

Diseño y construcción de la prótesis robótica de mano UC-1¹

Design and Construction of the Robotic Hand Prosthesis UC-1²

Desenho e construção da prótese robótica de mão UC-1³

César Augusto Quinayás-Burgos⁴

Mariela Muñoz-Añasco⁵

Óscar Andrés Vivas-Albán⁶

Carlos Alberto Gaviria-López⁷

¹ Fecha de recepción: 1 de marzo de 2010. Fecha de aceptación para publicación: 16 de junio de 2010. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado *Prótesis robótica para amputados de mano*, financiado por la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

² Submitted on: March 1, 2010. Accepted on: June 16, 2010 This article results from the research project called *Robotic Prosthesis for Hand Amputees*, funded by Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

³ Data de recepção: 1 de março de 2010. Data de aceitação para publicação: 16 de junho de 2010. Este artigo deriva-se de um projeto de pesquisa denominado *Prótese robótica para amputados de mão*, financiado pela Universidade do Cauca, Popayán, Colômbia.

⁴ Ingeniero físico. Magíster en Automática, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Profesor, Departamento de Física, Universidad del Cauca. Correo electrónico: cquinayas@unicauca.edu.co.

⁵ Ingeniera Industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Estudiante Maestría en Automática, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Profesora, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca. Correo electrónico: mamunoz@unicauca.edu.co.

⁶ Ingeniero electrónico, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Doctor en Robótica, Université de Montpellier II, Montpellier, Francia. Profesor, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca. Correo electrónico: avivas@unicauca.edu.co.

⁷ Ingeniero electrónico, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Doctor en Automática Avanzada y Robótica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Profesor, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca. Correo electrónico: cgaviria@unicauca.edu.co.

Resumen

Este documento muestra los pasos seguidos en el diseño y la construcción de la prótesis de mano diestra UC-1, asumiendo una estructura arborescente, de tres dedos con tres grados de libertad. Una vez probado el funcionamiento y control de la prótesis en simulación, se diseñó y construyó un prototipo de dedo poliarticulado pequeño y compacto que pudiera ser integrado fácilmente a una palma, con el fin de formar una mano polimórfica. El dedo está constituido de cuatro falanges acopladas mediante un sistema mecánico rígido de transmisión a través de motores de corriente continua. Una vez validado el dedo, se construyó la prótesis de tres dedos, adicionándole sensores analógicos Hall y sensores de fuerza para dotar de sensibilidad a la mano, así como un sistema de control implementado en un procesador digital de señales y controlado a través de Labview®. El propósito es obtener un primer prototipo que pueda servir como solución funcional a los amputados de mano y que pueda proveer diversos agarres como pinza, cilíndrico, esférico, lateral y gancho.

Palabras clave

Prótesis de mano, mano robótica, robótica de rehabilitación, dedo antropomorfo.

Abstract

This article shows the steps followed in the design and construction of the prosthetic right hand UC-1. This device was designed based on a tree structure: three fingers with a range of three degrees for each finger. The operation and control of the prosthesis was tested in simulation, and then a prototype of a multi-articulated finger was designed and built. It was small and compact, and could be easily integrated into a palm structure in order to make a polymorphic hand. After the validated finger was completed, three finger prostheses were built. Analog Hall and force sensors were added to provide sensitivity to the hand, as well as a DSP control system which was managed through Labview®. The goal is to obtain a first prototype that can offer a functional solution to hand amputees, offering a number of grasping movements, as well as cylindrical, spherical, lateral and hook grasping.

Key words

Prosthetic hand, robotic hand, rehabilitation robotics, anthropomorphic finger.

