

# ACADEMIA

Accelerating the world's research.

# MECANISMOS DE TRANSMISIÓN Y ACTUADORES UTILIZADOS EN PRÓTESIS DE MANO

Jesus Manuel Dorador-Gonzalez

*somim.org.mx*

**Want more papers like  
this?**

[Download a PDF Pack of  
related papers](#)

[Search Academia's catalog of  
22 million free papers](#)

## MECANISMOS DE TRANSMISIÓN Y ACTUADORES UTILIZADOS EN PRÓTESIS DE MANO

Julio César Díaz Montes  
Jesús Manuel Dorador González

Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 04510.  
[ce\\_ssar@hotmail.com](mailto:ce_ssar@hotmail.com) [dorador@unam.mx](mailto:dorador@unam.mx)

### RESUMEN

*En los últimos años los diseñadores de prótesis de mano han utilizado una gran variedad de elementos para generar la potencia requerida (sistema de actuación) y transmitir esta potencia a los dedos y así generar el movimiento (sistema de transmisión).*

*En este trabajo se presenta el análisis y comparación de tres tipos de actuadores: eléctricos, hidráulicos y neumáticos, sus características principales así como las ventajas y limitaciones que presentan cuando son utilizados en prótesis de mano, también se mencionan los proyectos más importantes que hacen uso de estos actuadores.*

*Además se presentan las características más importantes de los elementos de transmisión que se utilizan en el diseño de estas prótesis.*

### ABSTRACT

*In recent years designers of prosthetic hands have used a wide variety of elements for generate the required power (actuation system) and for transmit this power and thus move the fingers of the hand (transmission system).*

*This paper presents the analysis and comparison of three types of actuators: electric, pneumatic and hydraulic, its main characteristics, advantages and limitations when these actuators are used in prosthetic hands, also cite the main projects which use it.*

*Moreover presents the more important characteristics of the transmission elements which prosthetic hands designers use in each project.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Una prótesis es una extensión artificial que reemplaza una parte faltante del cuerpo. Las hay de dos tipos, pasivas y activas; las primeras también suelen ser llamadas cosméticas ya que no tienen movimiento propio y su función es puramente estética, las prótesis activas se clasifican a su vez en mecánicas, eléctricas, neumáticas, mioeléctricas e híbridas. Las mioeléctricas se pueden dividir en sistema de actuación, de transmisión, de control y de suspensión (Figura 1). Este trabajo sólo se enfoca en la descripción de los sistemas de actuación y de transmisión, para cada uno de estos se describen sus características, ventajas, inconvenientes y en cuáles proyectos de prótesis de mano se están utilizando.

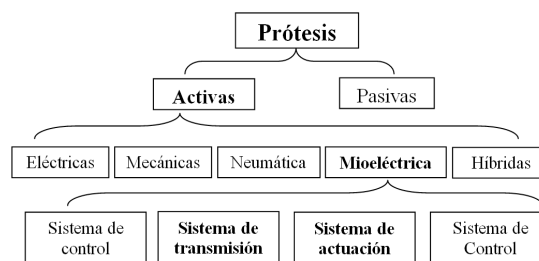


Figura 1. Una de las clasificaciones de prótesis[23].

### SISTEMA DE ACTUACIÓN

El sistema de actuación está compuesto básicamente por los elementos encargados de producir la potencia mecánica del sistema, estos elementos son comúnmente llamados actuadores, que son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquido, energía eléctrica o gaseosa. De acuerdo a esta definición podemos distinguir tres tipos de actuadores: hidráulicos, neumáticos y eléctricos (Como se muestra en la figura 2).

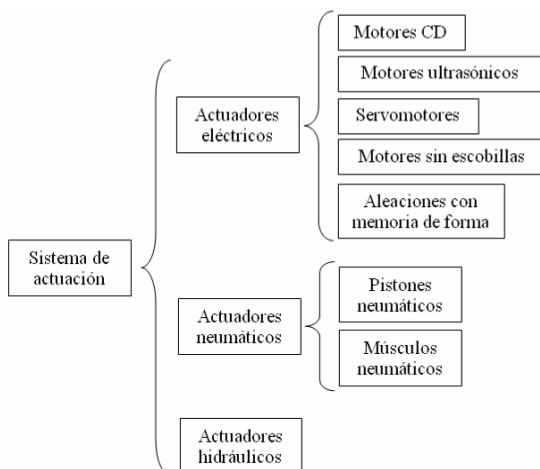


Figura 2. Actuadores analizados en este trabajo.

En la actualidad se han propuesto algunos sistemas de actuación para las prótesis comerciales, prototipos en desarrollo y manos robóticas antropomórficas. Estos sistemas se diferencian unos de otros no sólo en el principio de funcionamiento, ya que hay factores muy relevantes como el ruido, cantidad de energía consumida, tamaño, peso, eficiencia, potencia alcanzada, entre otros.

Los actuadores eléctricos son los más ampliamente usados por los diseñadores de prótesis de mano porque presentan una serie de ventajas sobre los otros tipos de actuadores, como alta eficiencia, gran disponibilidad y los tamaños compactos. Se dice que son eléctricos porque transforman la energía proveniente de una fuente eléctrica directamente en energía mecánica.

Dentro de los actuadores eléctricos el más común es el motor de corriente directa (CD), que está constituido por un estator y un rotor, el estator contiene uno o más devanados por cada polo, los cuales están diseñados para llevar intensidades de corriente directa que produce un campo magnético. El rotor y su devanado está ubicados en la trayectoria de este campo magnético y cuando el devanado lleva intensidad de corriente se desarrolla un par que hace girar el motor. Hay un conmutador conectado al devanado de la armadura, sin éste el motor solo podría dar una fracción de vuelta y luego se detendría.

