

Sistema de Interacción Física Hombre-Robot CyberForce: Modelado Matemático y Control

Ramírez Zamora, Juan Daniel; Domínguez Ramírez, Omar Arturo

Juan Daniel Ramírez Zamora

juandaniel_ramirez@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Omar Arturo Domínguez Ramírez

omar@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

ISSN-e: 2007-6363

Periodicidad: Semestral

vol. 5, núm. 10, 70-80, 2018

sitioweb@uaeh.edu.mx

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/595/5952866037/>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Resumen: La cinemática de posición y diferencial, para un dispositivo háptico, representan el modelo matemático que describe el comportamiento y la evolución de su geometría espacial. Las contribuciones en un sistema de Interacción Física Humano-Robot son:

i) planificación del movimiento cartesiano operativo y verificación del desempeño en las tareas de la guía táctil pasiva, ii) relación par / fuerza a través de la matriz Jacobiana analítica con propósitos en exploración háptica activa, iii) Análisis de manipulación cinemática en tiempo real y trayectorias de planificación. En este trabajo se obtiene el modelo cinemático de posición y diferencial, así como simulaciones y validaciones experimentales, para un dispositivo háptico CyberForce en su cadena cinemática de posición.

Palabras clave: Modelo Cinemático, CyberForce, Interfaz háptica, Guiado háptico, Planificación de movimiento.

Abstract: English Summary

Man-Robot Physical Interaction System CyberForce: Mathematical Model and Control

The forward and inverse kinematics of position and its temporal derivatives and, the manipulability analysis for a haptic device, represent the mathematical model that describes the behavior and evolution of its spatial geometry. Allow to compute the mathematical relationship of force and motion. In this work, the contributions in a Human-Robot Physical Interaction System are: i) motion planning in the operational coordinates (cartesian workspace) and high performance in a passive kinesthetic guidance task, ii) torque / force relationship through of the analytical Jacobian matrix (in a passive and active haptic scheme: guidance and exploration) and, iii) Real-time compute of a manipulability analysis to optimal path planning. In this research work, we obtain the forward and inverse kinematic model of position and its derivatives. Digital simulations and experimental results are presented, for a Cyberforce haptic device as mathematical model and experimental platform in close loop with a classical control law.

Keywords: Model Kinematic, CyberForce, Haptic Interface, Haptic Guidance, Motion Planning.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de interacción hombre-máquina, en particular los sistemas de interacción humano-robot (HRPI), representan un nuevo paradigma para resolver problemas de inmersión virtual activa (entornos virtuales dinámicos), estaciones de usuario remoto, teleoperación de sistemas robóticos complejos donde existen riesgos humanos, Para la evaluación biomecánica y la formación, así como sistemas interactivos de visualización científica y la simulación de eventos dinámicos complejos.

La comunidad científica y académica, ha propuesto continuamente diversos esquemas y plataformas para alcanzar metas como las descritas anteriormente, y promueve el diseño desde el ámbito de la tarea y la aplicación. La plataforma CyberTeam, consiste en: i) Dispositivo háptico de Cyberforce (mecanismo de eslabones articulados con 6 grados de libertad, baja inercia y dinámica tribológica), útil para tareas de posición, ii) Dispositivo CyberGrasp (exoesqueleto de mano para recrear la fuerza cinestésica con 5 puntos de contacto) con retroalimentación de flexión-extensión y abducción-aducción de las falanges a través de, iii) Guante CyberGlove. Esta plataforma HRpI tiene importantes contribuciones en la teleoperación y la interacción virtual activa; Para implementar estrategias de control, detección de colisiones y planificación de movimientos, modelos matemáticos y que en particular el modelo cinemático juega un papel importante en la obtención del análisis cinemático de las propiedades de manipulación y validación numérica, así como la experimental que se presentan como contribución en este trabajo de investigación.