Resumo

Este documento mostra os passos seguidos no desenho e construção da prótese de mão destra UC-1, assumindo uma estrutura arborescente, de três dedos com três graus de liberdade. Uma vez provado o funcionamento e controle da prótese em simulação, desenhou-se e construiu-se um protótipo de dedo poli-articulado pequeno e compacto que pudesse ser integrado facilmente a uma palma, com o fim de formar uma mão polimórfica. O dedo está constituído de quatro falanges acopladas mediante um sistema mecânico rígido de transmissão através de motores de corrente contínua. Uma vez validado o dedo, construiu-se a prótese de três dedos, adicionando sensores analógicos Hall e sensores de força para dotar de sensibilidade a mão, bem como um sistema de controle implementado em um processador digital de sinais e controlado através de Labview®. O propósito é obter um primeiro protótipo que possa servir como solução funcional aos amputados de mão e que possa prover diversos empunhes como pinça, cilíndrico, esférico, lateral e gancho.

Palavras chave

Prótese de mão, mão robótica, robótica de reabilitação, dedo antropomorfo.

Introducción

Según el censo realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en 2005, en Colombia existen alrededor de 385.000 personas con algún tipo de discapacidad en sus miembros superiores. Una buena parte de esta discapacidad tiene su origen en la ausencia total o parcial de una o ambas manos, y de acuerdo con un estudio realizado en Estados Unidos, cerca del 70% de los amputados de mano de ese país utilizan simples ganchos pasivos como solución a su problema (Yang *et al.*, 2004). Este porcentaje debe ser mucho mayor en nuestro país, donde muchas veces siquiera se utiliza prótesis alguna.

A diferencia de los ganchos pasivos, las prótesis mioeléctricas permiten al paciente mover una mano mecánica con mayor o menor grado de funcionalidad, utilizando diversos sensores, lo cual permite devolver al paciente parte del desempeño perdido. Por lo anterior, se han propuesto muchas soluciones en los últimos años para resolver este problema; pero también se encuentran las manos robóticas, complejos sistemas que emulan la mano humana y que son gobernadas por un computador. Sus principales desarrollos son la mano Stanford/JPL (Mason y Salisbury, 1985), la mano Utah/MIT (Bennett y Hollerbach, 1990), la mano TUAT/Karlsruhe (Fukaya *et al.*, 2000), la mano Robonaut (Martin *et al.*, 2004), la mano ultraliviana de Schulz (Schulz *et al.*, 2005) y la mano DLR (Liu, Fan y Chen, 2008).

Las soluciones desarrolladas específicamente como prótesis para amputados de mano normalmente constan de pinzas con uno o dos grados de libertad, lo cual proporciona una funcionalidad muy limitada. Otros desarrollos más complejos, y más costosos para el paciente, permiten realizar ya diversos tipos de agarre. Los principales ejemplos de prótesis para amputados son la prótesis Cyberhand (Dario *et al.*, 2002; Carrozza *et al.*, 2006), la prótesis I-Limb (TouchBionics, 2009) y la prótesis Michelangelo (Otto Bock, 2010).

En nuestro país, la recuperación de los pacientes con amputación de mano es crítica. Por un lado, las prótesis comerciales mioeléctricas que se ofrecen son

importadas y, en consecuencia, muy costosas. Por el otro, las pocas investigaciones nacionales sobre la materia no han desembocado aún en una solución funcional y eficaz para nuestro medio. El presente trabajo sienta las bases para una futura solución real a este problema.