Algunas de las ventajas de este tipo de motores son el buen rendimiento y fiabilidad, bajo costo, respuesta rápida, además si el voltaje aplicado en sus terminales es inverso el sentido de giro también lo es. Por otro lado producen fricción y

por consecuencia calor y ruido, generan chispas, el rotor está sujeto a fuerzas centrífugas y el par máximo se produce a altas velocidades.

Los motores CD son utilizados en proyectos como “CyberHand”[1] y “RTR II”[2] desarrollados en la Scuola Superiore Sant’Anna; “TBM Hand”[3] de la Universidad de Toronto; “I-Limb”[4] de la empresa Touch Bionics; “SensorHand”[24] de Otto Bock, “MYO Electric Hand”[25] de Centri.

Se ha notado una tendencia en el uso de estos motores en las manos protésicas debido a la gran disponibilidad y variedad, alta eficiencia y fácil manejo.

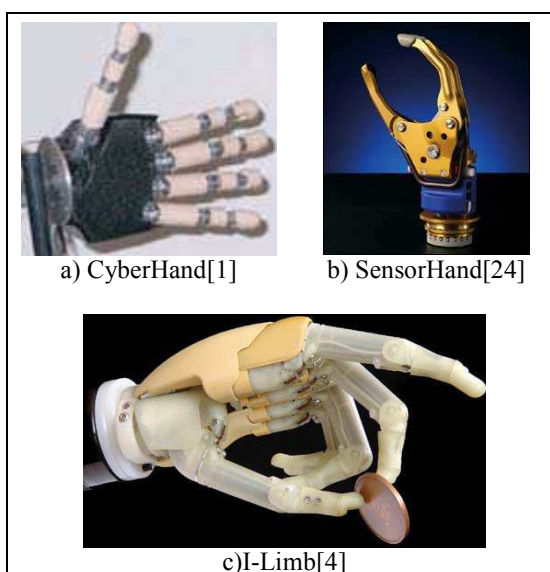


Figura 3. Algunas prótesis que utilizan motores CD.

Los servomotores son otro tipo muy común de actuadores, a grandes rasgos consiste en un motor CD, que permite situar el eje de salida en una determinada posición angular, mediante una señal externa de control. Está formado por carcasa, motor, engranes que reducen la velocidad del motor y aumentan el par de salida, circuito electrónico que controla la posición de salida, potenciómetro que se utiliza como sensor para conocer la posición del eje de salida. Por lo general un servomotor puede girar aproximadamente 180 grados.

Las ventajas que presenta son: relativamente fácil de controlar, puede ser conectado directamente a microcontroladores, su eje puede ser llevado a una posición específica, es eficiente. Sin embargo, algunas de sus desventajas son: que no gira de manera continua, para evitar interferencia en los circuitos electrónicos es conveniente conectar la

alimentación de los servomotores a una fuente diferente a la usada para los circuitos de control.

Son utilizados en el campo de las prótesis en proyectos como “Gifu Hand”[5] de la Universidad de Gifu en Japón. Desafortunadamente, al utilizar este tipo de motores se requiere que el movimiento completo del dedo se pueda realizar con el giro de  $180^\circ$  del eje de salida del servomotor. Cuando se utiliza este actuador ya no es necesario un sistema de reducción de velocidad.

También, dentro de los motores encontramos a los ultrasónicos, en particular a los rotativos de onda viajera, que son motores eléctricos formados principalmente por 4 componentes (rotor, estator, electrodo y material piezoeléctrico). El elemento encargado en generar las microdeformaciones a partir de un nivel de voltaje es el material piezoeléctrico, éste se encuentra adherido a un electrodo que se encarga de transmitir las señales de excitación, estos dos componentes se acoplan al estator que transmitirá el movimiento por fricción al rotor. El principio de funcionamiento de los motores ultrasónicos de onda viajera es el de crear un movimiento elíptico en el punto de contacto entre el rotor y el estator que da lugar al movimiento del motor. Sus ventajas son: elevado par a bajas velocidades, rápida respuesta y buena parada con lo que se logra una buena controlabilidad, funcionamiento silencioso, estructura simple, no le afectan campos magnéticos externos ni los genera, eficiencia insensible a la miniaturización. Sin embargo, sus principales desventajas son: necesita un suministro de potencia de alta frecuencia, bajo tiempo de vida útil debido a la alta fricción entre el estator y el rotor y la caída en las características par-velocidad con el tiempo.

Estos motores son usados como actuadores en proyectos como “Utah Arm”[6] de la empresa Motion Control y “MANUS Hand”[7], la primera es una prótesis existente en el mercado y la segunda fue desarrollada como mano robótica antropomórfica. El uso de motores ultrasónicos en prótesis de mano ha tenido poca aceptación entre los diseñadores debido principalmente a que tienen que ser alimentados por una fuente de potencia de alta frecuencia, y algo que hasta la fecha es limitado es la cantidad de energía que puede ser almacenada en las baterías que llevan las prótesis.

