

# Síntesis de un mecanismo subactuado a partir de la función decriptiva del dedo índice

Velázquez-Sánchez A. T.<sup>1</sup>  
Lugo-González. E.<sup>1</sup>  
Torres-San-Miguel C.<sup>1</sup>  
Merchán-Cruz E. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco. Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Lindavista Del. Gustavo A. Madero C. P. 07833 México, D.F.

<sup>2</sup>Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco. Instituto Politécnico Nacional, Av. De las Granjas No. 682 Col. Santa Catarina C. P. 02250 Del. Azcapotzalco, México, D.F. MÉXICO.

Correo electrónico: <sup>1</sup>alexrobsis@hotmail.com  
<sup>2</sup>eamerchan@ipn.mx

Recibido el 19 de agosto de 2008; aceptado el 21 de enero de 2009.

## 1. Resumen

El presente trabajo muestra la síntesis dimensional de un mecanismo sub-actuado empleado en dedos robóticos multi-articulados. En este trabajo se establece el tipo de mecanismo, el número de elementos y las dimensiones del mismo de acuerdo a la trayectoria descrita por el dedo índice de la mano, durante el agarre cilíndrico. Las ecuaciones de diseño del mecanismo se establecen a partir de la aproximación de la función descrita por el dedo índice, auxiliándose de los puntos de precisión y de los mecanismos planos de cuatro barras. La solución y optimización numérica del mecanismo sub-actuado se obtiene considerando un desacoplo cinemático entre las articulaciones del dedo, la información que proporciona las funciones descriptivas, el índice de movilidad y la trayectoria del dedo. En el desarrollo de este trabajo se presenta un análisis comparativo entre la trayectoria descrita por el mecanismo sub-actuado, las funciones descriptivas y comportamiento experimental del dedo durante el agarre cilíndrico, mostrando

que la síntesis del mecanismo sub-actuado es admisible, ya que el error porcentual de la trayectoria generada es mínimo.

**Palabras clave:** dedo robótico, multi-articulado, síntesis de mecanismo, función descriptiva.

## 2. Abstract

This work shows a dimensional synthesis of an under-actuated mechanism used in multi-articulated robotic fingers. This paper determines the type of mechanism, the number of elements and dimensions of each one, according to the described trajectory by the index finger during a cylindrical grip. The equations of the mechanism are set out from the approximation of the index finger function. The numerical solution and optimization of the under-actuated mechanism is carried out considering a kinematic decoupling finger. The information provides a descriptive function, the mobility index and the trajectory of the finger. This work shows a comparative analysis among the path followed by the under-actuated mechanism, the descriptive functions and the behavior of index finger during the cylindrical grip, showing that the synthesis of the mechanism under-actuated is feasible, because the error of the generated trajectory is minimum.

**Key words:** robotic finger, multiarticulated, mechanical synthesis, descriptive function.

## 3. Introducción

Los manipuladores robóticos son capaces de realizar una tarea determinada de forma adecuada únicamente cuando son equipados con la herramienta correcta y el método de agarre apropiado [1, 2]. El diseño de dichas tareas requiere del conocimiento de varios aspectos interrelacionados como son: el diseño o estructura mecánica del efector final, fuerza, posición, rigidez, destreza del control y la configuración de agarre.

Con el objetivo de realizar tareas más precisas y que el manipulador robótico pueda cubrir un amplio campo de trabajo,

se han ido incorporando manos robóticas como efector final. Varias manos mecánicas cuentan con múltiples dedos, cada uno con un número determinado de articulaciones, tratando de emular las funciones de la mano humana [3-5].

Algunos mecanismos que se emplean para reproducir éstas funciones, comprenden mecanismos de cuatro barras, combinaciones de polea y banda, así como los mecanismos de cadenas cinemáticas abiertas que simulan los movimientos de los dedos, entre otros [6-8]. Se han realizado trabajos relacionados con manos robóticas de múltiples dedos, de forma antropomórfica, con mecanismos sub-actuados e incluso con un control muy sofisticado.

Los dedos robóticos antropomórficos, al igual que los dedos de la mano, poseen tres eslabones que funcionan como falanges Proximal, Media y distal, respectivamente, cada una con tres articulaciones o grados de libertad [7, 9]. Cuando se emplea un actuador o elemento motriz para proporcionar movimiento independiente a cada una de las articulaciones se tiene un sistema actuado, por el contrario, cuando el movimiento de las falanges es proporcionado únicamente por un actuador, se dice que se tiene un sistema sub-actuado [10].

Los mecanismos actuados y sub-actuados presentan ventajas y desventajas uno con respecto al otro, es decir, el mecanismo subactuado es capaz de generar únicamente una función o trayectoria, para la cual está diseñado y muy difícilmente se podrá ejecutar algún otro tipo de agarre (cilíndrico, palmar, puntual, esférico, etc.), ya que es necesario reconfigurar físicamente la estructura del mecanismo. Por otra parte, los mecanismos actuados permiten realizar los diversos tipos de agarre, aunque el control involucrado en esta configuración posee un mayor grado de complejidad [4, 6, 9-12].

Éstos son algunos de los trabajos que se han presentado con respecto al diseño de dedos robóticos multiarticulados y que describen básicamente los tipos de mecanismos empleados, destacando los sistemas actuados, subactuados y semi-subactuados, de acuerdo a la transmisión del movimiento y el accionamiento de los mismos, así como los estudios realizados para la obtención de parámetros cinemáticos de los dedos índice y pulgar, que permiten el diseño de mecanismos subactuados en función de dichos parámetros, como se muestra en [13-17].

A nivel nacional se tienen reportados pocos trabajos relacionados con las manos robóticas o efectores finales antropomórficos y la mayoría de estos trabajos realizados consideran únicamente a los efectores finales como prótesis de mano enfocándose principalmente en la obtención de un

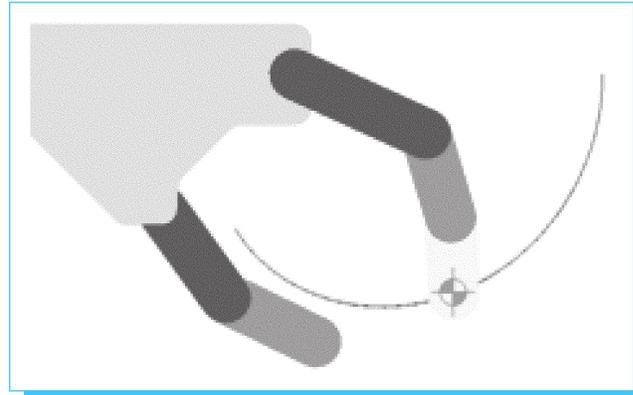


Fig. 1. Cadena cinemática abierta que describe la trayectoria del agarre cilíndrico [7].

mecanismo con apariencia antropomórfica, aunque éste no sea multiarticulado, ni tenga la destreza suficiente para el manejo de diversos objetos [18-20].