1. Arquitectura de la prótesis

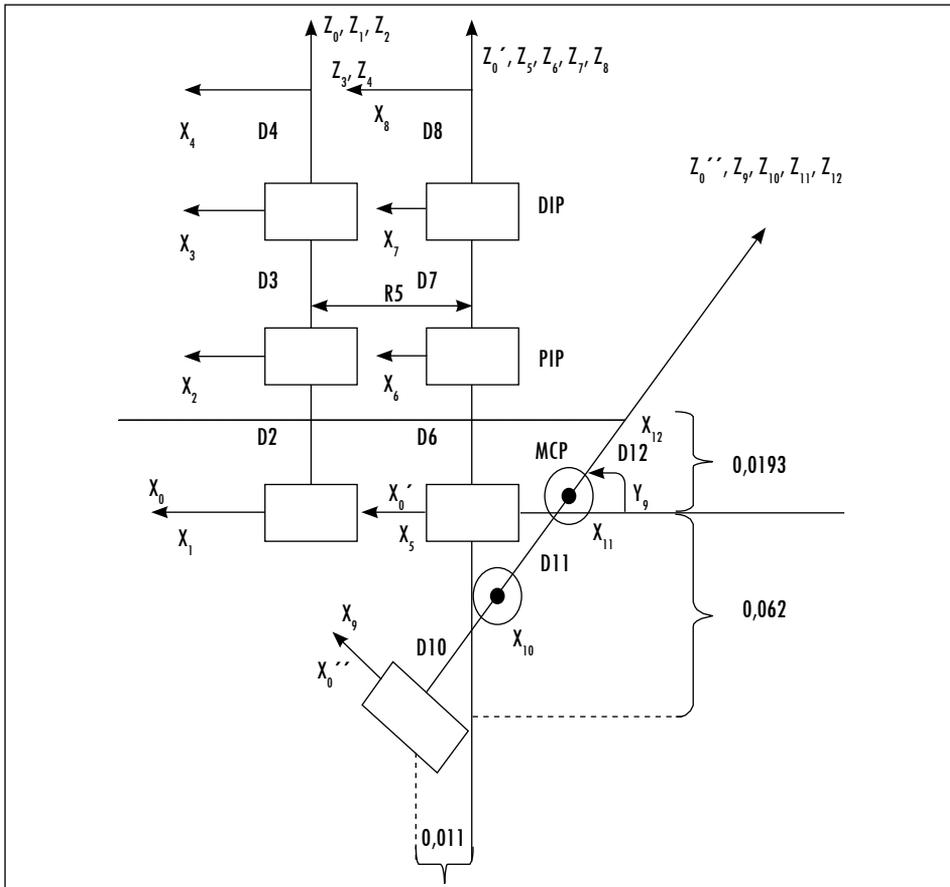
De acuerdo con un estudio inicial llevado a cabo al inicio de este proyecto (Guzmán y Torres, 2008), se pudieron determinar los movimientos más comunes realizados por una mano humana en diversas tareas de la vida diaria. Esto permitió diseñar una prótesis funcional constituida por tres dedos (medio, índice y pulgar), cada uno con tres grados de libertad, implementados con articulaciones rotoides. La prótesis final llevará, además, los dedos anular y meñique, que seguirán fielmente los movimientos del dedo medio. Con esta estructura de tres dedos se pueden lograr los movimientos funcionales más utilizados en las tareas cotidianas que son los agarres de pinza, cilíndrico, esférico, palmar, lateral y gancho. En la Figura 1 se muestra la arquitectura general de la prótesis de mano propuesta. La prótesis se diseñó como una arquitectura arborescente (Khalil y Dombre, 2002), donde a partir de la palma se originan tres ramas independientes, las cuales corresponden a cada uno de los dedos. En la Tabla 1 se presentan los parámetros geométricos de la mano.

Tabla 1. Parámetros geométricos de la mano

| i | σ_i | γ_i | b_i | α_i | d_i | θ_i | r_i |
|-----|------------|------------|-------|------------|-------|---------------|-------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | θ_1 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | D2 | θ_2 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | D3 | θ_3 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | D4 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | θ_5 | R5 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | D6 | θ_6 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | D7 | θ_7 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | D8 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | γ_9 | 0 | 0 | 0 | θ_9 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 90° | D10 | θ_{10} | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | D11 | θ_{11} | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | D12 | 0 | 0 |

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 1. Arquitectura de la mano



Fuente: presentación propia de los autores.

Los parámetros θ_j son las variables de cada articulación rotoidal; d_j hace referencia a la longitud de cada falange; α_j al ángulo entre ejes X_j ; b_j la distancia entre los ejes de cada dedo; r_j representa la distancia en tres ejes Z_j ; σ_j determina que el tipo de articulaciones utilizadas son todas rotoides, y γ_j representa el ángulo del dedo pulgar respecto a los otros dedos (definido igual a 45°).

