo I, que en conjunto con la flexión y extensión del dedo I, imitan los movimientos requeridos para este dedo. La colocación del dedo I tiene un ángulo de salida de 35° que permite que al flexionar y extender el dedo, éste pueda tener contacto con los demás dedos.

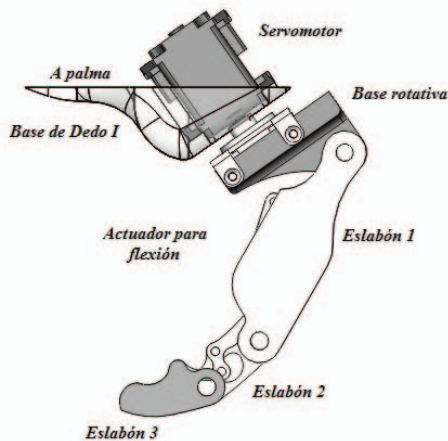


Figura 5 Modelo del dedo I del prototipo BioLAREMUS

La rotación palmar del dedo I es un movimiento de precisión, esto le permite posicionar al dedo en múltiples direcciones internas respecto a la palma, pudiendo tener contacto con los cuatro dedos de la mano, es decir, el dedo I tiene la capacidad de tocar las puntas de las falanges distales con su falange distal propia. Este movimiento no sólo depende de la aducción y abducción, sino también de una flexión y extensión que se realiza en conjunto. Ambos movimientos deben realizarse de manera independiente, ya que las presiones que realizará la mano dependen de una combinación de dos o más movimientos de los cinco dedos. El uso de un servomotor para el movimiento de rotación palmar permite el control preciso de la posición de rotación del dedo I.

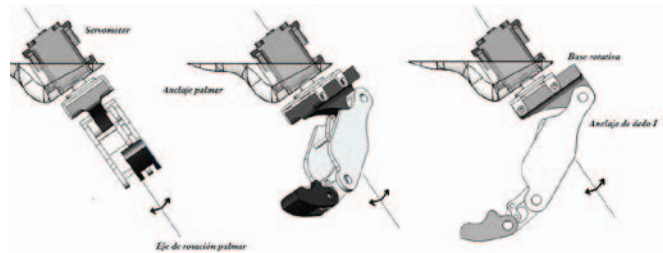


Figura 6. Rotación palmar del dedo I (abducción-aducción)

c) *Palma de la Mano*

La palma del prototipo *BioLAREMUS* tiene la función de sostener los cinco dedos de la mano y, también, de contener los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos que comprende el sistema en general. Tiene, también, 4 puntos de unión de tipo bisagra que soportarán los dedos II-V en distintos ángulos, referidos a la apertura de los dedos en la posición anatómica de la mano [9]. En la parte inferior de la palma se sostendrá el mecanismo del dedo I.

d) *Ensamblaje de los dedos*

Los mecanismos y los actuadores de los dedos I-V se adaptan directamente al arreglo palmar. El actuador de cada dedo está enlazado en su eje con un tornillo sinfín; el eslabón 6 del mecanismo del dedo está enlazado, en su extremo cercano a la palma, al tensor por una unión de tipo bisagra; el bloque de enganche tiene dos orificios paralelos, uno hueco y el otro con la rosca de contra del tornillo sinfín; el tornillo y el tensor están relacionados entre sí por el bloque de enganche, al cual está fijo el tensor (Figura 7). El bloque hace mover el tensor de forma lineal respecto al tornillo sinfín conforme éste último gira, al mismo tiempo que el mecanismo del dedo se flexiona o se extiende, dependiendo del sentido de giro del motor. La flexión del mecanismo se hace cuando el motor gira su eje en sentido contrario a las manecillas del reloj, así mismo la extensión se hace cuando el motor gira en sentido de las manecillas del reloj.