2. DISPOSITIVO HÁPTICO CYBERFORCE

El sistema mayordomo - exoesqueleto (CyberTeam), es constituido de un mecanismo de eslabones articulados de 6 grados de libertad (CyberForce) que garantiza el posicionamiento y orientación de un exoesqueleto de 5 grados de libertad (CyberGrasp) empleado en tareas de manipulación en ambientes virtuales dinámicos deformables, para ello emplea como retroalimentación con un guante de 22 sensores de fibra de carbono (CyberGlove) para medición de flexión-extensión y aducción- abducción de falanges.

El sistema mayordomo - exoesqueleto (CyberTeam), es constituido de un mecanismo de eslabones articulados de 6 grados de libertad (CyberForce) que garantiza el posicionamiento y orientación de un exoesqueleto de 5 grados de libertad (CyberGrasp) empleado en tareas de manipulación en ambientes virtuales dinámicos deformables, para ello emplea como retroalimentación con un guante de 22 sensores de fibra de carbono (CyberGlove) para medición de flexión-extensión y aducción- abducción de falanges.

2.1. Características de la interfaz háptica CyberForce

El sistema CyberForce es capaz de operar en el espacio de trabajo más grande, sin embargo, las especificaciones de la fuerza y la posición pueden ser reducidas cuando se opera fuera del área de trabajo de especificación (Briseño-Cerón (2012)).

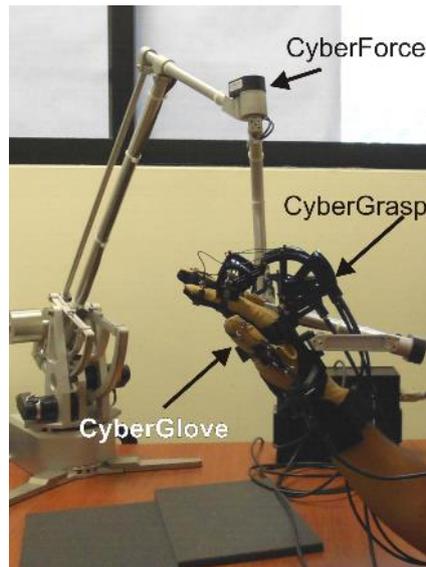


FIGURA 1:
Dispositivo háptico CyberForce.

La instrumentación en el CyberForce corresponde a 6 codificadores ópticos que proporcionan la posición articular (y cuya equivalencia en el espacio operacional es 0.0024-0.0029 in de resolución en el subespacio G J de la Figura 2-WS1) y orientación de la mano (con 0.09° en roll, pitch y yaw), ya que este es un sistema subactuado, a partir de la unidad de control de fuerza (FCU) se retroalimenta la fuerza en los tres grados de libertad que proporcionan el posicionamiento global. El FCU también es el encargado de la interfaz a un computador por medio de una red ethernet (115200 baudios), basado en un ambiente de programación en C++ y la conexión para envío de fuerza, lectura y manipulación de datos entre los dispositivos del CyberTeam (CyberGlove, CyberGrasp y CyberForce: Figura 1).

En la Figura 2, se presenta el espacio de configuraciones admisibles (WS2), y corresponde a los puntos de operación alcanzables, desde el centro de la muñeca esférica hasta el origen operacional definido como la intersección del eje de rotación de la base y el plano formado por la placa de la armadura. En WS1, se describen para $\theta_1 = 0$ Rad los límites de operación que el dispositivo háptico tiene en el plano Y-Z (pares cartesianos A -F, definidos en la Tabla 2.1); se dan a conocer los valores de manipulabilidad basada en el determinante de la matriz Jacobiana, en los límites de operación. El subespacio de operación definido en G - J corresponde a una región que garantiza una fuerza de operación $7,2 \leq F \leq 8,8$ N, cuya manipulabilidad en el centroide es de $MI = 0,0852$. Los valores de la columna de manipulabilidad en la Tabla 2.1, se conservan a lo largo del intervalo $1,1606 \theta_1 1,1606$ Rad (WS3) (LLC (2007)).

Los puntos A a la J se refieren a la posición cartesiana en el plano YZ desde la muñeca hasta el centro de rotación del dispositivo. El origen del plano YZ se define como la intersección del eje de rotación de base y el plano formado por la placa de base de la armadura CyberForce.