2. Modelado de la prótesis

El modelo geométrico de la mano permite encontrar la relación entre la palma y la punta de cada dedo. Teniendo en cuenta la particular estructura arborescente de la mano diseñada, la matriz 4×4 , que permite transformar el sistema de referencia presente en cada articulación, es:

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} C\alpha_j & -S\alpha_j C\theta_j \\ C\gamma_j S\alpha_j & C\gamma_j C\alpha_j C\theta_j - S\gamma_j S\theta_j \\ S\gamma_j S\alpha_j & S\gamma_j C\alpha_j C\theta_j + C\gamma_j S\theta_j \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} S\alpha_j S\theta_j & C\alpha_j r_j + b_j \\ -C\gamma_j C\alpha_j S\theta_j - S\gamma_j C\theta_j & C\gamma_j S\alpha_j r_j - S\gamma_j d_j \\ -S\gamma_j C\alpha_j S\theta_j + C\gamma_j C\theta_j & S\gamma_j S\alpha_j r_j + C\gamma_j d_j \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nota: Las letras *S* y *C* antes de cada ángulo hacen referencia a las funciones seno y coseno, respectivamente.

A partir de la ecuación se obtienen las matrices de transformación para cada uno de los dedos, lo cual permite establecer una relación de posición y de orientación entre la palma de la mano y la punta de cada dedo. Por otra parte, el modelo dinámico de la prótesis diseñada está dado por la siguiente ecuación:

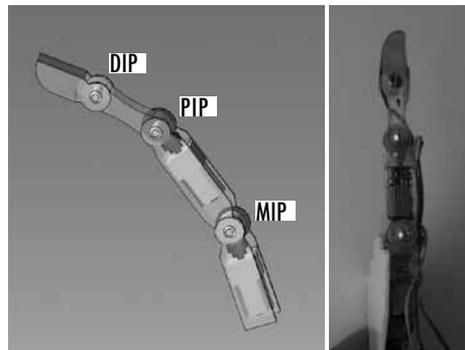
$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Q(q) \tag{2}$$

Donde Γ se refiere a los pares o torques aplicados a cada uno de los motores, A es la matriz de inercia del robot, C es la matriz de Coriolis y fuerzas centrífugas y Q es el vector de gravedad. Las posiciones, velocidades y aceleraciones articulares están dadas por q, \dot{q}, \ddot{q} , respectivamente. Mayores detalles sobre el modelo matemático de la prótesis puede verse en (Vivas y Aguilar, 2007; Quinayás, 2010). La cinemática de cada dedo está constituida por las siguientes articulaciones:

- Articulación metacarpofalángicas (MCP): el actuador está integrado en la palma y transmite el movimiento a través de un mecanismo de piñones (Figura 2), que permite la flexión/extensión de la falange proximal.
- Articulación interfalángica proximal (PIP): se utiliza el mismo esquema mecánico de la articulación MCP.
- Articulación interfalángica distal (DIP): se implementó una transmisión con una banda conectada desde la falange proximal a la falange distal y restitución por resorte, lo cual permite que a medida que se mueve la articulación PIP se flexoextensiona la articulación DIP conjuntamente.

En la Figura 2 se muestra el diseño del dedo en SolidEdge® y el equivalente dedo poliarticulado construido.

Figura 2. Dedo antropomórfico (diseño CAD y dedo real)



Fuente: presentación propia de los autores.

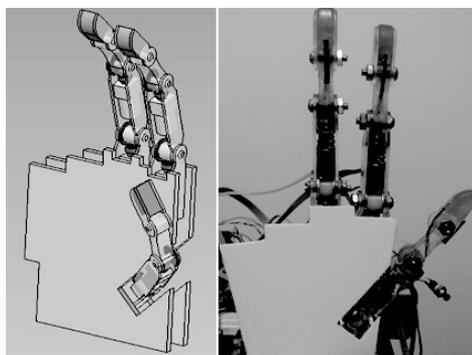
3. Diseño del prototipo

3.1 Diseño mecánico

Los principales parámetros considerados desde el inicio del diseño de la prótesis son los siguientes: funcionalidad, simetría corporal y peso. Para cumplir con estos requisitos y poder obtener una prótesis simple con gran destreza y adaptación se utilizaron micromotores con caja reductora en las articulaciones MCP y PIP y una transmisión con bandas a la articulación DIP, a diferencia de un solo gran actuador como la mayoría de las prótesis de mano actuales. Este esquema de diseño de dedos independientes articulados permite un cierre más ajustado alrededor del objeto, comparado con el que se obtiene con dedos rígidos.

