

# Diseño de un Dispositivo Háptico de Tres Grados de Libertad

Pérez Ramírez Jesús David, Sepúlveda Cervantes Gabriel y Silva Lomelí José de Jesús

Unidad Profesional Interdisciplinaria y Tecnologías Avanzadas IPN <sup>(1,3)</sup>  
Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo IPN <sup>(2)</sup>  
[jdpr\\_1987@hotmail.com](mailto:jdpr_1987@hotmail.com)

## Resumen

*Los seres humanos interactúan con su entorno por medio de los sentidos (el oído, el gusto, el olfato, el tacto y la vista), estos le proporcionan la información acerca de las cualidades específicas del medio.*

*El sentido del tacto le permite percibir al ser humano características esenciales de su entorno como texturas, rugosidad, tenacidad, entre otras.*

*Los dispositivos hápticos son sistemas mecatrónicos capaces de estimular al usuario de manera táctil o kinestésica. Estos dispositivos son los transductores entre una realidad virtual previamente diseñada y el sentido del tacto del usuario.*

*En la actualidad existen diferentes configuraciones de dispositivos háptico, ya sean de cadena cinemática cerrada o abierta. Nuestro prototipo estará configurado como una cadena cinemática cerrada, a esto se le conoce como robot paralelo.*

*El diseño se realizara del prototipo se realizara por medio de un software de diseño asistido por computadora (CAD), y software de ingeniería asistida por computadora (CAE).*

**Palabras clave:** Dispositivo háptico, sistema mecatrónico, kinestésica, realidad virtual, cadena cinemática cerrada, CAD y CAE.

## 1. Introducción

Dentro de los grandes debates sobre el desarrollo de la sociedad, una de las discusiones más importantes se ha dado en torno al avance tecnológico. Algunos autores lo visualizan como uno de los instrumentos clave para avanzar en el bienestar tecnológico del mundo subdesarrollado.

El desarrollo y la capacidad de progreso y adelanto, así como las múltiples aplicaciones

prácticas, establecen los nuevos retos que en adelante deben asumir las investigaciones enfocadas al desarrollo de nuevos esquemas tecnológicos para el logro de resultados pertinentes y útiles a la sociedad, y al desarrollo mismo del ser humano.

El ser humano interactúa con los sistemas de cómputo por medio de los dispositivos, entre estos se encuentra los dispositivos de entrada (mouse, teclado), de salida (monitor, bocinas) y los bidireccionales. Entre estos últimos se encuentra los dispositivos hápticos, los cuales envían información al sistema de cómputo por medio de los sensores y a su vez el dispositivo envía información al usuario por medio del movimiento del efector final.

Un dispositivo háptico es el transductor entre la realidad virtual previamente diseñada y el sentido del tacto de quien lo opera. El flujo de información establecido entre el humano y el mundo virtual se ejemplifica en la figura 1.

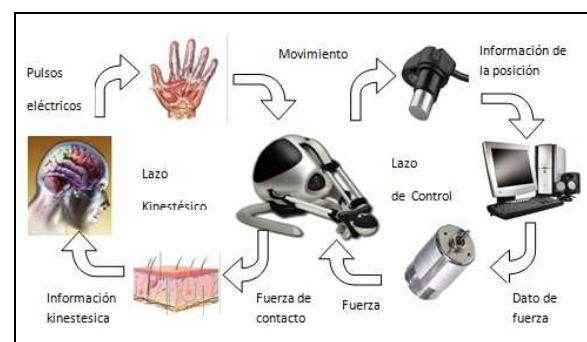


Fig. 1. Flujo de información de un dispositivo háptico.

El prototipo es considerado un dispositivo mecatrónico debido a que está conformado sinérgicamente por elementos de sensado, posee una planta, actuadores y un procesamiento computacional. En la figura 2 podemos observar las entradas y salidas de nuestro dispositivo háptico.