De acuerdo con los estudios realizados anteriormente, es posible sintetizar un mecanismo de cuatro barras con acoplamiento cinemático, capaz de emular el movimiento del dedo índice en los agarres cilíndrico y puntual, partiendo de las variables cinemáticas obtenidas experimentalmente y extrapolar dicho análisis a los demás dedos para conformar una mano robótica multiarticulada.

#### 4. Desarrollo

Una de las principales preocupaciones, ya sea en el diseño o en el análisis de un mecanismo, es el número de grados de libertad, conocido también como movilidad del dispositivo y depende del número de parámetros de entrada que se deben controlar independientemente [21, 22].

El investigador ruso Bloch desarrolló un método para la síntesis de mecanismos de cuatro barras empleando álgebra compleja y que se presenta en esta sección por su valor y aportación a la síntesis de mecanismos [23-25]. Otro método empleado para la síntesis de los eslabonamientos de cuatro barras, es el presentado por [26] el cual establece, que al llevar la ecuación que representa los eslabones a la forma compleja rectangular y separar las componentes real e imaginaria, se obtiene la solución al modelo. Por otra parte, el método de Newton-Raphson basa su formulación en un proceso iterativo, que es ampliamente empleado para la obtención de raíces de una función y que sirve para la solución de ecuaciones más complejas como las que se emplean en los algoritmos genéticos, tal y como se describe en [27, 28].

Para este caso, se desea obtener un mecanismo plano que emule el movimiento de los dedos de la mano, teniendo en cuenta algunas restricciones necesarias para cumplir con las características antropométricas y antropomórficas de la mano, así como el rango de movilidad de cada uno de los dedos que integrarán la mano robótica. Tomando en consideración los datos obtenidos de la caracterización cinemática que se presenta en [10, 16, 17], se establecen los criterios para el diseño de un mecanismo capaz de emular los agarres cilíndrico, puntual y palmar. Dicha caracterización establece las bases para la síntesis de los mecanismos de la mano robótica, lo cual da lugar a este trabajo.

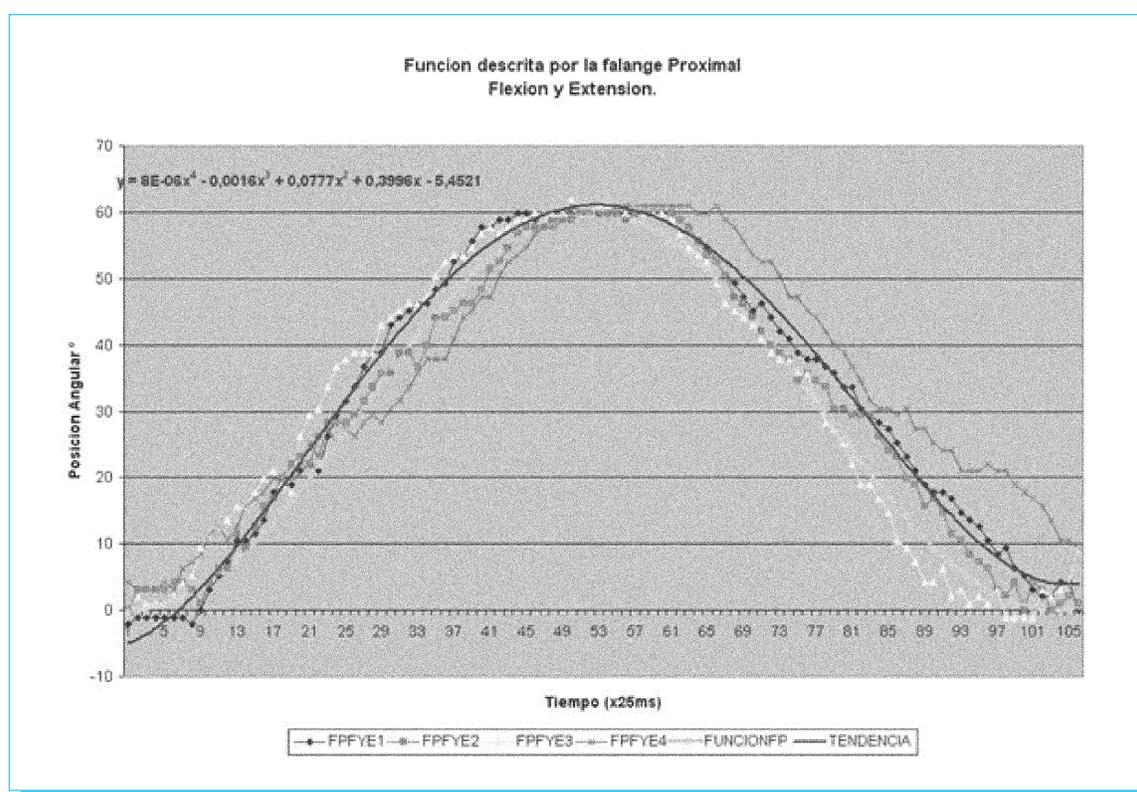
Para obtener el mecanismo de los dedos robóticos, es necesario contemplar las características antropométricas y antropomórficas de la mano, por lo que se considera un promedio de las dimensiones de las falanges de cada uno de los dedos y que están determinadas en diversos trabajos [10, 16, 17], con la finalidad de obtener la cinemática directa dentro de la caracterización del dedo índice, así como la forma que tendrá cada uno de los dedos de la mano robótica. La figura 1 muestra un esquema del eslabonamiento que representa al dedo índice y pulgar de la mano robótica. En este caso, la

síntesis del dedo índice es idéntica a la del resto de los dedos, puesto que su comportamiento es muy similar.

Considerando la información presentada en [18], en donde se muestran la longitud promedio de la falange proximal media y distal, así como el rango máximo de movimiento de cada articulación, se determina la longitud y rango de movimiento que tendrá cada eslabón del dedo robótico. Es posible considerar como entrada del sistema (en este caso el dedo Índice) a la falange proximal, ésta es tomada como referencia para obtener el índice o relación de velocidad de cada falange [17].

Al analizar el comportamiento de la falange proximal del dedo índice y someterlo a una serie de flexiones y extensiones, se observa la periodicidad de este movimiento cuando se ejecuta el agarre cilíndrico. En la gráfica de la figura 2 se muestra la posición angular de la falange proximal, así como la tendencia, obtenidas por el monitoreo y análisis experimental durante el agarre cilíndrico y puntual.

Por otra parte, se observa que el comportamiento de la falange proximal, media y distal de los dedos, se puede representar por medio de funciones periódicas como el seno y coseno.