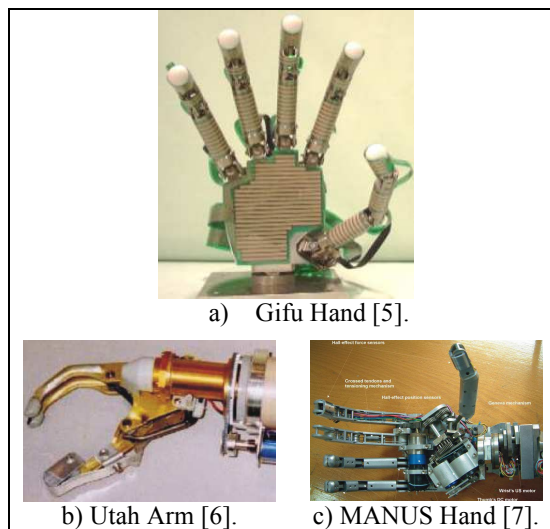


Figura 4. Prótesis que utilizan como actuadores  
a) servomotores, b) y c) motores ultrasónicos.

En los motores sin escobillas, a diferencia de lo que pasa en un motor CD convencional, los electroimanes no se mueven, en lugar de eso, los magnetos permanentes rotan y la armadura permanece estática. La mayor ventaja es que al no haber rozamiento entre los magnetos permanentes y la armadura generan menos calor y por lo tanto hay menor pérdida por fricción, mayor vida útil, mayor eficiencia, menor peso y no produce chispas. Sin embargo son más costosos que los motores CD convencionales, requieren de control más complejo y no giran al revés al cambiar la polaridad. Los proyectos más sobresalientes que hacen uso de este tipo de motores son “DLR Hand II”[8] del Centro Alemán de Investigaciones Aeroespaciales, “DLR/HIT Hand”[9] del Centro Alemán de Investigaciones Aeroespaciales en conjunto con el Instituto de Tecnología de Harbin, China, y “Robonaut Hand”[10] de la NASA. En este último menciona que se utilizan este tipo de motores para lograr una mayor vida útil.

En los últimos años se ha incrementado el uso de actuadores no convencionales, como es el caso de las aleaciones con memoria de forma (SMA), que se pueden considerar como actuadores eléctricos debido a que utilizan de este tipo de energía para su funcionamiento. Son aleaciones metálicas a las cuales estando a temperatura relativamente fría se deforman mediante la acción de una carga externa, una vez retirada la carga puede regresar a la forma que tenían originalmente mediante un simple calentamiento (generalmente se hace pasar una corriente eléctrica). Las ventajas más significativas que presentan cuando son utilizadas en prótesis son: la generación de movimientos

lineales, actuador muy ligero, pueden ser manufacturadas en casi cualquier forma y tamaño, tienen un alto nivel de recuperación plástica, resisten la corrosión y son estables frente a aplicaciones cíclicas. En cambio se requiere el manejo de temperaturas altas, tiene movimientos poco precisos, falta de control en el tiempo de enfriado y su eficiencia energética es baja. Este actuador es utilizado en la “SBC Hand”[11] del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Desafortunadamente debido a las características del actuador, se pronostica difícil su uso, por lo menos en algunos años, en prótesis de mano ya que el aumento de temperatura es un factor indeseable, además para lograr suficiente deformación como para lograr un movimiento completo de un dedo se requiere de una cantidad considerable de SMA, aumentando entre otras cosas la energía consumida. En la línea de investigación sobre diseño de prótesis inteligentes que se lleva a cabo en el CDMIT de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se realizaron pruebas con nitinol y se encontró que para mover cada articulación se consume un amper, por lo cual no resultan viables para manos protésicas, pero representan una solución interesante para manos robóticas.

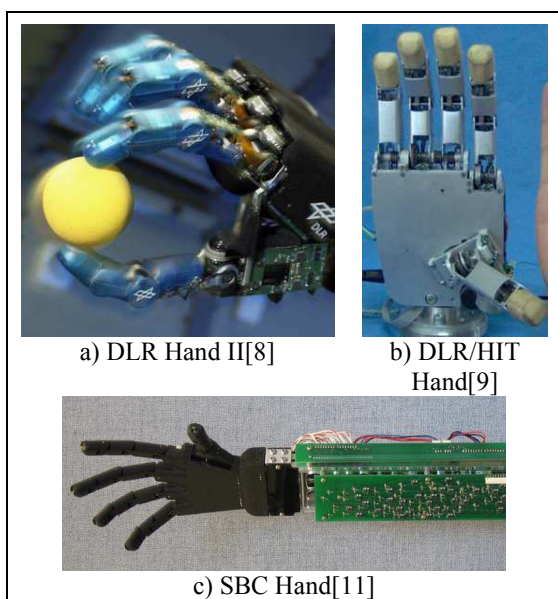


Figura 5. Manos que utilizan como actuadores,  
a) y b) motores sin escobillas, c) SMA.

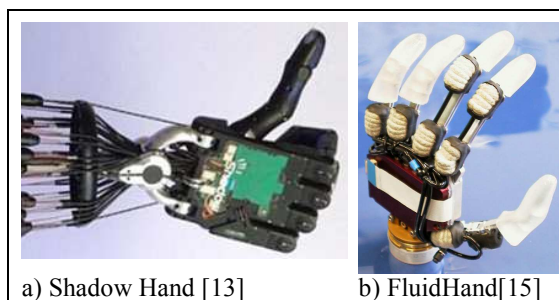
Otro de los grandes campos son los actuadores neumáticos, que por sus características no son tan usados para la generación de potencia en prótesis ya que presentan una serie de desventajas. Uno de estos actuadores es el llamado “músculo neumático” que consiste en un tubo de goma

cubierto por una red de plástico acomodada en forma de tijera (trenzada), cuando es inflado con aire comprimido a baja presión acorta su longitud ejerciendo una fuerza en ambos extremos del tubo. Algunas de las ventajas que presentan son el bajo peso, gran flexibilidad, ofrece un movimiento lineal, las desventajas principales cuando se emplean en prótesis son un difícil control, requiere de un sistema de compresión de aire además del riesgo de posibles fugas de fluido. Los músculos neumáticos se han empleado en proyectos como “Blackfingers”[12] desarrollado en el Politécnico de Milano; y “Shadow Hand”[13] de la Shadow Robot Company, ambos desarrollados como manos robóticas. Con este tipo de actuadores se pueden lograr movimientos suaves algo deseado por los diseñadores de prótesis, aunque su implementación no se ha dado debido a las obvias razones del peso y volumen del sistema de compresión de aire, ya que una de las principales cosas a tener en cuenta en el diseño de prótesis es el peso de ésta, en vista de que el paciente tiene que cargarla la mayor parte del día.