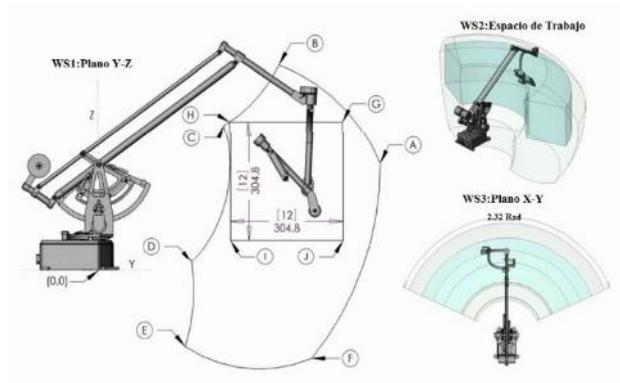


FIGURA 2:
Espacio de trabajo CyberForce.

Punto	Y m	Z m	Manipulabilidad (MI)
A	0.76	0.275	0.1018
B	0.489	0.529	0.0844
C	0.340	0.373	0.0448
D	0.251	0.20	0.0249
E	0.234	-0.196	0.0396
F	0.575	-0.226	0.0773
G	0.660	0.387	0.1107
H	0.356	0.387	0.0490
I	0.356	0.098	0.0510
J	0.660	0.098	0.1091

3. MODELO MATEMÁTICO CYBERFORCE

La contribución esencial corresponde a la planificación de movimiento en el espacio operacional, al emplear una estrategia de control articular; por otro lado, en el mapeo de los vectores de fuerza y par, a través de la matriz Jacobiana. Dicha matriz permite verificar las condiciones de manipulabilidad cinemática en el desarrollo de la tarea del dispositivo háptico. La cinemática es indispensable en la evaluación de los algoritmos para la detección de colisiones y condiciones deformables, al interactuar con ambientes virtuales dinámicos (T. and Salisbury (1994)). Por lo que se reporta en este trabajo de investigación, la cinemática del dispositivo háptico CyberForce para tareas de interacción física con ambientes virtuales, y ambientes reales teleoperados. En la Figura 3 se ilustra un diagrama de bloques, el cual relaciona a los modelos cinemáticos directo e inverso.

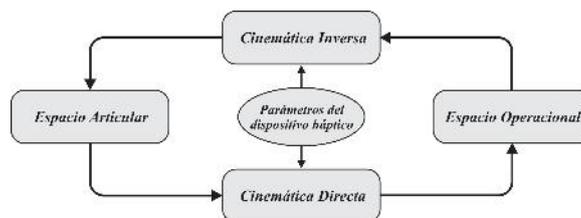


FIGURA 3:
Relación entre la cinemática directa e inversa.

3.1. Modelo cinemático de posición

La cinemática de un robot manipulador está enfocada al estudio del movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del manipulador como una función del tiempo, y, en particular, por las variaciones entre la posición y orientación del extremo final del dispositivo con los valores que toman sus coordenadas articulares. Existen dos problemas fundamentales para la solución de la cinemática de un robot manipulador (Jarillo-Silva and Domínguez-Ramírez (2010)).

Problema cinemático directo: consiste en la determinación de la posición y orientación del efector final del manipulador con respecto a un sistema de coordenadas que son tomadas como referencia, conocidos los valores articulares y los parámetros geométricos de los elementos del dispositivo. Dado que un robot manipulador puede considerarse como una cadena cinemática, el problema cinemático directo se reduce a encontrar la transformación a coordenadas homogéneas que relacione la posición y orientación de su extremo final respecto del sistema de referencia fijo situado en la base del mismo. Un algoritmo que permite la resolución de este problema es el algoritmo de Denavit-Hartenberg (DH) (Spong (1989)). Sin embargo, el problema no es resolver la posición y orientación del efector final, sino también resolver la cinemática directa diferencial, la cual consiste en determinar la velocidad y aceleración del efector final en su espacio de trabajo.