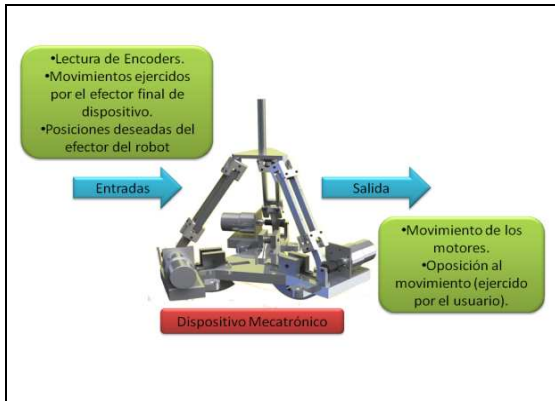


Fig. 2. Diagrama de entrada y salida.

## 2. Diseño del prototipo de Dispositivo Háptico

Para el diseño de nuestro prototipo se establecieron las especificaciones del diseño como: la configuración de los eslabones, las dimensiones, el área de trabajo, el material del cual va a estar manufacturado, los materiales no manufacturados (rodamientos, motores, etc.). Debido a lo anterior el diseño se dividió en:

### 2.1 Diseño Cinemático

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo respecto a un sistema de referencias. Los modelos cinemáticos se dividen en dos formas [1]:

#### 2.1.1 Cinemática Directa

Consiste en determinar la posición y orientación del extremo final del robot con respecto al sistema e la base del prototipo a partir de conocer los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos.

El prototipo estará configurado con una cadena cinemática cerrada (delta), como se muestra en la figura 3. La configuración está constituida por tres brazos independientes, cada brazo conformado por dos eslabones. Los brazos están acoplados en una base superior.

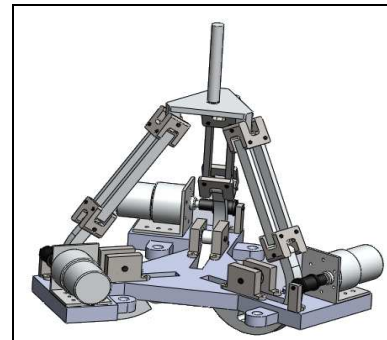


Fig. 3. Prototipo configuración delta.

La cinemática directa se basa en matrices de transformación homogénea. La cual transforma un vector de posición expresado en coordenadas homogéneas respecto a un sistema de coordenadas que ha sido rotado y/o trasladado a otro sistema de coordenadas, se define como una matriz de  $4 \times 4$  [2].

Para obtener los parámetros necesarios de nuestra matriz recurriremos al algoritmo de Denavit-Hartenberg, el cual permite establecer de manera sistemática y correcta los sistemas coordenados asociados a cada eslabón.

El prototipo posee una cadena cinemática cerrada la cual se dividirá en tres eslabones independientes para su análisis, como se muestra en la figura 4.

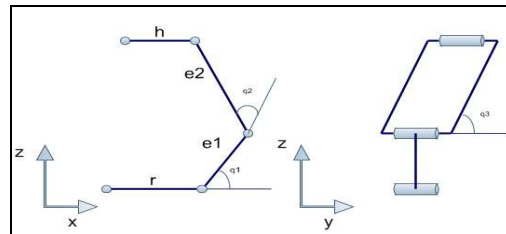


Fig. 4. Brazo del prototipo.

Cada eslabón posee los siguientes marcos coordenados como se muestra en la figura 5, el ángulo denominado  $q_0$  nos permitirá posicionarnos en los cada uno de los 3 brazos debido a que solo posea valores de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ .

Los valores obtenidos mediante esta metodología se muestran en la siguiente tabla.

#	Xi-1 -----> Xi		Zi-1 -----> Zi	
	θ	d	A l f a	a
1	q0	0	0	0
2	q1	0	π/2	R
3	q2	0	0	e1
4	q3	0	π/2	0
5	q4	0	-π/2	e2
6	0	0	0	H

Tabla 1. Valores Denavit-Hartenberg

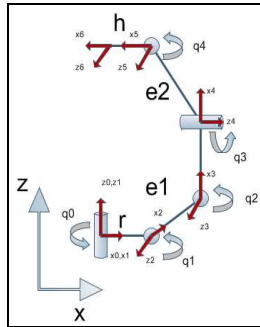


Fig. 5. Marcos coordenados por eslabón.