Otro proyecto que hace uso de energía neumática es el desarrollado por las universidades de Clarkson y de Vanderbilt[14]. Aquí se emplea un propelente de peróxido de hidrógeno como el gas generador de la potencia dentro de pistones neumáticos controlados mediante servoválvulas.

Finalmente encontramos a los actuadores hidráulicos, que dentro del campo de las prótesis de mano son escasamente utilizados. El único proyecto que a la fecha los utiliza es “FluidHand”[15] desarrollado en la Universidad de Karlsruhe que ha desarrollado a la medida tanto su bomba hidráulica de engranes externos como sus electroválvulas. La desventaja más clara es la necesidad de un sistema de bombeo, en cambio puede proporcionar movimientos lineales y suaves. A diferencia de los actuadores neumáticos, los hidráulicos tienen mejor futuro como mecanismos generadores de potencia porque ocupan menos espacio y se puede lograr más potencia. Desafortunadamente los elementos existentes en el mercado como bombas y electroválvulas aun son demasiado grandes para ser utilizados, por lo que es necesario realizar el diseño a la medida, como es el caso de la FluidHand.





a) Shadow Hand [13] b) FluidHand[15]  
Figura 6. Manos que utilizan energía neumática a) e hidráulica b).

En la Tabla A1 localizada en el apéndice se muestran las características más importantes de los actuadores rotatorios, para la realización de dicha tabla se compararon un gran número de actuadores de diversas marcas comerciales. En las características marcadas con \* los autores proponen una calificación de 1 a 10, en donde el número 10 indica el comportamiento más deseado cuando estos elementos son utilizados en prótesis de mano. En la Tabla A2 del apéndice se muestra la misma información pero para actuadores con movimiento lineal.

#### SISTEMA DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD

En el diseño de prótesis de miembro superior se debe lograr que los movimientos tanto de la mano como de los dedos sean lo suficientemente suaves para poder realizar las tareas con una mayor seguridad, desafortunadamente la mayoría de los actuadores utilizados como es el caso de los motores eléctricos trabajan a demasiada velocidad, es por eso que se hace necesario el uso de mecanismos que la reduzcan además de que aumenten el par de salida (Figura 7).

Hasta la fecha los mecanismos reductores de velocidad que se han utilizado más ampliamente en el diseño de prótesis son los constituidos por engranes, que son ruedas dentadas que transmiten movimiento circular mediante el contacto de los dientes entre dos de ellas. Estos engranes pueden ser fabricados por varios procesos y de una gran variedad de materiales.

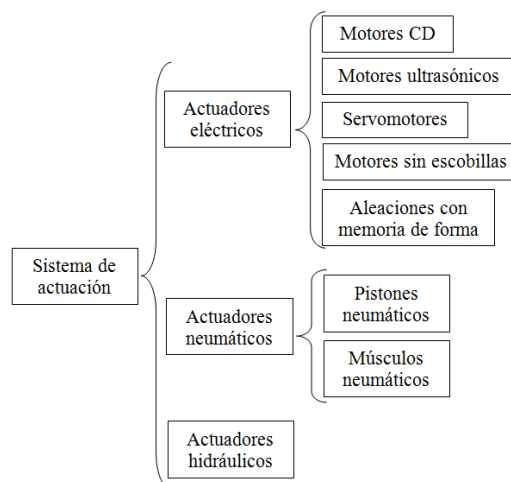


Figura 7. Sistemas de transmisión analizados en este trabajo.

Por lo general un par de engranes no logra el objetivo de disminuir considerablemente la velocidad de salida y aumento de la potencia, por lo que se utiliza un tren de engranes.

Los engranes rectos tienen el diseño más sencillo, gran variedad de tamaños, enorme disponibilidad, se pueden fabricar de una gran variedad de materiales, sus medidas están estandarizadas, exactitud en la relación de transmisión, son durables y resistentes, sin embargo para poder unir dos ejes mediante engranes los primeros deben estar totalmente paralelos entre sí y a una distancia suficientemente cerca para lograr el contacto directo entre los dientes de los engranes. La reducción de velocidad mediante este tipo de engranes se ha propuesto en proyectos como “TBM Hand”[3] en la Universidad de Toronto, “Southampton-Remedi Hand”[16] de la Universidad de Southampton, “Centri”[25] creada por la empresa del mismo nombre y “DIST Hand”[18] de la Universidad de Genova.

En prótesis de mano, cuando se utiliza un motor con alta velocidad en el eje de salida, los engranes son los preferidos por los diseñadores, sin embargo se tiene que considerar que los ejes que se unen deben estar paralelos entre sí.

El otro tipo de arreglo para la reducción de velocidad es mediante engranes planetarios, que consisten en uno o más engranes externos (llamados satélites) que rotan sobre un engrane central, por lo general los satélites se montan sobre un brazo móvil que a su vez puede rotar sobre el engrane central, también pueden incorporar el uso de un engrane externo (corona)

sobre el cual se acoplan los satélites. Cada uno de estos componentes puede ser la entrada, la salida o estar estacionario.