Problema cinemático inverso: consiste en la resolución de la configuración que debe adoptar el robot manipulador para una posición y orientación de su efector final, además de determinar su velocidad y aceleración.

Modelo cinemático directo de posición de CyberForce (MCDP)

Descrito como:

$$x = f(\theta) \tag{1}$$

donde: $x \in \mathbb{R}^m$ corresponde a un vector con m coordenadas operacionales y $\theta \in \mathbb{R}^n$ corresponde a un vector con n variables articulares. Con base en la metodología Denavit-Hartenberg (D-H) y la cadena cinemática del dispositivo CyberForce (Figura 4), los parámetros D-H son definidos en la Tabla 3.1, con: $d_1 = 0,270\text{m}$, $d_4 = 0,3174\text{m}$, $a_2 = 0,458\text{m}$ y $a_3 = 0,2098\text{m}$ que corresponden a las longitudes de dispositivo.

i	a	α	d	θ
1	0	$\frac{\pi}{2}$	d_1	$\theta_1^* + \frac{\pi}{2}$
2	a_2	0	0	θ_2^*
3	a_3	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_3^*
4	0	$-\frac{\pi}{2}$	d_4	θ_4
5	0	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_5
6	0	0	d_6	θ_6

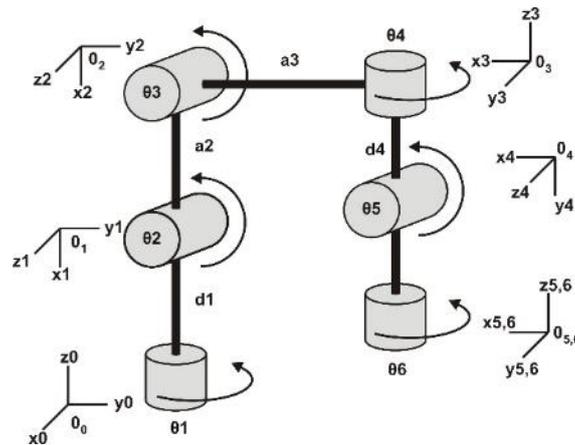


FIGURA 4:
Cadena cinemática CyberForce,

donde $\{0_0, 0_1, 0_2\}$: origen de los marcos ortogonales en articulaciones de posición
 y $\{0_3, 0_4, 0_{5,6}\}$: origen de los marcos ortogonales en articulaciones de orientación.

Con base en el método D-H (Denavit and Hartenberg (1955)), evaluado para robots seriales cadena abierta y empleando la Tabla 3.1 asociada a la cadena cinemática de la Figura 4, el MCDP que permite localizar en el espacio de trabajo al efector final en términos de las tres primeras variables articulares, es descrito por la Ecuación 2.

$$\begin{aligned}
 x &= -s_1(a_3c_{23} + a_2c_2) - d_4s_{23}s_1 \\
 y &= c_1(a_3c_{23} + a_2c_2) + d_4s_{23}c_1 \\
 z &= d_1 - d_4c_{23} + a_3s_{23} + a_2s_2
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

donde: $s_i = \sin(\theta_i)$, $c_i = \cos(\theta_i)$, $s_{jk} = \sin(\theta_j + \theta_k)$, $c_{jk} = \cos(\theta_j + \theta_k)$

Modelo cinemático de inverso de CyberForce (MCIP)

El MCIP, útil en la planificación de movimiento y en relaciones funcionales que describen la interacción con un ambiente virtual, permite encontrar a las variables articulares en función de las coordenadas operacionales (Ecuación 3).

$$\theta = f^{-1}(x)
 \tag{3}$$

Para los tres grados de libertad que implican el cálculo de la posición, y empleando la vista definida por el marco de referencia X – Y de la Figura 5, se define θ_1 .

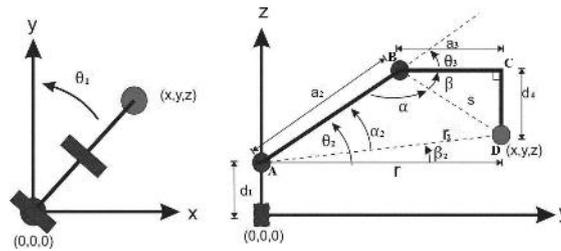


FIGURA 5:
Diagrama para calcular el MCIP.