La mano cuenta con una palma y tres dedos poliarticulados, dos dedos similares (dedo índice y medio) que pueden realizar flexoextensión y un dedo pulgar que, además de flexoextenderse, permite la prosupinación, la cual es indispensable para realizar el agarre trípode. Los dedos están ubicados por encima de la palma y el dedo pulgar se encuentra a un ángulo de 45° del plano sagital de la mano (Figura 3). En la Tabla 2 se muestran los datos técnicos del prototipo de mano UC-1.

Figura 3. Mano UC-1 (diseño CAD y prototipo real)



Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 2. Datos técnicos mano UC-1

| Tamaño | Mano adulta |
|------------------------------|-------------|
| Número de dedos | 3 |
| Número de grados de libertad | 9 |
| Peso (kg) | 0,130 |
| Número de sensores | 6+3 |
| Número de actuadores | 6 |

Fuente: presentación propia de los autores.

3.2 Sistema de actuadores

Con el fin de conservar las medidas antropométricas promedio de una mano humana, se ha integrado un micromotor de corriente continua en la palma, el cual motoriza la articulación MCP. Así mismo, se integró un motor en la falange proximal, el cual motoriza la articulación proximal-medial de cada dedo. Los actuadores seleccionados son los micromotores de corriente continua HP Pololu con reducción 298, dimensiones 2.387 cm × 1 cm × 1,2 cm, velocidad de 100 rpm, par de 6,5 kg.cm, que puede operar entre 3 y 9 V (Pololu, 2009).

4. Sensores de posición y de fuerza

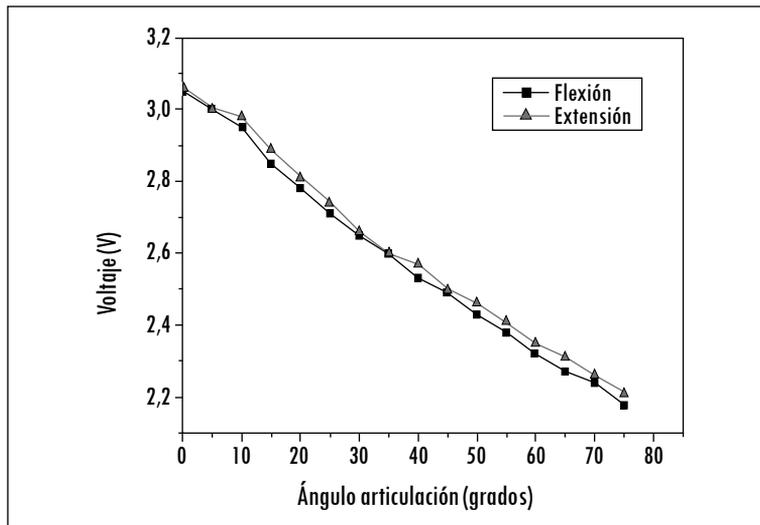
Una de las acciones más complejas que integran la actividad motora y sensorial es el hecho de agarrar algo con la mano. La fuerza que se emplea en la sujeción de un objeto está regulada por la información táctil (textura, presión y deslizamiento) en contacto con el objeto, y de esta manera se ejerce la fuerza necesaria

para sujetarlo sin que se resbale y sin producir un esfuerzo excesivo. Este tipo de control en algunas de las prótesis actuales se hace utilizando un sistema de visión; sin embargo, esto supone que el manejo de la prótesis no es posible sin utilizar un sistema de este tipo, lo cual complica su construcción y su manejo. Sensores de posición y de fuerza se implementaron en cada dedo con el propósito de aumentar la funcionalidad de la mano. Estos se describen a continuación.