**Fig. 2.** Función descrita por la falange proximal [17].

Tomado en cuenta que la entrada al sistema del dedo robótico es la falange proximal, se emplea la periodicidad de éste comportamiento para representar el movimiento de cada una de las falanges por medio de una función "coseno" desfasada del origen, tanto en frecuencia como en amplitud, como se describe en la ecuación (1).

$$\theta_q = \theta_{RMF}/2 (\cos (\omega t + \pi)) + \theta_{RMF}/2 \quad (1)$$

Donde  $\theta_q$  es la posición angular generalizada de cada falange y  $\theta_{RMF}$  es el ángulo máximo desarrollado por cada una de las falanges en el agarre cilíndrico y puntual. De esta forma, considerando los datos obtenidos en [9, 10, 16], la ecuación que describe el movimiento de cada falange se define por las ecuaciones (2) a (4).

$$\theta_{FP} = \pi/6 (\cos (\omega t + \pi)) + \pi/6 \quad (2)$$

$$\theta_{FM} = \pi/4 (\cos (\omega t + \pi)) + \pi/4 \quad (3)$$

$$\theta_{FD} = 7\pi/72 (\cos (\omega t + \pi)) + 7\pi/72 \quad (4)$$

Donde  $\omega$  está definida por la velocidad angular promedio con que se mueve cada una de las falanges, ésta es  $\omega = 2.45$  rad/s.

Como se observa, el comportamiento de las falanges es similar, por lo que es posible establecer una relación entre ellas. Despejando los términos idénticos de las ecuaciones (2), (3) y (4), se tiene:

$$\cos (\omega t + \pi) = \frac{\theta_{FP} - \pi/6}{\pi/6} \quad (5)$$

$$\cos (\omega t + \pi) = \frac{\theta_{FM} - \pi/4}{\pi/4} \quad (6)$$

$$\cos (\omega t + \pi) = \frac{\theta_{FD} - 7\pi/72}{7\pi/72} \quad (7)$$

Igualando las ecuaciones (5) y (6) queda:

$$\frac{\theta_{FM} - \pi/4}{\pi/4} = \frac{\theta_{FP} - \pi/6}{\pi/6} \quad (8)$$

Despejando  $\theta_{FM}$  se tiene:

$$\theta_{FM} = \left[ \frac{\theta_{FP} - \pi/6}{\pi/6} \right] \pi/4 + \pi/4$$

$$\begin{aligned} \theta_{FM} &= \left[ \frac{\theta_{FP}}{\pi/6} - 1 \right] \pi/4 + \pi/4 \\ \theta_{FM} &= \frac{\pi/4 \theta_{FP}}{\pi/6} - \pi/4 + \pi/4 \\ \theta_{FM} &= \frac{\pi/4 \theta_{FP}}{\pi/6} = \frac{6\pi}{4\pi} \theta_{FP} \\ \theta_{FM} &= \frac{3}{2} \theta_{FP} \end{aligned} \quad (9)$$

Por otra parte, es posible establecer el ángulo de salida de un mecanismo de cuatro barras, en función del ángulo de entrada  $\theta_2$  [22, 29]. Haciendo la misma analogía, es posible establecer el ángulo del eslabón acoplador en función del eslabón de entrada o manivela, teniendo como resultado la ecuación (10).

$$\theta_3 = f(\theta_2) \quad (10)$$

En donde  $\theta_3$  es el ángulo del acoplador y que a su vez será el ángulo de la falange distal  $\theta_{FD}$ , mientras que  $\theta_2$  es el ángulo de la manivela o de la falange media  $\theta_{FM}$  para el caso del mecanismo de cuatro barras distal.

Para el mecanismo proximal,  $\theta_2$  es el ángulo es descrito por la falange proximal  $\theta_{FP}$ , mientras que  $\theta_3$  es el ángulo  $\theta_{FM}$ . De esta forma, para establecer los puntos de precisión que determinan el mecanismo generador de función, se emplea la ecuación (11) del espaciamento de Chebychev [22] expandida a un ciclo completo para analizar la flexión y extensión del dedo índice.

$$\theta_{Pqj} = 1/2 (\theta_{RMq0} + \theta_{RMqM}) - 1/2 (\theta_{RMqM} + \theta_{RMq0}) \cos \frac{2\pi(2j-1)}{2n} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

En donde  $\theta_{Pqj}$  es el punto de precisión de Chebychev de la articulación generalizada  $q$  para la iteración  $j$ ,  $\theta_{RMq0}$  es el rango de movilidad mínimo de la articulación generalizada  $q$ ,  $\theta_{RMqM}$  es el rango de movilidad máximo de la articulación generalizada, donde  $n$  es el número de puntos de precisión deseados para el mecanismo. Tomando en cuenta la ecuación (11) y los rangos de movilidad de la falange proximal, media y distal, obtenidos en [10, 17], se puede establecer que:

$$\theta_{FPj} = 1/2 (0 + \pi/3) - 1/2 (\pi/3 - 0) \cos \frac{2\pi(2j-1)}{2n} \quad (12)$$

**Tabla 1.** Espaciamento de Chebychev para las falanges proximal, media y distal [18].

PUNTO DE PRECISIÓN	PUNTOS DE PRECISIÓN DE CHEBYCHEV					
	FALANGE PROXIMAL	FALANGE MEDIA	FALANGE DISTAL	FALANGE PROXIMAL	FALANGE MEDIA	FALANGE DISTAL
	grados			radianes		
P1	1.4683	2.2025	0.8563	0.0256	0.0384	0.0149
P2	12.3664	18.5497	7.2121	0.2158	0.3238	0.1259
P3	30.0000	45.0000	17.4960	0.5236	0.7854	0.3054
P4	47.6336	71.4503	27.7799	0.8314	1.2470	0.4849
P5	58.5317	87.7975	34.1357	1.0216	1.5324	0.5958
P6	58.5317	87.7975	34.1357	1.0216	1.5324	0.5958
P7	47.6336	71.4503	27.7799	0.8314	1.2470	0.4849
P8	30.0000	45.0000	17.4960	0.5236	0.7854	0.3054
P9	12.3664	18.5497	7.2121	0.2158	0.3238	0.1259
P10	1.4683	2.2025	0.8563	0.0256	0.0384	0.0149

$$\theta_{FMj} = f(\theta_{FPj}) \tag{13}$$

$$\theta_{FMj} = 3/2 \theta_{FPj}$$

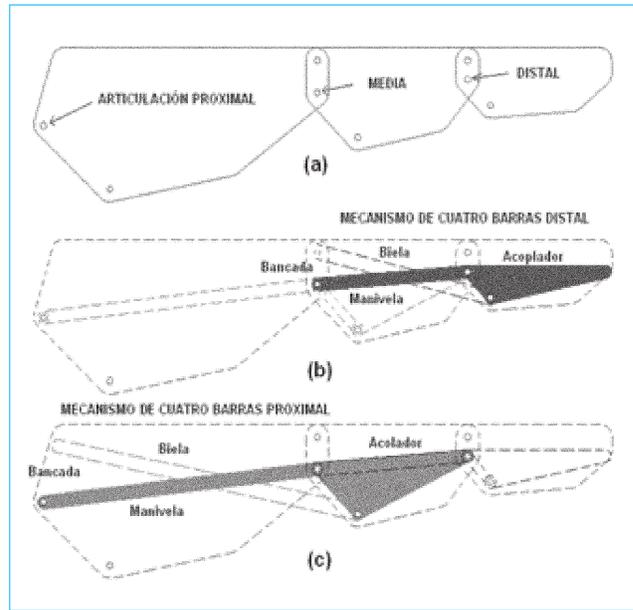
Empleando las ecuaciones (11) a (13) se obtienen 10 puntos de precisión de Chebychev necesarios para determinar los mecanismos de cuatro barras que describen el comportamiento del dedo índice de la mano y que se resumen en la tabla 1.