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) - \frac{\pi}{2} \tag{4}$$

Teniendo en cuenta que r es la proyección del efector final en el plano $X - Y$, esta se obtiene a partir de la magnitud de sus componentes rectangulares. Por otro lado, con base en r y $z - d_1$ se obtiene r_2 . Finalmente se calcula

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (z - d_1)^2}$$

$$s = \sqrt{d_2^2 + d_4^2}$$

$$\beta_2 = \text{arctan}\left(\frac{d_4 - z}{r}\right)$$

Aplicando ley de cosenos al triángulo que conforma los puntos ABD para el cálculo de α_2 , y con utilidad en la determinación de θ_2 , se tiene:

$$\cos(\alpha_2) = \frac{a_1^2 - a_2^2 + a_3^2 + r_2^2}{2a_1a_2}$$

$$\alpha_2 = \text{atan2}(\sqrt{1 - \cos^2(\alpha_2)}, \cos(\alpha_2))$$

$$\theta_2 = \alpha_2 + \beta_2 \tag{5}$$

Para el cálculo de la variable articular θ_3 , el conjunto de variables auxiliares empleadas, son descritas en la geometría de la Figura 5. La distancia s y el cálculo de β se deducen con las magnitudes de a_3 y d_4 . El cálculo de α se basa en el triángulo formado por las intersecciones BCD.

$$\cos(\alpha_3) = \frac{a_3^2 + a_2^2 + d_4^2 - r_2^2}{2a_2a_3}$$

$$\alpha = \text{atan}\left(\sqrt{\frac{r_2 - \cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_3)}}
$$\beta = \text{arctan}\left(\frac{d_4}{a_3}\right)$$$$

$$\theta_3 = \beta + \alpha - \pi \tag{6}$$

3.2. Modelo cinemático de velocidad.

El modelo cinemático de velocidad relaciona a la velocidad articular en términos de la velocidad operacional y viceversa, y corresponde a la derivada temporal del modelo cinemático de posición y que de esta manera se genera la matriz Jacobiana J .

La matriz jacobiana es de gran ayuda en el análisis y el control del movimiento de un manipulador en cuanto a la determinación de configuraciones singulares. En las cercanías de un punto singular, para un pequeño cambio de posición sería necesaria una energía muy elevada, también existen configuraciones desde las cuales

algunas direcciones son inalcanzables, por lo tanto el Jacobiano nos indica zonas singulares de CyberForce (Domínguez-Ramírez (2004)).

Modelo cinemático directo de velocidad del CyberForce (MCDV)

El MCDV se describe como:

$$\dot{x} = J\dot{\theta} \tag{7}$$

donde $\dot{x} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponde al vector de velocidades operacionales, $J \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ denota la matriz Jacobiana, finalmente $\dot{\theta} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ representa el vector de velocidades articulares. De forma explícita se tiene que la Ecuación 7, es:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}}_{\text{Matriz Jacobiana}} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \tag{8}$$

donde

$$J_{11} = -c_1(a_3c_{23} + a_2c_2) - d_4s_{23}c_1$$

$$J_{12} = s_1(a_3s_{23} + a_2s_2) - d_4c_{23}s_1$$

$$J_{13} = a_3s_{23}s_1 - d_4c_{23}s_1$$

$$J_{21} = -s_1(a_3c_{23} + a_2c_2) - d_4s_{23}s_1$$

$$J_{22} = d_4c_{23}c_1 - c_1(a_3s_{23} + a_2s_2)$$

$$J_{23} = d_4c_{23}c_1 - a_3s_{23}c_1$$

$$J_{31} = 0$$

$$J_{32} = a_3c_{23} + d_4s_{23} + a_2c_2$$

$$J_{33} = a_3c_{23} + d_4s_{23}$$

donde: $s_i = \sin(\theta_i)$, $c_i = \cos(\theta_i)$, $s_{jk} = \sin(\theta_j + \theta_k)$, $c_{jk} = \cos(\theta_j + \theta_k)$