Algunos de los proyectos que se han inclinado por el uso de este arreglo para lograr la reducción de velocidad son “CyberHand”[1] y “RTR II”[2] ambos de la Scuola Superiore Sant’Anna, “DLR Hand II”[8] del Centro Alemán de Investigaciones Aeroespaciales, “Robonaut Hand”[10] desarrollado por la NASA y “Utah Arm”[6] comercializado por la empresa Motion Control. La ventaja más significativa en el empleo de estos dispositivos es la gran reducción de velocidad en un espacio muy compacto.

### MECANISMOS PARA MOVER LOS DEDOS

Ya se han mencionado brevemente los mecanismos más utilizados por los diseñadores de prótesis de mano para generar la potencia y los mecanismos para reducir la velocidad, así como unas cuantas características importantes. En esta sección se describirán los mecanismos más destacados que se utilizan para generar el movimiento de los dedos y lograr la flexión-extensión y en algunos casos la oposición del pulgar.

Uno de los sistemas más antiguos y más ampliamente utilizados en el campo de las prótesis para lograr este movimiento de flexión-extensión en los dedos es mediante el uso de cables y poleas. En la mayoría de los casos las poleas se encuentran ubicadas en las articulaciones, sobre ellas pasa un cable que está fijo por uno de sus extremos en alguna falange, por lo general en la última (distal), el otro extremo del cable está conectado a la salida del sistema de actuación o si es el caso al de reducción. Cuando es aplicada una carga, del sistema de actuación al cable, éste último se desliza a través de la polea y mueve la falange y por consecuencia la articulación del dedo.

En algunos proyectos se ha optado por usar un solo cable en cada dedo para lograr la flexión (conectado a la falange distal), eso trae como beneficio inmediato la disminución en el número de actuadores, aunque por otro lado se requiere de otro dispositivo que produzca la extensión del dedo, la tendencia para resolver este inconveniente es el uso de resortes a torsión ubicados en las articulaciones, como es el caso de proyectos como “Cyberhand”[1], “RCH-1”[19] y “RTR II”[2] de la Scuola Superiore Sant’Anna y “Icub Hand”[20]. Se emplea este arreglo debido a la sencillez en su funcionamiento, alta flexibilidad

y ligereza, sin embargo sus principales inconvenientes son que solo puede utilizarse en tensión, solo puede transmitir cargas relativamente pequeñas y se tiene que ajustar periódicamente la tensión en el cable. Además, se requiere que el sistema de actuación produzca un movimiento lineal, provocando con eso la utilización de un componente adicional que transforme el movimiento rotativo en lineal. Sin embargo presenta una característica que resulta sumamente útil para las manos protésicas, mediante el uso de cables y poleas los dedos se pueden adaptar de mejor manera a la forma de los objetos logrando un mejor agarre.

Otra manera de lograr el movimiento de los dedos es a través de cables pero en arreglo antagónico, es decir, un cable produce el movimiento en una dirección y otro cable lo produce en el sentido opuesto. Para esto se requiere por lo general un actuador para cada cable lo que trae como desventaja inmediata el aumento en la cantidad de actuadores. Este arreglo es usado en los proyectos “MANUS Hand”[7], “Blackfingers”[12] del Politécnico de Milano, “UB Hand 3”[17] desarrollado en la Universidad de Bologna y “Shadow Hand”[13] creado en Shadow Robot Company. Con este tipo de arreglo se logra controlar tanto la velocidad de flexión como de extensión de los dedos.

También se ha logrado el movimiento de los dedos mediante mecanismo compuestos por barras, que es una secuencia cerrada de eslabones conectados por articulaciones, el más común y más fácil de analizar es el de 4 barras. La razón principal para usarlos es porque mediante este mecanismo se puede lograr generar una trayectoria específica para uno o más puntos del mecanismo y esto se puede utilizar para lograr la trayectoria deseada en alguna de las falanges y así simular la trayectoria del dedo humano en un movimiento de flexión, además se logra buena precisión en los movimientos con mecanismos sencillos que pueden ser fabricados de una amplia variedad de materiales, desafortunadamente este mecanismo genera movimientos sobre un plano y si no se realiza un buen diseño el mecanismo puede tener posiciones de bloqueo. En las prótesis de mano no se utiliza un solo mecanismo de este tipo para lograr el movimiento de los dedos, realmente se utiliza una serie de eslabones que pueden ser considerados como un conjunto de mecanismos de 4 barras. Los proyectos en los cuales alguno de los dedos es movidos por mecanismos de barras son “Goldfinger”[21] desarrollado ya hace algunos años en la

Universidad de Clemson, "HIT/DLR Hand"[9] del Centro Alemán de Investigaciones Aeroespaciales en conjunto con el Instituto de Tecnología de Harbin, "Oxford Hand"[22], "Robonaut Hand"[10] de la NASA, "TBM Hand"[3] desarrollado en la Universidad de Toronto, "Southampton-Remedi Hand"[16] de la Universidad de Southampton, "Centri"[25] comercializado por la empresa que lleva el mismo nombre y "Gifu Hand"[5] de la Universidad de Gifu en Japón. A diferencia de lo que pasa con los cables, los mecanismos de barras pueden funcionar cuando son alimentados con movimientos tanto circulares como rectos.