Para poder estudiar el eslabonamiento del dedo robótico es necesario hacer un desacoplo cinemático, es decir, se analiza de forma independiente cada uno de los mecanismo de cuatro barras que conforman el dedo. En este caso se evalúa como primera instancia, el mecanismo de la falange proximal mostrado en el diagrama de la figura 3.

Una vez establecido el perfil que se emplea para el dedo robótico, se asignan los ejes de la articulación de rotación. Éstos se sitúan en la parte proximal de cada falange, a una altura intermedia para evitar interferencia en el movimiento de cada una de las falanges, como se aprecia en la figura 3a.

En la figura 3b, el eslabón distal del dedo representa el acoplador de un mecanismo de cuatro barras, mientras que el eslabón medio realiza la función de manivela. El acoplador se une por medio de la articulación distal interfalángica (DIF), mientras que la bancada del mecanismo se une mediante la articulación media interfalángica (MIF), ambos representados en la figura 3 b). La parte punteada representa la biela o cuarto eslabón del mecanismo de cuatro barras, el cual deberá ser calculado de tal forma que emule el movimiento natural del dedo en los agarres cilíndrico y puntual.

De forma similar, la figura 3c muestra la conformación del mecanismo distal de cuatro barras que desarrollará el movimiento de las falanges proximal y media, donde la manivela está constituida por el eslabón proximal del dedo. El acoplador está conformado ahora por el eslabón medio y la bancada por la parte considerada como palma. La biela del mecanismo proximal de cuatro barras está representada por las líneas punteadas de la figura 3 c) y que deberá de ser calculada para completar la estructura del mecanismo.



**Fig. 3.** Identificación de los mecanismos planos de cuatro barras para el dedo robótico [18].

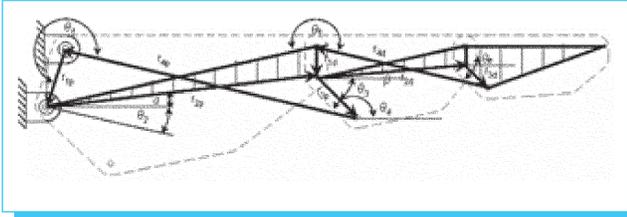


Fig. 4. Diagrama de vectores del mecanismo del dedo [18].

### 5. Análisis de resultados

El diagrama de la figura 4 presenta, de forma general, la asignación vectorial de los eslabones del mecanismo, en el cual se encuentran consideradas las condiciones de diseño del mismo para proporcionar al dedo robótico de una apariencia antropomórfica.

Del diagrama vectorial del dedo robótico, se analiza la parte proximal por ser esta la que mueva al mecanismo completo, del que se destacan los elementos principales y que se describen en el diagrama de la figura 5.

$$r_2 + r_3 - r_4 - r_1 = 0 \quad (14)$$

$$r_2 e^{j\theta_2} + r_3 e^{j\theta_3} - r_4 e^{j\theta_4} - r_1 e^{j\theta_1} = 0 \quad (15)$$

$$r_2 e^{j\theta_2} + r_3 e^{j\theta_3} = r_4 e^{j\theta_4} + r_1 e^{j\theta_1} \quad (16)$$

$$r_2 \cos(\alpha - \theta_2) + r_3 \cos(\theta_3 - \beta) = x_1 + r_4 \cos \theta_4 \quad (17)$$

$$r_2 \sin(\alpha - \theta_2) + r_3 \sin(\theta_3 - \beta) = y_1 + r_4 \sin \theta_4 \quad (18)$$

Despejando el término que contiene a  $r_4$  de la ecuación (17) y (18) se tiene:

$$r_4 \cos \theta_4 = + r_2 \cos(\alpha - \theta_2) + r_3 \cos(\theta_3 + \beta) - x_1 \quad (19)$$

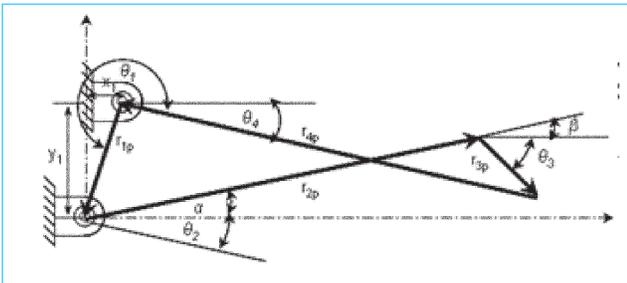


Fig. 5. Diagrama vectorial del mecanismo proximal de cuatro barras.

$$r_4 \sin \theta_4 = + r_2 \sin(\alpha - \theta_2) + r_3 \sin(\theta_3 + \beta) - y_1 \quad (20)$$

Elevando al cuadrado y sumando las expresiones (19) y (20) se obtiene:

$$(r_4 \cos \theta_4)^2 = (r_2 \cos(\alpha - \theta_2) + r_3 \cos(\theta_3 + \beta) - x_1)^2 \quad (21)$$

$$(r_4 \sin \theta_4)^2 = (r_2 \sin(\alpha - \theta_2) + r_3 \sin(\theta_3 + \beta) - y_1)^2 \quad (22)$$

$$(r_4 \cos \theta_4)^2 + (r_4 \sin \theta_4)^2 = (r_2 \cos(\alpha - \theta_2) + r_3 \cos(\theta_3 + \beta) - x_1)^2 + (r_2 \sin(\alpha - \theta_2) + r_3 \sin(\theta_3 + \beta) - y_1)^2$$

$$r_4^2 (\cos^2 \theta_4 + \sin^2 \theta_4) = (r_2 \cos(\alpha - \theta_2) + r_3 \cos(\theta_3 + \beta) - x_1)^2$$

$$F_j = (r_2 \cos(\alpha - \theta_2) + r_3 \cos(\theta_3 + \beta) - x_1)^2 + (r_2 \sin(\alpha - \theta_2) + r_3 \sin(\theta_3 + \beta) - y_1)^2 - r_4^2 \quad (23)$$

Por otra parte al dividir las ecuaciones (19) y (20) se obtiene el ángulo correspondiente al eslabón de la manivela, obteniendo:

$$\frac{r_4 \sin \theta_4}{r_4 \cos \theta_4} = \frac{r_2 \sin(\alpha - \theta_2) + r_3 \sin(\theta_3 + \beta) - y_1}{r_2 \cos(\alpha - \theta_2) + r_3 \cos(\theta_3 + \beta) - x_1} \quad (24)$$

$$\theta_{4j} = \tan^{-1} \left[ \frac{r_2 \sin(\alpha - \theta_2) + r_3 \sin(\theta_3 + \beta) - y_1}{r_2 \cos(\alpha - \theta_2) + r_3 \cos(\theta_3 + \beta) - x_1} \right] \quad (25)$$

Donde  $j$  corresponde al punto de precisión por el cual deberá pasar el mecanismo de cuatro barras. La ecuación (23) se resuelve por medio del método de Newton Raphson, en el cual se deberá de encontrar el punto  $(x_1, y_1)$  donde se anclará el eslabón  $r_4$ , así como la longitud y el ángulo de  $r_4$  que cumplen con el movimiento deseado, como se observa en el diagrama de la figura 5.