4.1 Sensores de posición

Se implementó un sistema para medir la posición de las articulaciones por medio de sensores de efecto Hall HMC1501 y un imán, instalados en cada articulación activa de la mano. Las ventajas de estos sensores son su reducido tamaño y su principio de funcionamiento sin contacto. En cada dedo los sensores se ubican en las falanges metacarpiana y proximal, y los imanes se deben ubicar en las articulaciones móviles MCP y PIP. En esta configuración el sensor mide el movimiento angular del imán que está relacionado con la posición angular de la articulación. En la Figura 4 se muestra la respuesta del sensor para la flexión y extensión del dedo.

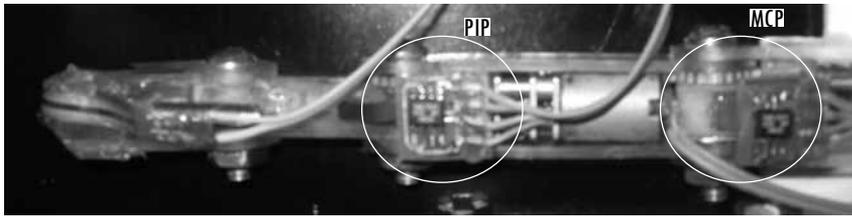
Figura 4. Curva de calibración del sensor de posición HMC1501



Fuente: presentación propia de los autores.

Los sensores de posición se fijaron en las articulaciones MCP y PIP de los dedos, y los imanes en las partes móviles, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Sensores magnéticos en las articulaciones MCP y PIP

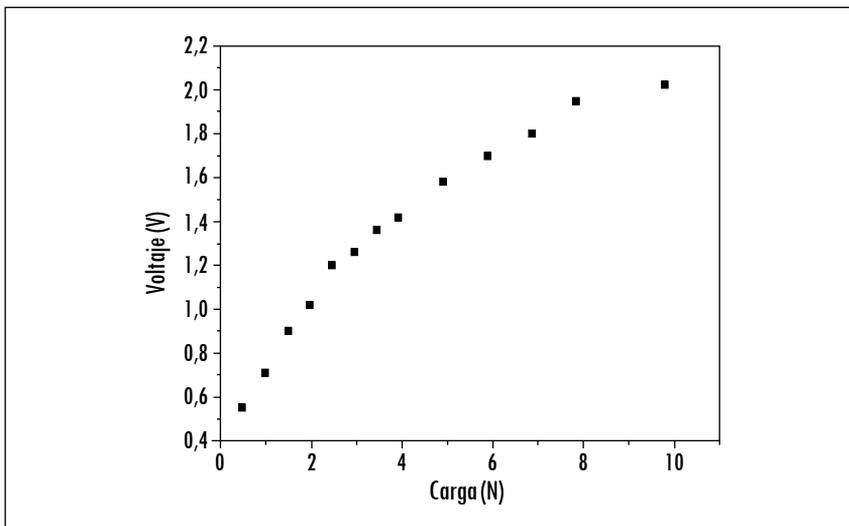


Fuente: presentación propia de los autores.

4.2 Sensor de fuerza

El sensor utilizado para medir la fuerza aplicada cuando los dedos de la prótesis tienen contacto con un objeto son los sensores de fuerza resistivos (FSR). La curva de calibración del FSR se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Curva de calibración del FSR



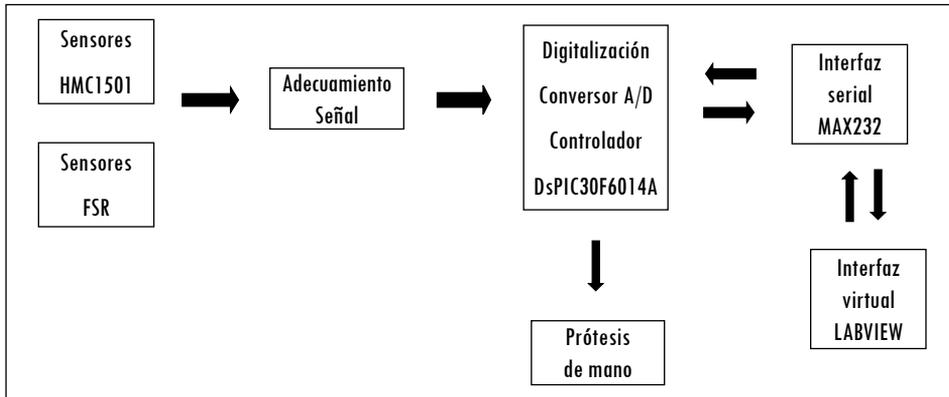
Fuente: presentación propia de los autores.