Las transformaciones homogéneas se obtienen sustituyendo los valores obtenidos en la tabla 1, en la siguiente matriz.

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta)\cos(\alpha) & \sin(\theta)\sin(\alpha) & a*\cos(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta)\cos(\alpha) & -\cos(\theta)\sin(\alpha) & a*\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Después de generar las matrices de transformación se deberán multiplicar de la siguiente ecuación:

$$T_0^6 = T_0^1 * T_1^2 * T_2^3 * T_3^4 * T_4^5 * T_5^6 \quad (2)$$

La matriz de transformación nos  $T_0^6$  nos proporciona las ecuaciones 3, 4 y 5 que corresponden al punto P del efector final.

$$P_x = r + e_1 * \cos(q_1) + e_2 * \sin(q_1) * \cos(q_1 + q_2) - h \quad (3)$$

$$P_y = e_2 * \cos(q_3) \quad (4)$$

$$P_z = e_1 * \sin(q_1) + e_2 * \sin(q_3) * \cos(q_1 + q_2) \quad (5)$$

### 2.1.2 Cinemática Inversa

Resuelve la configuración que debe adoptar el prototipo para una posición y orientación conocidas del efector final.

Este análisis se realiza del mismo modo que el de la cinemática cerrada, estudiando cada brazo por separado. Empleando el método geométrico.

En primera instancia se analiza el brazo en el plano (y, z), como se muestra en la figura 6. Con la finalidad de obtener la altura máxima y el valor de  $q_3$  de nuestro prototipo.

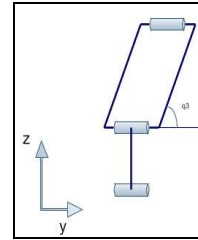


Fig. 6. Análisis respecto al plano z, y.

Obtenido la siguiente ecuación.

$$q_3 = \cos^{-1}\left(\frac{P_y}{e_2}\right) \quad (6)$$

Para obtener los valores de  $q_1$  y  $q_2$  respecto a las posiciones del efector final  $P_x$  y  $P_y$  analizamos el prototipo como se observa en la figura 7

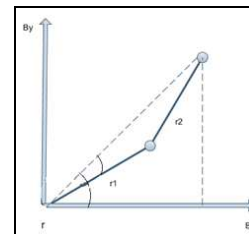


Fig. 7. Análisis respecto al plano x, y.

Se establecen los valores de  $B_x$  y  $B_z$  definidos en las ecuaciones 7 y 8.

$$B_x = P_x - r + h \quad (7)$$

$$B_z = P_z \quad (8)$$

Por lo tanto definiremos al ángulo  $q_2$  como se observa en la ecuación 9.

$$q_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{B_x^2 + B_z^2 - r_1^2 - r_2^2}{2*r_1*r_2}\right)^2}}{\frac{B_x^2 + B_z^2 - r_1^2 - r_2^2}{2*r_1*r_2}}\right) \quad (9)$$

El valor de  $q_1$  está definido por la ecuación 10

$$q_1 = \tan^{-1} \left( \frac{P_z}{P_x - r + h} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{r_2 \cdot \sin(q_2)}{r_1 + r_2 \cdot \cos(q_2)} \right) \quad (10)$$

## 2.2 Diseño Conceptual

El diseño conceptual se realizó mediante SolidWorks versión 2010, el cual es un software de diseño asistido por computadora CAD.

En este proceso del diseño se elaboraron las piezas que componen nuestro prototipo, considerando las restricciones y dimensiones obtenidas en el diseño cinemático.