Para resolver el mecanismo articulado de cuatro barras correspondiente a la falange proximal y media, se tienen los siguientes datos, mismos que son alimentados al programa desarrollado en MatLab, obteniendo:

$$\begin{aligned} r_2 &= 46.8144 \text{ mm} \\ r_3 &= 9.8435 \text{ mm} \\ \alpha &= 6^\circ \\ \beta &= 36^\circ \end{aligned}$$

$$x_1 = 7.0658 \text{ mm} \quad y_1 = 10.6783 \text{ mm} \quad r_4 = 47.7019 \text{ mm}$$

De forma similar, se realiza el mismo análisis para el mecanismo distal de cuatro barras, con los datos como referencia de la figura 6.

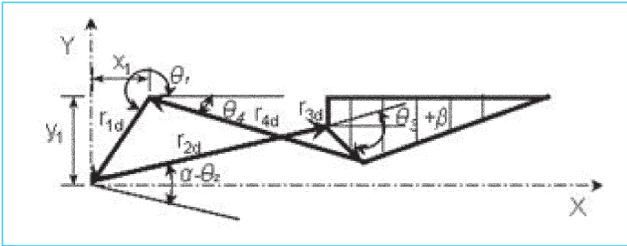


Fig. 6. Mecanismo distal de cuatro barras.

Después de este análisis, se tiene que la longitud de los eslabones que hacen la función de biela y los puntos donde debe unirse a la bancada, quedan especificados en la tabla 2.

Los resultados obtenidos en el punto anterior, donde se determina el mecanismo del dedo robótico multiarticulado, se emplean para modelar el mecanismo en Adams con la finalidad de determinar la trayectoria descrita por el mismo, así como su comportamiento durante la ejecución de los agarres cilíndrico y puntual, como se muestra en la figura 7.

El modelo del mecanismo que se obtiene, está constituido por articulaciones de revolución y movimientos lineales en la parte izquierda del mecanismo, por ser aquí la entrada del mismo. La figura 8 ilustra el eslabonamiento correspondiente a la falange media y distal, en la cual se puede observar que tras estimular el mecanismo con un movimiento sinusoidal, este describe una trayectoria muy similar a la esperada.

De igual forma se agrega el eslabonamiento referente a la falange proximal para establecer el mecanismo completo del dedo índice y reproducir los movimientos efectuados en el agarre cilíndrico y puntual, como se muestra en la figura 9.

El modelo del dedo robótico se somete al mismo análisis, donde se evalúa la posición de entrada y la posición de las falanges media y distal, así como la velocidad y aceleración de cada una de ellas. Este modelo ya contempla el contorno antropomórfico para dar una mejor apariencia (figura 10).

Tabla 2. Longitud y puntos de inserción de la biela de cada mecanismo.

Elementos de diseño			
Mecanismo	x	y	r <sub>4</sub>
FP-FM	7.06 mm	10.670 mm	47.70 mm
FM-FD	5.14 mm	3.211 mm	39.54 mm

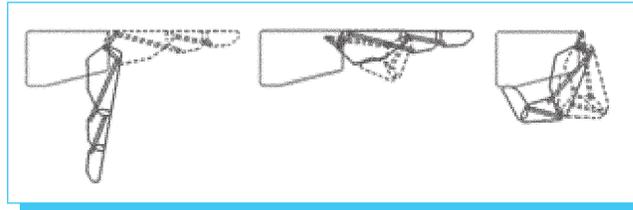


Fig. 7. Eslabonamiento del dedo robótico.

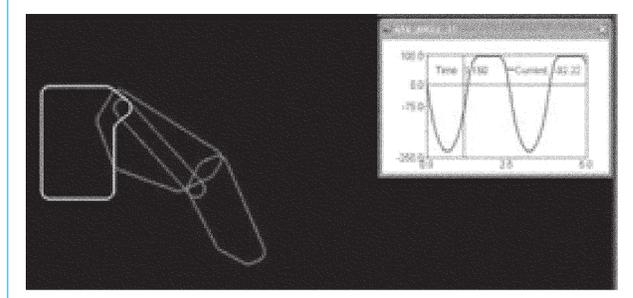


Fig. 8. Modelado del eslabón medio y distal del dedo.

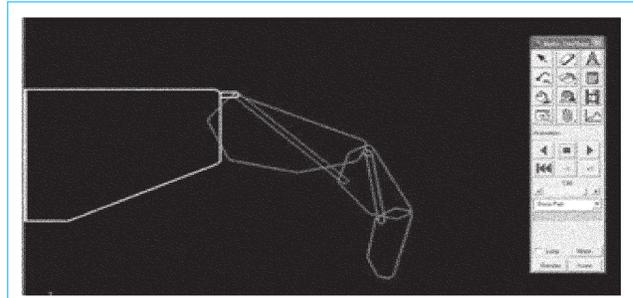


Fig. 9. Modelo en Adams del mecanismo resultante del dedo robótico.

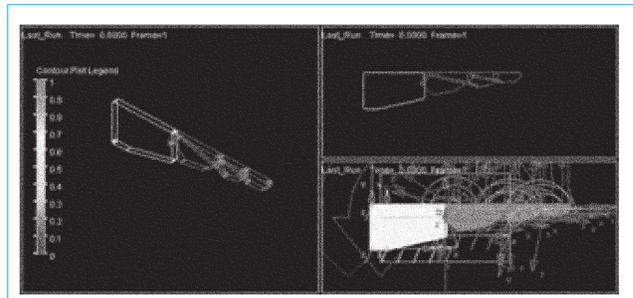
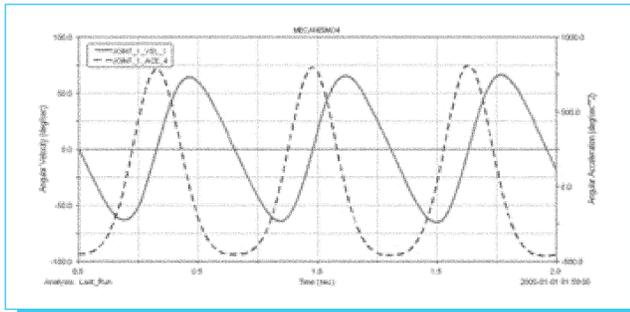
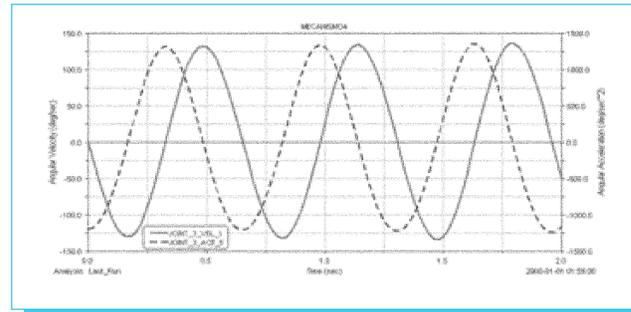


Fig. 10. Modelo en Adams del dedo robótico.