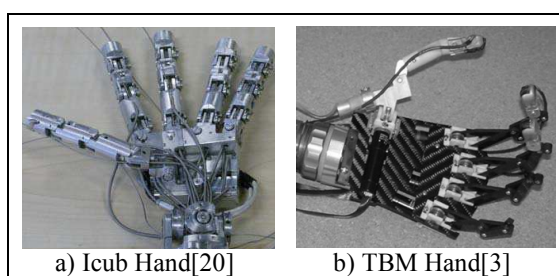


Figura 8. Mecanismos para mover los dedos mediante a) cables, b) barras.

Además de los elementos mecánicos, se han propuesto otros sistemas poco convencionales para mover los dedos, este es el caso del proyecto "FluidHand"[15] que emplea energía hidráulica. La mano está constituida básicamente por un sistema de bombeo, electroválvulas y actuadores fluidicos. La bomba envía el fluido (aceite sintético) a presión hacia todo el sistema, las electroválvulas se encargan de distribuir esta presión, según se desee, hacia los diferentes actuadores fluidicos flexibles que se encuentran en las articulaciones, estos actuadores flexibles consisten en una cámara elástica reforzada y cerrada, cada uno de sus extremos tiene un accesorio sólido que está unido a su vez a las palancas de la articulación, los accesorios sólidos están equipados con conectores para la línea de fluido. Cuando el actuador es inflado con el fluido se ejerce una fuerza en el accesorio sólido que mueve a la articulación y por consiguiente al dedo. Aunque es un campo poco aplicado a prótesis de mano, este tipo de tecnología es muy prometedora, ya que, entre otras cosas produce movimientos suaves, característica difícil de lograr con otro tipo de elementos como motores.

En la Tabla A3 del apéndice se muestran las características más importantes de los sistemas de transmisión, para la realización de dicha tabla se compararon un gran número de elementos de

transmisión de diversas marcas comerciales. En las características marcadas con \* los autores proponen una calificación de 1 a 5, en donde el número 5 indica el mejor comportamiento.

#### PROPUESTAS PARA UNA PRÓTESIS QUE PROPORCIONE PRECISIÓN Y FUERZA

En el CDMIT de la Facultad de Ingeniería de la UNAM se tiene una línea de investigación sobre diseño de prótesis inteligentes, se pretende diseñar una prótesis funcional, la cual tenga entre otras características la de, con el mismo elemento terminal realizar tareas que requieran tanto de precisión como de fuerza (característica que a la fecha no presenta ninguna prótesis en el mundo), es por eso que se ha realizado una extensa búsqueda bibliográfica de los elementos principales con los cuales se logra esto, que son el sistema de actuación, de reducción de velocidad y el de transmisión.

Después de haber analizado los sistemas de actuación, reducción de velocidad y transmisión se ha llegado a algunas conclusiones que servirán para lograr que la prótesis tenga tanto precisión como fuerza.

El uso de servomotores no es viable debido a que ya tiene integrado su sistema de reducción de velocidad y no puede realizar un giro completo del eje de salida, limitando con eso el rango de movimiento que es aprovechado por el sistema de transmisión. Las aleaciones con memoria de forma consumen demasiada corriente, por lo tanto tampoco tienen un uso práctico en prótesis. Para utilizar energía neumática se requiere de un sistema de compresión de aire muy voluminoso para ser utilizado en una prótesis de mano. El uso de energía hidráulica es una forma muy prometedora para producir potencia, sin embargo los actuadores comerciales que existen a la fecha son demasiado grandes y no pueden ser utilizados en prótesis.

El actuador ideal para lograr precisión y fuerza se encuentra englobado en los eléctricos, más específicamente un motor CD o un motor sin escobillas, la ventaja que tiene el primero sobre el segundo es la disponibilidad de tamaños y capacidades además de un menor costo. Sin embargo el motor si escobillas es más eficiente y tiene una mayor vida útil.

En cuanto al sistema de transmisión de velocidad, el tren de engranes planetario es el más adecuado



para lograr una mayor reducción de velocidad y aumento de torque en un espacio muy reducido, siendo ideal para lograr la característica de precisión y fuerza en la prótesis de mano.

La elección de los mecanismos de transmisión de potencia hacia los dedos se debe hacer principalmente en base a dos criterios que a simple vista parecen opuestos, por una lado se requiere que los dedos sean lo suficientemente rígidos para sujetar los objetos de forma segura, y por el otro deben ser flexibles para adaptarse de mejor manera a la forma del objeto y así poder disminuir la fuerza requerida para sujetarlo. Sin embargo estas características no son excluyentes una de la otra debido ya que se puede lograr mediante arreglos con barras una gran rigidez, y se puede diseñar este arreglo de tal manera que la trayectoria del dedo en un movimiento de flexión pueda adaptarse mejor a la forma de los objetos logrando con esto una mayor superficie de contacto. Este mecanismo de barras debe ser complementado con el diseño de la geometría de la palma para asir de manera aun más segura los objetos.

## CONCLUSIONES

Después de una extensa revisión de la información que a la fecha han surgido sobre prótesis de mano, se sabe que la generación de potencia en dichas prótesis ha ido aumentando debido principalmente a que los actuadores se han hecho más eficientes, más potentes y más ligeros, esta tendencia continuará en los próximos años.

Además de la mejora en los actuadores que se han usado en prótesis de mano, se han propuesto y desarrollado otro tipo de actuadores no convencionales como el caso de las aleaciones con memoria de forma o los actuadores hidráulicos, éstos últimos con un futuro prometedor debido a las ventajas que presentan.

En el diseño de prótesis de mano, la elección del sistema de actuación es de gran importancia ya que en base a eso se definen otros componentes como las baterías ya que varía la capacidad y cantidad de éstas, influye también en el tipo de sistema de transmisión y de reducción de velocidad.