Durante este proceso se consideró los movimientos que realizaría nuestro prototipo. Se realizaron varios prototipos, seleccionando el prototipo que se muestra en la figura 3.

## 2.3 Validación del Diseño

Este proceso consiste en analizar las piezas conforme al material que van a ser manufacturadas, los esfuerzos sometidos y los requerimientos que deberá cumplir nuestro prototipo.

### 2.3.1 Transmisión del movimiento de los motores

Se estableció que el prototipo tendrá una configuración delta con el fin de reducir la inercia del prototipo debido a la configuración señalada. En esta configuración transmite el movimiento del motor al primer eslabón de cada brazo.

Con el fin de realizar una elección correcta de transmisión de movimiento entre el motor y el primer eslabón se propusieron 3 diseños conceptuales:

- Motor sujeto por opresor al primer eslabón.
- Transmisión de movimiento por engranes (piñón - cremallera).
- Transmisión por cable

Empleando una metodología de toma de decisiones, la cual consisten en realizar una comparación entre los diseños propuestos, resaltando ventajas y desventajas de los mismos. Seleccionado el diseño de transmisión por cable como se observa en la figura 8. En la figura 9 observamos el motor que se empleará en el dispositivo.

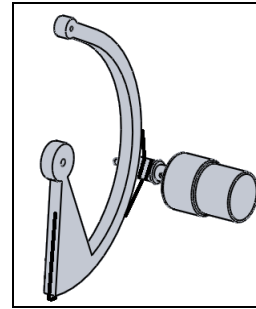


Fig. 8. Diseño de transmisión por cable.



Fig. 9. Motor del dispositivo.

### 2.3.2 Selección de rodamiento

El diseño del dispositivo háptico propuesto en este trabajo requiere de un rodamiento, el cual propicia el movimiento del primer eslabón. A continuación se seleccionará un tipo de rodamiento rígido, mediante una comparación entre las diferentes configuraciones existentes.

Para la aplicación ocuparemos un rodamiento rígido de una hilera de bolas, debido a que posee un diseño versátil, el cual se observa en la figura 10. Durante la aplicación el rodamiento estará sometido a cargas axiales, no es necesario que sea desarmable, en cuestión a costo es el más económico en el mercado comparado con las otras configuraciones.



Fig. 10. Rodamiento de una hilera de bolas.

### 2.3.3 Análisis de esfuerzos sobre los pernos

Se realizó un análisis de esfuerzo sobre los pernos del prototipo, analizando a nuestro dispositivo como se ve en la figura 11. Se estableció esta configuración debido a que el robot presenta una singularidad, provocando que la carga ejercida por el usuario en el efector final y el peso de los componentes del dispositivo recaigan sobre la parte central los pernos del dispositivo de manera uniforme.

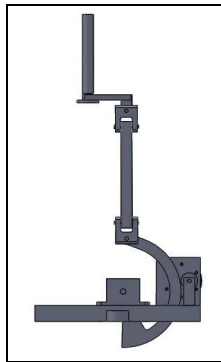


Fig. 11. Brazo presentado singularidad.

Los pernos del prototipo que se observan en la figura 12 se analizarán a flexión y torsión, aplicando la ecuación del código A.S.M.E. para un eje macizo, con el fin de obtener el diámetro mínimo requerido para la realización del prototipo, que viene dada por:

$$d^3 = \frac{16}{\pi \cdot \sigma_y} \sqrt{(kb * Mb)^2 + (kt * Mt)^2} \quad (11)$$

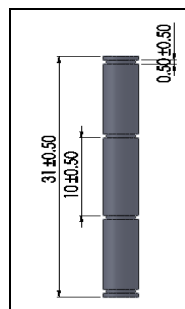


Fig. 12. Perno del prototipo.

Por lo tanto podemos decir que el diámetro mínimo requerido para los pernos es de 2.242 mm. El diámetro propuesto para los pernos es de 3.175mm es mayor que el diámetro mínimo requerido, por lo tanto resistirá la carga y no presentara deformación considerables que puedan dañar el prototipo.