**Fig. 11.** Velocidad y aceleración angular de la falange proximal del dedo robótico.



**Fig. 13.** Velocidad y aceleración angular de la falange distal del dedo robótico.

En las gráficas de la figura 11 a 13 se presenta la velocidad y aceleración de las articulaciones del mecanismo del dedo. Estos resultados son muy similares a los que se obtuvieron por medio de las funciones descriptivas en [17]. En las gráficas se observan los valores máximos de velocidad y aceleración desarrollados por el mecanismo, con lo que es posible corroborar que la síntesis cumple con las condiciones deseadas, tanto para posición, como para velocidad y aceleración.

## 5. Conclusiones

El análisis realizado a los mecanismos actuados y subactuados permite ver que es necesario contar con un índice de movilidad para establecer las velocidades y aceleraciones relativas entre los eslabones del dedo mecánico, de forma que se pueda reproducir adecuadamente el tipo de agarre deseado, que en este caso fue el cilíndrico. Se ha comprobado que las velocidades relativas propuestas por [10, 16], pueden reproducir un agarre cilíndrico de un objeto determinado.

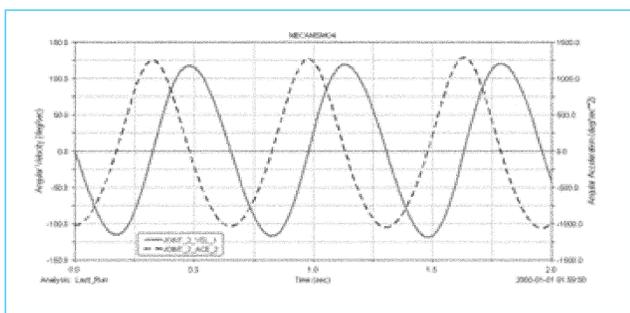
En relación con las características de los mecanismos subactuados, se concluye que los diseños presentados pueden

reproducir el agarre cilíndrico efectivamente, sin embargo, solo pueden realizar el agarre para el cual fueron diseñados [4, 6, 14, 30], con excepción al presentado por [11]. Los mecanismos subactuados conformables pueden llegar a realizar diversos tipos de agarre, aunque la desventaja que se presenta es que la fuerza del agarre varía dependiendo del tipo del mismo y a las constantes de los resortes.

Los mecanismos semi-subactuados presentan un mejor desempeño ya que es posible ejecutar diferentes tipos de agarre, para ello es necesario tener un diseño adecuado de los mecanismos de transmisión, que en este caso se trata de mecanismos de cuatro barras, así como el índice de movilidad necesario para los actuadores. De esta forma, teniendo un diseño adecuado del mecanismo considerando los índices de movilidad de cada tipo de agarre, será posible desarrollar un dedo robótico semi-subactuado que sea capaz de ejecutar diversos agarres, reduciendo también el grado de complejidad del control de este sistema.

El desarrollo de manos robóticas antropomórficas es parte de una serie de investigaciones que se están realizando alrededor del mundo. Lo anterior con la finalidad de crear robots que en conjunto sean capaces de imitar los movimientos y habilidades del ser humano, además de que se han hecho estudios sobre manos robóticas para emplearlas como prótesis en pacientes que han sufrido una amputación. Con esto, el usuario tendría la posibilidad de recuperar algunas de las habilidades y destrezas perdidas.

El problema planteado se aborda a partir de la información obtenida en [17], permitiendo identificar las funciones matemáticas de las cuales se realiza la síntesis del mecanismo que reproduce los movimientos deseados. Como se documenta en este trabajo, ésta síntesis deriva en una serie de mecanismos semi-subactuados que permiten, requiriendo un menor número de actuadores, ejecutar los diversos agarres señalados, modificando únicamente los ángulos de orientación



**Fig. 12.** Velocidad y aceleración angular de la falange media del dedo robótico.

en los eslabones motrices. Es importante realizar un estudio comparativo empleando la metodología propuesta en [31], para determinar de forma óptima, las dimensiones del eslabón conductor de los mecanismos.

**Agradecimientos.** El autor agradece el apoyo otorgado por el Instituto de Ciencia y Tecnología del D. F. (ICYTDF) a través del proyecto de investigación "Optimización del diseño y construcción de la prótesis robótica de mano multiarticulada" con referencia PIFUTP08-88, así como el brindado por el Instituto Politécnico Nacional y la Secretaría de Investigación de Posgrado, por medio del proyecto "Desarrollo de sistemas embebidos para la interfaz y control de prótesis robóticas" con referencia SIP20091185, sin los cuales el desarrollo de este trabajo no hubiera sido posible.