Hasta la fecha no existe un actuador que cumpla totalmente con los requerimientos de una prótesis de mano, es por eso que los diseñadores tienen que inclinarse solo por algunas características, ya sea bajo peso, bajo consumo de energía, precisión en los movimientos, entre otros.

En la actualidad, el actuador más utilizado en prótesis de mano es el motor CD debido a la alta eficiencia, gran variedad y disponibilidad. El sistema reductor de velocidades más usado es mediante tren de engranes rectos. El sistema de transmisión preferido por los diseñadores es el constituido por barras.

En las prótesis de mano se busca que los dedos tengan suficiente rigidez para sujetar los objetos de forma segura pero también requieren hasta cierto punto de flexibilidad que permita a la mano adaptarse mejor a la forma de los objetos, problema que actualmente no se ha solucionado por completo.

Los diseñadores de prótesis de mano se han inclinado en su totalidad por el diseño de una prótesis que pueda brindar movimientos precisos, dejando a un lado otra característica importante como lo es la fuerza alcanzada por la prótesis.

## RECONOCIMIENTOS

Este artículo se realiza en el marco del proyecto PAPIIT-DGAPA IN110809-3: Diseño y caracterización de prótesis de miembro inferior y superior.

## REFERENCIAS

- [1] M. C. Carrozza, G. Cappiello, S. Micera, B. B. Edin, L. Beccai, C. Cipriani, "Design of a cybernetic hand for perception and action", *Biological Cybernetics*, 95:629-644, 2006.
- [2] B. Massa, S. Roccella, M. C. Carrozza, P. Dario, "Design and Development of an Underactuated Prosthetic Hand", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3374-3379, 2002.
- [3] N. Dechev, W.L. Cleghorn, S. Naumann, "Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand", *Mechanism and Machine Theory*, 36, 1157-1173, 2001.
- [4] C. Connolly, "Prosthetic hands from Touch Bionics", *Industrial Robot: An international Journal* 35/4, 290-293, 2008.
- [5] Tetsuya Mouri, Haruhisa Kawasaki, Keisuke Yoshikawa, Jun Takai, Satoshi Ito, "Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III", *ICCAS, Jeonbuk, Korea, 1288-1293*, 2002.
- [6] Edwin K. Iversen, James R. Linder, Harold H. Sears, "Prosthetic arm powered by an ultrasonic motor", Patent No. US 6 424 886 B1, 2002.

- [7] J. L. Pons, E. Rocon, R. Ceres, D. Reynaerts, B. Saro, S. Levin, W. Van Moorleghem, "The MANUS-HAND\* Dextrous Robotics Upper Limb Prosthesis: Mechanical and Manipulation Aspects", *Autonomous Robots* 16, 143–163, 2004
- [8] J. Butterfaß, M. Fischer, M. Grebenstein, S. Haidacher, G. Hirzinger, "Design And Experiences With DLR Hand II", *Tenth International Symposium on Robotics with Applications*, Seville, Spain, 2004.
- [9] D.W. Zhao, L. Jiang, H. Huang, M.H. Jin, H.G. Cai, H. Liu, "Development of a Multi-DOF Anthropomorphic Prosthetic Hand", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 878-883, 2006
- [10] C. S. Lovchik, M. A. Diftler, "The Robonaut Hand: A Dexterous Robot Hand For Space", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 907-912, 1999
- [11] Kyu-Jin Cho, Josiah Rosmarin and Harry Asada, "SBC Hand: A Lightweight Robotic Hand with an SMA Actuator Array implementing C-segmentation", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 921-926, 2007.
- [12] Jimmy W. Soto Martell, and Giuseppina Gini, "Robotic Hands: Design Review and Proposal of New Design Process", *Proceedings Of World Academy Of Science Engineering And Technology*, Volume 20, 1307-6884, 2007.
- [13] Shadow Dextrous Hand - Technical Specification, 2006.
- [14] Kevin B. Fite, Thomas J. Withrow, Xiangrong Shen, Keith W. Wait, Jason E. Mitchell, Michael Goldfarb, "A Gas-Actuated Anthropomorphic Prosthesis for Transhumeral Amputees", *IEEE Transactions On Robotics*, Vol. 24 No. 1, 159-169, 2008
- [15] A. Kargov, T. Werner, C. Pylatiuk, S. Schulz, "Development of a miniaturised hydraulic actuation system for artificial hands", *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 141, Issue 2, 548-557, 2008.
- [16] C.M. Light, P.H. Chappell, "Development of a lightweight and adaptable multiple-axis hand prosthesis", *Medical Engineering & Physics* 22, 679–684, 2000.
- [17] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura L. Biagiotti, G. Palli, C. Melchiorri, "Development of UB Hand 3: Early Results", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4488-4493, 2005
- [18] Andrea Caffaz, Giorgio Cannata, "The Design and Development of the DIST-Hand Dextrous Gripper", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2075-2080, 1998.
- [19] Massimiliano Zecca, Stefano Roccella, Giovanni Cappiello, Kazuko Ito, Kazutaka Imanishi, Hiroyasu Miwa, M. Chiara Carrozza, Paolo Dario, Atsuo Takanishi, "From the Human Hand to a Humanoid Hand: Biologically-Inspired Approach for the Development of RoboCasa Hand #1" disponible en [www.robocasa.net](http://www.robocasa.net)
- [20] G. Stellin, C. Cipriani, F. Zaccane, M. C. Carrozza, C. Laschi, P. Dario, "Design of an Anthropomorphic Dexterous Hand for a 2-Years-Old Humanoid: Ongoing Work" Disponible en [www.robotcub.org](http://www.robotcub.org)
- [21] Ann M. Ramos, Ian A. Gravagne, Ian D. Walker, "Goldfinger: A Non-Anthropomorphic, Dextrous Robot Hand", *Proceedings IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 913-191, 1999.
- [22] P. J. Kyberd, J. L. Pons, "A Comparison of the Oxford and Manus Intelligent Hand prostheses", *Proceedings of the IEEE International Conference Robotics & Automation*, 3231-3236, 2003.
- [23] G. Trebes, W. Uribe, "Prótesis del miembro superior. Entrenamiento fisioterápico del amputado", *Ediciones Toray S.A. Barcelona*, 1973:1- 40.
- [24] [www.ottobock.com](http://www.ottobock.com)
- [25] [www.centri.se](http://www.centri.se)