### 2.3.4 Análisis de esfuerzos sobre los brazos

El primer eslabón presentara la mayor carga cuando el robot se encuentre en singularidad como se vio en la sección anterior con la figura 10. Por la tanto toda la carga se ejerce en la parte superior del eslabón, por eso es primordial realizar el análisis de esfuerzos a tensión del eslabón.

Este análisis se efectuara por medio de modulo de análisis de elemento finito del software SolidWorks 2010, con una carga efectuada sobre el eslabón de 20 N/m. El análisis se ve ejemplificado en la figura 13

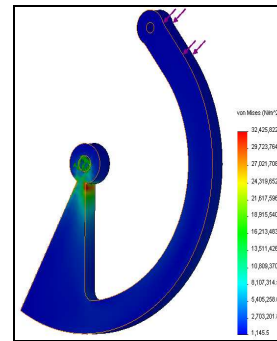


Fig. 13. Brazo análisis de esfuerzo.

El eslabón presenta la mayor carga en la parte del soporte del brazo la cual corresponde a 32 MPa y el modulo de elasticidad del aluminio es de 70Gpa. Por la tanto garantizamos que nuestro prototipo no presentara una deformación crítica, no presentando fractura.

El software presentara una deformación máxima de 1.394 e-001 mm como se muestra en la figura 14. Con este análisis comprobamos que la deformación que puede presentar nuestro prototipo es mínima, asegurando el funcionamiento desea para el dispositivo.

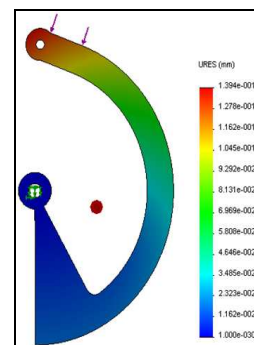


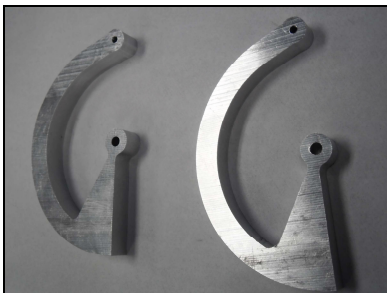
Fig. 14. Brazo análisis de deformación.

### 3. Análisis de resultados

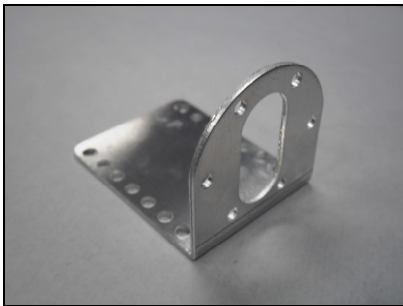
Los resultados obtenidos en los análisis de esfuerzo del prototipo permiten al dispositivo soportar cargas de 20N/m en el efector final sin sufrir alteraciones en la estructura del dispositivo.

El diseño obtenido de nuestro prototipo fue realizado con el fin obtener un prototipo que pueda ser manufacturado y en 6 meses

Para la fecha en que se llevara a cabo el congreso el dispositivo estará manufacturado en su totalidad. Las piezas maquinadas a la fecha de entrega del presente artículo se muestran en las figuras 15 y 16.



**Fig. 15. Brazo manufacturado.**



**Fig. 16. Soporte para motor.**

### 4. Conclusiones

Este diseño nos permitirá realizar un prototipo competitivo con los ya existentes en el mercado, debido a que presentara una arquitectura abierta en el control de los motores, la manufactura del dispositivo se realizara en aluminio.

Un trabajo a futuro en el proceso del diseño de nuestro prototipo seria realizar el de agregar 3 grados de orientación

### Referencias

- [1] Lung-Wen T. "Robot analysis". Wiley-Interscience. p.p 116-130. 1999.
- [2] Spong, M. "Robot Modeling and Control" JOHN WILEY & SONS, INC, primera edición pp 30- 70. 2000.