5. Interfaz de mando

En un dspic30f6014A se realizó un programa en lenguaje C que permite digitalizar las señales de los sensores, variar la velocidad de los motores de corriente continua a través de señales moduladas por ancho de pulso (PWM) y establecer una comunicación serial (RS232) *full* dúplex con una aplicación realizada en LabView®. En esta plataforma de programación gráfica se implementó una

interfaz de usuario que permite enviar órdenes al dspic30f6014A para que este efectúe los diferentes tipos de agarres en el prototipo de prótesis de mano. El esquema de la interfaz de la mano robótica se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Interfaz de la mano robótica



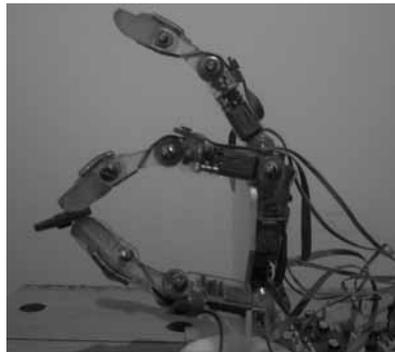
Fuente: presentación propia de los autores.

6. Resultados

La construcción del prototipo permitió validar los movimientos de agarre diseñados y ya probados en simulación. A continuación se describen con más detalle cada uno de los agarres realizados para objetos de geometría regular:

Pinza de precisión: postura que se logra cuando el dedo índice y el dedo pulgar se juntan (o el dedo índice, el dedo medio y el pulgar), para coger objetos y mantenerlos fijos cuando se necesita precisión (Figura 8).

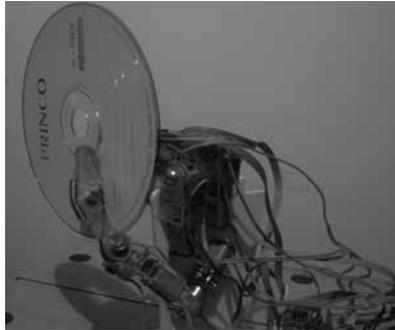
Figura 8. Agarre de pinza



Fuente: presentación propia de los autores.

Agarre lateral: en el cual el pulgar se cierra sobre el índice. Esta postura es utilizada para mantener objetos como una tarjeta o un CD (Figura 9).

Figura 9. Agarre lateral



Fuente: presentación propia de los autores.

Agarre de gancho: donde todos los dedos y el pulgar cierran de manera conjunta para crear un puño. Este agarre es utilizado para mantener una lata o sostener un maletín (Figura 10).

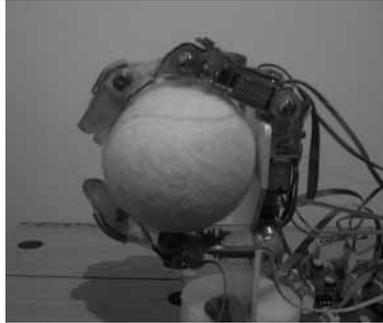
Figura 10. Agarre de gancho



Fuente: presentación propia de los autores.

Agarre esférico: se consigue rotando el pulgar en oposición directa al dedo índice (aducción palmar) en el caso de objetos esféricos más pequeños, y en diferentes grados de abducción palmar para objetos esféricos más grandes. Se utiliza para sujetar una pelota, una manzana u otros objetos redondos (Figura 11).

Figura 11. Agarre esférico



Fuente: presentación propia de los autores.

Agarre cilíndrico: se consigue rotando el pulgar totalmente en la posición de aducción o acercamiento palmar. Se utiliza para sujetar latas, maletines y bolsas de compra con un agarre totalmente envolvente del objeto (Figura 12).