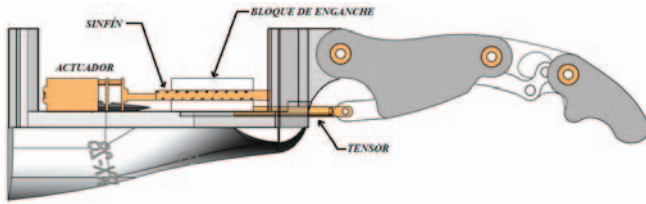


Figura 7 Estructura del mecanismo de los dedos anclados a la palma

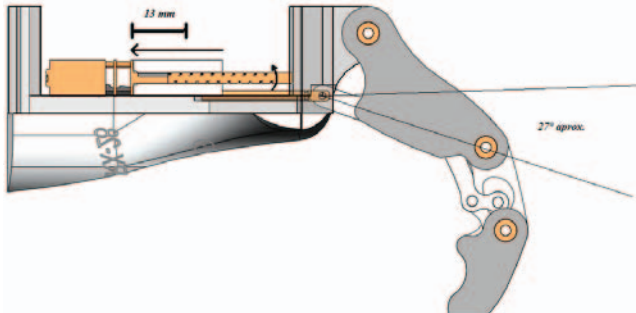


Figura 8. Mecanismo de los Dedos Flexionado a 27°

El desplazamiento del tensor y del bloque de enganche es de 13 mm dentro de la palma de la mano; esto permite una flexión de 27° aproximadamente de la falange proximal respecto de su eje de giro (Figura 8).

#### a) Características del Prototipo BioLAREMUS

El mecanismo final del prototipo se resume con las siguientes características (Figuras 9, 10 y 11):

##### Mecánicas:

- Peso aproximado: 850 g.
- Número de piezas: 143 piezas
- 5 Grados de Libertad
- Antropomórfica
- Antropométrica

##### Eléctricas:

- Alimentación: 3.7 V a 6 V
- Consumo de Corriente: 1200 mAh
- Potencia: 3 W
- Batería LiPo de 2 celdas
- Duración de la Batería: 4 hrs (uso continuo)
- Temperatura de Operación: -40°C a 85°C

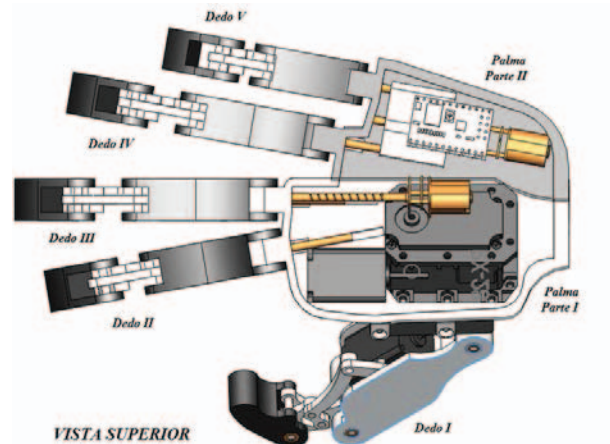


Figura 9. Prototipo de mano BioLAREMUS en vista superior

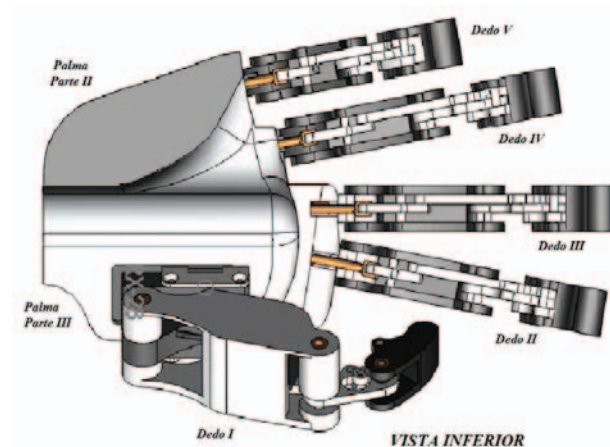


Figura 10. Prototipo de mano BioLAREMUS en vista inferior



Figura 11. Modelo del prototipo de mano BioLAREMUS 1 (vista real)

#### IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

##### a) *Método de Obtención de un Diseño Conceptual*

Se establece un método para el desarrollo del prototipo; además de la descripción anatómica, biomecánica y patológica de la mano. Con este método se clarificaron los objetivos a alcanzar, determinándose las características y requerimientos del prototipo para generar alternativas y proponer un esquema general.