Modelo cinemático inverso de velocidad de CyberForce (MCIV)

El MCIV está definido por $\dot{\theta} = J^{-1}\dot{x}$, donde $J^{-1} = adj(J)/det(J)$ corresponde a la inversa de J, $adj(J)$ es la adjunta de J y $det(J)$ corresponde al determinante siguiente:

$$\det(J) = \frac{a_2^2 d_4 c_2 c_3}{2} - \frac{a_2^2 a_4 s_{23}}{2} + \frac{a_2 s_2}{2} (a_3^2 + d_4^2) + \frac{a_2^2 a_3 s_{2-3}}{2} - \frac{a_2 s_{2+23}}{2} (a_3^2 + d_4^2) + a_2 a_3 d_4 c_{2+23} \tag{9}$$

donde

donde $s_{j-k} = \sin(\theta_j - \theta_k)$, $c_{j-k} = \cos(\theta_j - \theta_k)$, $s_{j+2k} = \sin(\theta_j + 2\theta_k)$, $c_{j+2k} = \cos(\theta_j + 2\theta_k)$. Las condiciones críticas, correspondientes a baja manipulabilidad, están descritas en la Tabla 2.1. Por lo que esta cadena cinemática cuenta con alta admisibilidad de configuraciones.

Los elementos de la matriz Jacobiana inversa son:

$$j_{11}^{-1} = -\frac{c_1}{a_3 c_{23} + d_4 s_{23} + a_2 c_2}$$

$$j_{12}^{-1} = -s_1 / (a_3 c_{23} + d_4 s_{23} + a_2 c_2)$$

$$J_{13}^{-1} = 0$$

$$J_{21}^{-1} = (a3c2c3 s1 + d4c2 s1 s3 + d4c3 s1 s2 - a3 s1 s2 s3)/(a2a3 s3 - a2d4c3)$$

$$J_{22}^{-1} = (a3c1c2c3 + d4c1c2 s3 + d4c1c3 s2 - a3c1 s2 s3)/(a2a3 s3 - a2d4c3)$$

$$J_{23}^{-1} = (d4c2c3 - a3 s2c3)/(a2d4c3 - a2a3 s3)$$

$$J_{31}^{-1} = (a2c2 s1 + a3c2c3 s1 + d4c2 s1 s3 + d4c3 s1 s2 - a3 s1 s2 s3)/(a2a3 s3 - a2d4c3)$$

$$J_{32}^{-1} = (c1(a3c2c3 + d4c2c3 + a2c2))/(a2(d4c3 - a3 s3))$$

$$J_{33}^{-1} = (a3 s2c3 - d4c2c3 + a2 c2)/(a2(d4c3 - a3 s3))$$

3.3. Relación fuerza-par

La relación existente entre el espacio cartesiano y el espacio articular, para un mecanismo de eslabones articulados como un robot manipulador (Spong (1989)) o un dispositivo háptico (C. (1996)), con respecto a las fuerzas de interacción es descrita con base en $\tau = J^T f$, donde $\tau \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ y $f \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ corresponde al par articular y define la fuerza aplicada en el efector final. Para el caso de estudio $n = 3$, corresponde a un dispositivo háptico en configuración mayordomo basado en un modelo de impedancia, con baja dinámica inercial y fricción articular para tareas de interacción de alto desempeño, en tareas de guiado háptico pasivo. En estas condiciones, la dinámica de fuerza aplicada f de manera virtual en el efector final y necesaria para reproducir una tarea de seguimiento, depende estrictamente del vector de pares generalizados τ definido a partir de una ley de control articular, con la expresión $f = J^{-T} \tau$