Figura 12. Agarre cilíndrico



Fuente: presentación propia de los autores.

7. Conclusiones

El presente artículo mostró el diseño y la construcción de un primer prototipo de prótesis para amputados de mano, llamada UC-1. Dicha prótesis consta de tres dedos (medio, índice y pulgar), con tres grados de libertad en cada dedo. El modelado matemático se realizó teniendo en cuenta una estructura arborescente, con tres cadenas cinemáticas generadas desde la palma. Cada dedo posee dos micromotores para mover las falanges intermedia y proximal, mientras que un sistema con una banda permite el movimiento de la falange distal.

Esta disposición permite agarres complejos tipo pinza, lateral, gancho, esférico y cilíndrico. La construcción final permitió validar estos movimientos y observar el buen desempeño del prototipo. Las pruebas fueron realizadas gobernando la prótesis por medio del *software* LabView®, luego de haber implementado en un procesador digital de señales los respectivos algoritmos de control.

Otros investigadores involucrados con este proyecto están trabajando en la identificación y el tratamiento de las señales electromiográficas provenientes del antebrazo humano. Trabajos futuros integrarán la prótesis UC-1 con el sistema de identificación de movimientos antes de iniciar las pruebas directas en pacientes con amputación de mano.

Referencias

- BENNETT, D. J. y HOLLERBACH, J. M. Closed-loop kinematic calibration of the Utah-MIT hand. En *Lecture notes in control and information sciences*. Vol. 139. Berlin: Springer, 1990, pp. 539-552.
- CARROZZA, M. *et al.* Design of a cybernetic hand for perception and action. *Biological Cybernetics*. 2006, vol. 95, núm. 6, pp. 629-644.
- DARIO, P. *et al.* CYBERHAND-a consortium project for enhanced control of powered artificial hands based on direct neural interfaces. *33rd Neural Prosthesis Workshop*, Bethesda, USA, 2002.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). [Web en línea]. <<http://www.dane.gov.co>>. [Consulta: 14-07-2009].
- FUKAYA, N. *et al.* Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Takamatsu, Japan: IROS, 2000, pp. 1754-1759.
- GUZMÁN, A. y TORRES, V. *Pinzas y agarres privilegiados según perfil ocupacional en el diseño de una mano robótica*. Popayán: Editorial Universidad del Cauca, 2008.
- KHALIL, W. y DOMBRE, E. *Modeling, identification and control of robots*. London: Hermes Penton Science, 2002.
- LIU, H.; FAN, S. W. y CHEN, Z. P. Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT hand II. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and System*. Nice, France: IROS, 2008, pp. 3692-3697.
- MARTIN, T. B. *et al.* Tactile gloves for autonomous grasping with the NASA/DARPA Robonaut. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. New Orleans: ICRA 2004, pp. 1713-1718.
- MASON, M. T. y SALISBURY, J. K. Robot hands and the mechanics of manipulation. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1985, vol. 31, núm. 9, pp. 879-880.
- OTTO BOCK. [Web en línea]. <<http://www.ottobock.com>>. [Consulta: 23-02-2010].

- POLOLU ROBOTICS AND ELECTRONICS. [Web en línea]. <<http://www.pololu.com/catalog/category/51>> [Consulta: 14-07-2009].
- QUINAYÁS, C. *Diseño y construcción de una prótesis robótica de mano funcional adaptada a varios agarres* [Tesis de Maestría]. Popayán: Universidad del Cauca, 2010.
- SCHULZ, S. *et al.* A hydraulically driven multifunctional prosthetic hand. *Robotica*. 2005, vol. 23, núm. 3, pp. 293-299.
- TOUCH BIONICS. [Web en línea]. <<http://www.touchbionics.com>>. [Consulta: 14-07-2009].
- VIVAS, A. y AGUILAR, E. Modelado geométrico y dinámico de una prótesis de mano, III *IEEE Colombian Workshop on Robotics and Automation*, Cartagena, Colombia, 2007.
- YANG, J. *et al.* A multi-fingered hand prosthesis. *Mechanism and Machine Theory*, 2004, vol. 39, núm. 6, pp. 555-581.