## 6. Referencias

- [1] N. Boubekri and P. Chakraborty, "Robotic Grasping: Gripper Designs, Control Methods and Grasp Configurations" University of Miami, Miami CA. February 2001.
- [2] S. Hesse, *Las Pinzas y sus Aplicaciones*. USA: Festo AG & Co., 2004.
- [3] J. Lee and L. Tsai, "Structural Synthesis of Multi-Fingered Hands" *Transactions of the ASME*, vol. 124, pp. 272-276, 2002.
- [4] M. Ceccarelli, J. Jauregui, and N. Nava, "Experimental Activity for Designing a Hand with 1 DOF Anthropomorphic Fingers of Human Size" presented at 12th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD'03, Cassino Italy, 2003.
- [5] A. T. Velázquez-Sánchez, E. A. Merchán-Cruz, y J. Ramírez-Gordillo, "De los Grippers de Pinzas a las Manos Robóticas Multiarticuladas" presentado en el 4º Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, México D. F., 2005.
- [6] G. Figliolini, P. Rea, and M. Principe, "Mechatronic Design of Ca.U.M.Ha." presented at 12th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD'03, Cassino Italy, 2003.
- [7] A. T. Velázquez-Sánchez, E. A. Merchán-Cruz, y J. Ramírez-Gordillo, "Comparación y Simulación Cinemática de los Dedos Robóticos Actuados y Subactuados" presentado en el 3er Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Barranquilla, Colombia, 2006.
- [8] E. Lugo-González, E. A. Merchán-Cruz, and L. H. Hernández-Gómez, "Synthesis Optimization of Planar Mechanisms," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 15, pp. 55-60, 2009.
- [9] A. T. Velázquez-Sánchez, E. A. Merchán-Cruz, y L. H. Hernández-Gómez, "Simulación de los mecanismos empleados en dedos robóticos" presentado en el 9º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, México, D. F., 2006.
- [10] A. T. Velázquez-Sánchez, E. A. Merchán-Cruz, y L. A. Flores-Herrera, "Caracterización de los Parámetros Cinemáticos del Dedo Índice de la Mano" presentado en el 3er Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Barranquilla, Colombia, 2006.
- [11] N. Fukaya, S. Toyama, T. Asfour, and D. R., "Design of the TUAT/ Karlsruhe Humanoid Hand," University Tokio Japan, Tokio, Japan 1999.
- [12] J. Butterfass, G. Hirzinger, M. Grebenstein, and H. Liu, "DLR-HAND II: Next Generation of a Dexterous Robotic Hand" presented at Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA2001, Seoul Korea, 2001.
- [13] T. Hasegawa, K. Murakami, and T. Matsuoka, "Grasp Planning for Precision Manipulations by Multifingered Robotic Hand" Fukuoka University, Japan 1998.
- [14] N. Dechev, M. L. Cleghom, and S. Naumman, "Multiple Finger, Passive Adaptive Grasp Prosthetic Hand" *Mechanism and Machine Theory*, pp. 1157-1173, 2001.
- [15] N. Dechev, M. L. Cleghom, and S. Naumman, "Multi-segmented Finger Design of an Experimental Prosthetic Hand" *Proceedings of the Sixth National Applied Mechanisms and Robotics Conference*, pp. 99-033-01, 99-033-08, 1999.
- [16] A. T. Velázquez-Sánchez, E. A. Merchán-Cruz, y J. Ramírez-Gordillo, "Análisis Cinemático del Dedo Índice de la Mano: Estudio Preliminar" presentado en el 4º Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, México D. F., 2005.
- [17] A. T. Velázquez-Sánchez, E. A. Merchán-Cruz, L. H. Hernández-Gómez, y G. Urriolagoitia-Calderón, "Rango de movilidad y función descriptiva del dedo índice" *Revista Científica*, vol. 11, pp. 177-188, 2007.
- [18] A. T. Velázquez-Sánchez, "Caracterización Cinemática e Implementación de una Mano Robótica Multiarticulada" en ESIME ZACATENCO, Tesis de Doctorado. México: Instituto Politécnico Nacional, 2008, pp. 292.
- [19] J. M. Dorador-González, "La robótica aplicada al ser humano: biónica" en *Revista UNAM*, vol. 1, 2005.
- [20] J. M. Dorador-González, "Ingenieros de la UNAM diseñan prótesis inteligente" en *Revista Universia*, vol. 1, 2004.
- [21] R. J. Brodell and A. H. Soni, "Design of the Crank-Rocker Mechanism with Unit Time Ratio" *Journal of Mechanisms ASME*, vol. 5, pp. 1-11, 1970.
- [22] J. E. Shigley y J. J. Uicker, *Teoría de Máquinas y Mecanismos*, vol. 1, Primera Edición. México: Mc.Graw Hill, 1998.
- [23] K. J. Waldron and E. N. Stevensen, "Elimination of Branch, Grashof, and Order Defects in Path-Angle Generation and Function Generation Synthesis" *Journal of Mechanisms ASME*, vol. 16, pp. 78-1, 78-12, 1970.
- [24] F. Freudenstein and G. N. Sandor, *Kinematics of Mechanisms*. New York: Mc. Graw Hill, 1964.
- [25] E. Lugo-González, A. T. Velázquez-Sánchez, E. A. Merchán-Cruz, y L. H. Hernández-Gómez, "Algoritmos genéticos aplicados a síntesis de mecanismos" en la 14 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. La Habana, Cuba, 2008.
- [26] F. Freudenstein, "Approximate Synthesis of Four-Bar Linkage" *Transactions of Mechanisms ASME*, vol. 77, pp. 853-861, 1955.
- [27] E. Lugo-González, A. T. Velázquez-Sánchez, J. Ramírez-Gordillo, y I. Y. Campos-Padilla, "Mecanismos analizados con algoritmos genéticos y métodos analíticos" presentado en el 14 Congreso Internacional Anual de la SOMMIM, Puebla, México, 2008.
- [28] J. Ramírez-Gordillo, A. T. Velázquez-Sánchez, E. Lugo-González, E. A. Merchán-Cruz, y G. Urriolagoitia-Calderón, "Generación de Trayectorias para Manipuladores Robóticos Aplicando Algoritmos Genéticos" en la 14 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. La Habana, Cuba, 2008.
- [29] F. Luquin, "P. L. CHEBYCHEV": *DivulgaMat*, 2006.
- [30] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, and A. Zucchelli, "Mechanical Structures for Robotic Hands Based on the Compliant Mechanism Concept" presented at 7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation ASTRA 2002, Noordwijk, Netherlands, 2002.
- [31] J. Ramírez-Gordillo, J. J. Muñoz-Cesar, A. Gómez-Teran, A. Lazcano-Valencia, and A. L. Soria-Moya, "Trajectory Generation of Robot Manipulators Using an Artificial Potential Function and Genetic Algorithms," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 15, pp. 55-60, 2009.

# Indicaciones para los investigadores que deseen publicar en la revista *Científica*

La revista *Científica* ESIME es una publicación trimestral editada por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), que presenta trabajos de investigación o propuestas originales en el área de la Ingeniería Electromecánica y sus ciencias afines.

Los artículos se reciben en la Coordinación Editorial de manera personal con una copia del archivo digital del trabajo y una copia impresa en el Edificio 5, Primer Piso, Oficina de la revista *Científica*, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la ESIME Zacatenco, Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP. 07738, México, DF; o por medio de correo electrónico: [revistacientifipn@yahoo.com.mx](mailto:revistacientifipn@yahoo.com.mx). Para aclaraciones se puede comunicar al teléfono 5729 6000 extensión 54518.

Los trabajos recibidos son revisados por el Comité Editorial quienes designan a un Editor Asociado de acuerdo a la disciplina que cubren los artículos. El Editor Asociado selecciona dos árbitros o más para que evalúen el escrito, quien recibe las observaciones de éstos e informa al Comité sobre los resultados de la revisión. Los trabajos pueden ser aceptados para su publicación, aceptados si se realizan modificaciones necesarias o rechazados. Los trabajos deben ser investigaciones o propuestas originales inéditas, sin excepción, sobre las áreas mencionadas.

## Estructura de los artículos

Dentro del artículo la numeración comienza a partir del 'Resumen' o el 'Abstract', según sea el caso. Ésta continúa de acuerdo a los siguientes elementos: 1. Resumen, 2. Abstract, 3. Introducción, 4. Desarrollo, 5. Conclusiones y 6. Referencias.