3.4. Manipulabilidad

El desempeño de un sistema robótico depende, entre otros aspectos, de la región del espacio de trabajo en el que se planifique la tarea como consigna de movimiento. Con base en la Tabla 2.1, el subespacio de mejor desempeño se encuentra acotado por los límites de operación que el dispositivo háptico tiene en el plano Y-Z (pares cartesianos A- F) y definidos de manera gráfica en la Figura 2. La manipulabilidad (MI), representa a una métrica útil en la validación de la región con mejor desempeño en el espacio de trabajo, y contribuye en definir al conjunto de configuraciones admisibles con menos esfuerzo electromecánico del mecanismo de eslabones articulados. Autores como (Daubechies (1990)) definen a MI como una función de la matriz Jacobiana, equivalente a $\sqrt{|J|}$; para el caso de estudio J es de rango completo y MI se puede definir como $|det(J)|$. En la Tabla 2.1, se muestran a los valores de la manipulabilidad en los puntos estratégicos del espacio de trabajo. La Figura 6, representa a las regiones de manipulabilidad detalladas con relación al espacio operacional de trabajo, y puntos cartesianos definidos en la Tabla 2.1; la Figura 7 con relación al espacio articular.

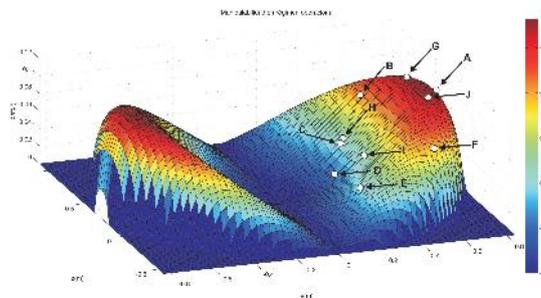


FIGURA 6:
Manipulabilidad en el régimen operacional

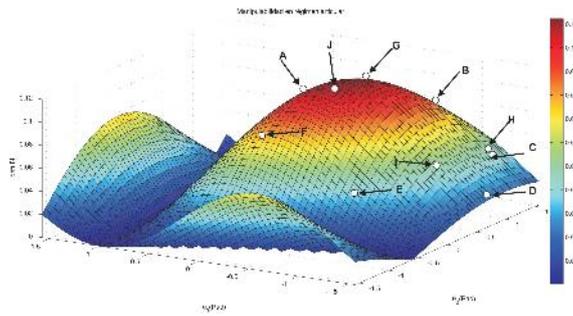


FIGURA 7:
Manipulabilidad en el régimen articular

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA CYBERFORCE

4.1. Descripción de la plataforma virtual

La simulación numérica y la correspondiente representación virtual, útiles en la validación de la cinemática reportada analíticamente en la Sección 3, fueron desarrollados con herramientas computacionales de la manera siguiente: i) Modelo 3D con la geometría real del dispositivo CyberForce (SolidWorks versión 2012), ii) Modelo cinemático a partir del modelo 3D con herramientas de elemento finito (Adams versión 2012) y iii) Procesamiento numérico de entrada y salida sobre el modelo de Adams (Simulink/Matlab versión 2010). El modelo 3D diseñado en SolidWorks es mostrado en la Figura 8.



FIGURA 8:
Diseño en SolidWorks del robot CyberForce.

4.2. Validación de la cinemática en la plataforma virtual

El modelo virtual 3D, integrado en la plataforma de Adams, proporciona la posición y velocidad en los espacios operacional y articular; así como la posibilidad de recibir a la serie de tiempo de τ , por lo tanto la validación comparativa de la cinemática a partir del modelo virtual (Figura 9) y el modelo analítico (Sección 3), se realizó tomando en cuenta, que para el cálculo del MCIP y el MCIV se requiere de la posición y velocidad operacionales del modelo virtual, así como el MCDP y el MCDV requiere de la posición y velocidad articulares. El diagrama de la Figura 10, describe el flujo de variables para la validación de la cinemática del dispositivo háptico CyberForce.