## APÉNDICES

TIPO DE ACUADOR	Motor eléctrico	Motor a pasos	Motor ultrasónico	Servo con motor eléctrico convencional	Servo con motor sin núcleo	Servo con motor sin escobillas
Peso/Costo *	8	7	4	8	8	5
Torque/Costo *	9	8	5	9	10	6
Torque/Peso *	8	6	7	8	9	10
Disponibilidad en el mercado *	10	9	6	10	10	8
Confiabilidad *	8	9	7	10	10	10
Vida útil *	7	8	4	7	8	10
Flexibilidad y acoplamiento directo a otros sistemas mecánicos *	6	7	7	7	7	7
Cuidados y mantenimiento *	7	8	8	8	8	10
Ruido producido en relación al tamaño del actuador *	7	7	7	7	7	9
Eficiencia (%)	< 80	< 80	<50	< 80	< 90	< 95
Peso Mínimo	gr	dgr	gr	dgr	gr	gr
Tamaño mínimo	mm	cm	mm	cm	cm	cm
Temperatura de operación (°C)	-20 - 85	-20 - 85	-10 - 50	-20 - 85	-20 - 85	-20 - 85
Máxima temperatura alcanzada (°C)	125 (En rotor)	85 (En superficie)	55 (En superficie)	125 (En rotor)	125 (En el rotor)	75 (En superficie)
Precisión	-	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado
Tipo de energía utilizada	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA
Tipo de movimiento	Rotatorio	Rotatorio	Lineal/Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio
Actuación bidireccional	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Requerimiento de aditamentos adicionales	No	No	No	No	No	No
Movimientos amortiguados	No	No	No	No	No	No

\*La clasificación se hace de 1 a 10. 10 indica el mejor comportamiento.

Tabla A1. Características de los actuadores rotatorios

Tipos de actuadores	Aleaciones con memoria de forma	Músculos neumáticos	Pistón eléctrico actuado por SMA	Pistón hidráulico (Solo el actuador)	Pistón neumático (Solo el actuador)
Peso/Costo *	10	7	9	6	7
Fuerza lograda/Peso *	8	9	6	10	8
Fuerza lograda/Costo *	7	9	6	10	8
Disponibilidad en el mercado *	6	4	6	10	10
Confiabilidad *	4	6	5	7	6
Vida útil *	4	7	4	7	7
Flexibilidad y acoplamiento directo a otros sistemas mecánicos *	9	8	9	8	8
Cuidados y mantenimiento *	6	6	6	8	8
Ruido producido en relación al tamaño del actuador *	10	8	9	8	8
Eficiencia (%)	<10	<40	<10	< 85	< 85
Peso Mínimo	dgr/m	dgr	gr.	dgr	dgr
Tamaño mínimo	Ø µm	Ø mm	cm	cm	cm
Temperatura de operación (°C)	-	0 - 50	-75 - 75	**	**
Máxima temperatura alcanzada (°C)	>500	-	-	**	**
Precisión	µm	mm	µm	mm	mm
Tipo de energía utilizada	CD/CA	-	CD/CA	-	-
Tipo de movimiento	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal
Actuación bidireccional	Si	No	No	Si	Si
Requerimiento de aditamentos adicionales	No	Si	No	Si	Si
Movimientos amortiguados	Si	Si	Si	Si	Si

\*La clasificación se hace de 1 a 10. 10 indica el mejor comportamiento.

Tabla A2. Características de los actuadores lineales.

Dispositivo	Tamaño mínimo	Eficiencia máxima	Capacidad de transmisión de potencia*	Resistencia mecánica*	Precisión en los movimientos*	Facilidad de ensamble*	Componentes adicionales	Continuidad en el movimiento*	Mantenimiento*	Relación de transmisión máxima	Disponibilidad en el mercado*
Cadenas	mm	98%	5	5	4	3	No	3	2	10:1	5
Correas	mm	98%	3	3	4	4	No	3	4	15:1	5
Engranajes	mm	99%	5	5	5	2	No	5	3	100:1	5
Levas	---	---	5	5	5	4	Si	5	3	---	4
Tornillo sinfín	---	98%	5	5	5	3	No	5	3	360:1	4
Piñón-cremallera	---	---	5	5	5	4	No	5	4	---	5
Barras	---	---	5	5	5	4	No	3	5	---	---
Ruedas de fricción	---	---	2	2	3	5	No	3	4	---	4
Cables Bowden	µm	---	3	4	4	5	Si	4	4	---	5
Junta universal	mm	94%	5	5	3	4	Si	4	4	---	5
Cable-polea simple	mm	---	3	4	4	5	No	4	4	---	5

\*La clasificación se hace de 1 a 5. 5 indica el mejor comportamiento.

Tabla A3. Características de los sistemas de transmisión.