## Título

El título debe ser lo más corto posible (sin utilizar abreviaciones de preferencia) y no exceder de tres líneas.

## Datos del autor

Éstos muestran el o los nombres de los autores, la dirección de la institución a la cual pertenecen, el teléfono, fax y correo electrónico.

## Resumen

Debe contener 200 palabras como máximo. Consiste en una pequeña descripción de la investigación y una breve información de los resultados del trabajo que permite a los lectores identificar con rapidez los aspectos fundamentales del artículo y discernir la relevancia de éste.

## Abstract

Se incluye un resumen en inglés si el artículo está en español o viceversa. Éste aparece inmediatamente después del resumen en inglés o español, según sea el caso.

## Introducción

Expresa los antecedentes, límites, alcances y relevancia del problema. Plantea las premisas del mismo, y expresa el objetivo del trabajo. Se sugiere no extenderla como si fuera una exposición analítica.

## Desarrollo

Se refiere al desarrollo del tema que puede ser teórico, experimental, teórico-experimental o la descripción de un nuevo diseño. Es la parte medular y está compuesta por el planteamiento del problema y análisis del mismo, mencionando los materiales, métodos y técnicas. Las subdivisiones de este apartado se dejan al criterio del autor.

## Conclusiones

Establece la respuesta global del problema, son los objetivos alcanzados, las hipótesis comprobadas, modificadas o rechazadas.

## Referencias

Es la lista de fuentes bibliográficas: libros, artículos, manuales, memorias, etcétera. Deben aparecer en el orden en el cual se mencionan dentro del artículo con las siguientes especificaciones:

### Libros:

- [1] Autor, *Título*, número de edición, Editorial, Ciudad, año de publicación.  
[2] Autor, 'Capítulo del libro', *Título*, número de edición, Editorial, Ciudad, año de publicación, páginas.

### Ejemplo:

- [1] Kays, W.M. & Crawford, M.E., *Convection Heat and Mass Transfer*, 2ª ed., McGraw-Hill, New York, 1993.

### Revistas:

- [1] Autor, «Título del artículo», *Revista*, **volumen** (número), año, páginas.

### Ejemplo:

- [1] Lara, J.C., Hernández, D.G. y Alonso-Vanegas, M.A., «Desarrollo de un aparato estereotáctico con arco centrado», *Arch Neurocién.* **10**(3), 2005, pp. 196-202.

## Anexos

Los agradecimientos, simbología, notación y otros anexos, se consideran dentro del cuerpo del artículo y se dejan a consideración del autor. Se debe indicar si el trabajo ha sido previamente presentado en alguna institución científica o realizado con la ayuda de una subvención o fondo especial.

## Consideraciones sobre el formato general

Para obtener la mejor calidad al realizar la edición de los manuscritos en el formato de la revista, se recomienda que: a) el texto se capture en un procesador de textos (*word*); b) el tipo de letra del texto sea *Times* de 10 puntos, en una página con márgenes superior e inferior y derecho de 2.5 cm, margen izquierdo de 3 cm a dos columnas con espaciado de 0.77 cm entre ellas; c) las ecuaciones y fórmulas numeradas para mayor claridad, acrónimos y abreviaciones deben definirse la primera vez que sean usados en el texto; d) los pies de las figuras deben estar debajo de éstas con la indicación 'Fig. 1'; además, el título de los ejes de las figuras a menudo es causa de confusión, por lo que se sugiere usar palabras en lugar de símbolos. Los encabezados de las tablas deben estar arriba de éstas; e) las figuras y tablas en el documento deben entregarse en archivos por separado (.tif, .jpeg), es importante que al pasar cualquier imagen por un escáner debe hacerlo con una resolución de 300 ppp (puntos por pulgada). De antemano gracias.

# Information for Authors Submitting Papers to Científica Journal

The manuscript must be prepared in following a Camera Ready format with all its section numbered starting with the abstract, as shown below:

1. **Abstract**
2. **Resumen (Spanish abstract if it is possible).**
3. **Body of the manuscript**
4. **Reference list**
5. **Acknowledgements if any**
6. **Reference list**
7. **Appendix if any**

## Title

Must be concise and no longer than 3 lines using capital and lower case letters.

## Authors Name and Affiliations

The authors name must be written below the title using a one column format starting with the given name followed by one or two family names, if two family names applies. Below the authors names must be written the affiliation including the address quality, fax, telephone number or email.

## Abstract

The abstract with about 200 words must give a brief description about the research including some comments about the experimental or simulation results and conclusion.

## Resumen (Spanish abstract)

It is desirable that, if it is possible, a Spanish abstract be provided.

## Body of the Manuscript

The body of the manuscript must include an introduction in which the relevance of the research must be explained. A review of related research works by either, the same or another authors must be included.

The body of the manuscript also must include the theoretical aspects of the research, as well as experimental or simulation results is any, together with a Conclusions Section.

## Format

All manuscripts must be written in letter size paper, only by one side, with the following requirements. *a)* It is recommended that, if possible, the text be written using a word processor. *b)* The text must be written in two columns with a separation between them of 0.77cm, using a 10 points Times font or similar, with lower, upper and right margins equal to 2.5 cm and left margin equal to 3.0 cm. *c)* All the equations must be numbered and written using an equations editor. *d)* All symbols or abbreviations must be defined the first time that they be used in the text. *e)* All figures must be inserted in the manuscript. *f)* All figures must be numbered and its captions must be inserted below them. It is strongly recommended to use, when it be possible, words instead of symbols in the graphic axis. The table captions must be inserted above the corresponding table. *g)* All pictures and scanned figures must be high quality pictures for proper reproduction.

## References

References must appear in the format given below. For multiple authors all family names and given names initials must be given. Titles of the journals must be all in lower case except the first letter of each word. All references must be cited by number in brackets, in the order that they appear in the text.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
**Científica:** LA REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA  
Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
Edificio 5, Primer Piso, Oficina de la revista *Científica*,  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,  
Col. Lindavista, CP. 07738, Tel. 5729 6000 ext. 54518, Fax 55860758  
email: [revistacientifpn@yahoo.com.mx](mailto:revistacientifpn@yahoo.com.mx)



**El Instituto Politécnico Nacional  
y la Escuela Superior de Ingeniería  
Mecánica y Eléctrica  
publican**



# Científica

LA REVISTA MEXICANA DE  
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA



**Suscripciones  
y venta de  
ejemplares:**

**Edificio 5, primer piso,  
Oficina de la revista Científica,  
Sección de Posgrado e  
Investigación de la  
ESIME Zacatenco,  
Unidad Profesional  
Adolfo López Mateos,  
Col. Lindavista,  
CP 07738,  
México, DF.**

**Tel. 5729 6000**

**ext. 54518**

**correo electrónico:**

**revistacientifipn@yahoo.com.mx**