##### b) *Actuadores, Sistema de Control y Suministro Eléctrico*

Se propone un sistema electromecánico de un servomotor, dos motores a pasos y dos motores de C.D. para la activación de las funciones de flexión-extensión y abducción-aducción del prototipo. Cada actuador requiere de un control específico. El servomotor tiene un controlador interno que será coordinado por una señal de tipo PWM. El motor a pasos es operado por un control para motores bipolares, igualmente coordinado por señales PWM. El motor de C.D. tiene un control de tipo Puente H, que de manera síncrona será coordinado por otra señal PWM. El control primario del sistema operará todos los controladores de manera coordinada para sincronizar los dedos en cada movimiento que realicen. Todos los controladores son sistemas embebidos y de código abierto.

El diseño de un dedo multi-articulado y actuado con elementos rígidos para los movimientos de flexión-extensión es: un mecanismo de 6 eslabones interconectados. Cada dedo describe una curva de apertura-cerradura similar al de la mano humana y, también, al de los propuestos por *Dechev* [4] y *Jung* [10]. Este mismo diseño se usó para formar un dedo de dos grados de libertad; colocando en una base giratoria el eje de un servomotor. Este dedo, dedo I, realiza los movimientos de flexo-extensión y aducción-abducción.

Los cinco grados de libertad de la mano tienen como objetivo realizar múltiples movimientos con una combinación entre todos los dedos. Los dedos I, II y III se mueven independientemente de los demás, los dedos IV y V se mueven en conjunto pero, de igual manera que los demás, son independientes a los otros tres dedos. El dedo I puede tocar punta a punta los dedos II, III, IV y V con una combinación de aducción-abducción y flexión-extensión. Los movimientos de los dedos en conjunto, permite al prototipo de mano realizar al menos 20 combinaciones de éstos. La precisión de los movimientos entre los dedos I y II está condicionada por la resolución de los actuadores de ambos dedos y ésta puede ser de hasta 1 mm +/- 0.5 mm en flexión-extensión, y una precisión de 0.3° +/- 0.3° en aducción y abducción sólo para el dedo I.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento aportado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), al proyecto del programa ECOS-ANUIES-CONACyT M10-S02 y al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal con el proyecto PICCO10-78.

#### REFERENCIAS

- [1] N. Dechev, Design of a multi-fingered, passive adaptive grasp prosthetic hand: better function and cosmesis, M.A.Sc. Thesis, Toronto: Department of Mechanical and Industrial Engineering, 1998.
- [2] S. Jacobsen, J. Wood, D. Knutti and K. Begg, "The Utah/MIT dextrous hand: work in progress," *The International Journal of Robotics Research* 3, pp. 21-50, 1984.
- [3] S. Adey and D. Karne, "Luke Arm Prosthesis Readies for clinical trials continued," *IEEE Spectrum*, 2008.
- [4] P. Dario, C. Laschi, M. C. Carrozza, E. Guglielmelli, G. Teti, B. Massa, M. Zecca, D. Taddeucci and F. Leoni, "An Integrated Approach for Design and Development of a Grasping and Manipulation System in Humanoid Robotics," in *Intelligent Robots and Systems IROS*, Takamatsu, Japan, 2000.
- [5] A. T. Velázquez Sánchez, Caracterización cinemática e implementación de una mano robótica multiarticulada, Zacatenco, Distrito Federal, México: ESIME-IPN Zacatenco, 2008.
- [6] Skinner, "Designing a Multiple Prehension Manipulator". EEUU Patent 3866966, 1 Febrero 1975.
- [7] N. Cross, Métodos de diseño: estrategias para el desarrollo de productos, Limusa Noriega, 2008, pp. 29-174.
- [8] M. J. French, Engineering Design: The Conceptual Stage, Heinemann Educational Books, 1971.
- [9] G. J. Tortora and B. Derrickson, Principios de anatomía y fisiología, Médica Panamericana, 2006.
- [10] S. Jung, S. Kang and I. Moon, "Design of Biomimetic Hand Prosthesis with Tendon Driven Five Fingers," in *Proceedings of the 2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2008.