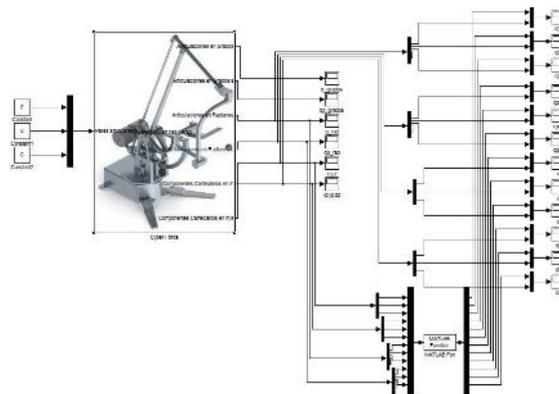


FIGURA 9:
Vinculación entre Simulink y Adams para la validación de la cinemática.

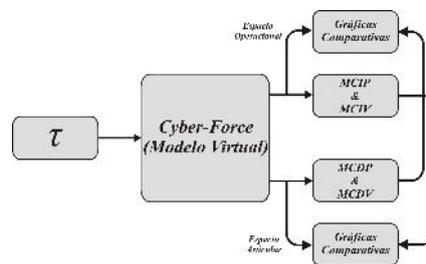


FIGURA 10:
Diagrama descriptivo de la comprobación cinemática.

La validación de la cinemática se llevó a cabo teniendo como condiciones iniciales al punto H de la Tabla 2.1, el periodo de muestreo es $T_M = 0,0058s$ ya que este es el caracterizado para la adquisición experimental. Una vez conociendo esto, se permitió que la dinámica modelada con Adams, llevará al dispositivo al límite mecánico cercano al punto B. En la Figura 11, se muestra la validación MCIP. En la Figura 12, se muestra la validación del MCIV. Se aprecia la convergencia a cero una vez que el robot entra en reposo por el límite mecánico o condición natural de equilibrio. En la Figura 13, se muestra el caso contrario donde se valida al MCDP, se puede apreciar que la gráfica inicia en el punto H y termina cercano al punto B de la Tabla 2.1. Por último, en la Figura 14, se valida la cinemática de velocidad y la condición de equilibrio natural.

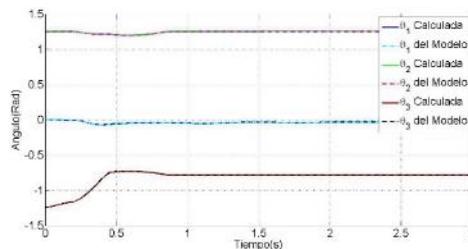


FIGURA 11:
Validación numérica del MCIP.

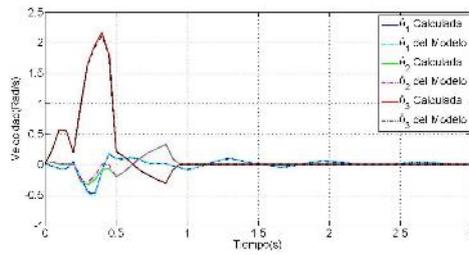


FIGURA 12:
Validación numérica del MCIV.

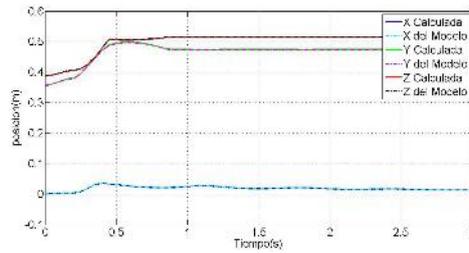


FIGURA 13:
Validación numérica del MCDP

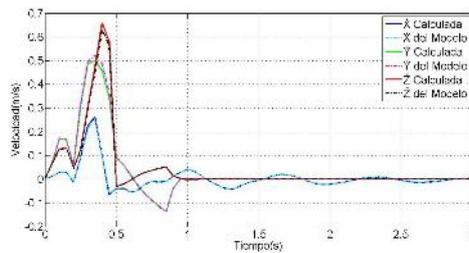


FIGURA 14:
Validación numérica del MCDV

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La validación experimental de la cinemática en la plataforma CyberForce (Figura 1), se realizó a partir del modelo analítico (Sección 3), tomando en cuenta la lectura de los codificadores ópticos (CyberForce-FCU) a través de las clases de comunicación bilateral (consignas de fuerza y lectura de movimiento operacional) y la estimación de velocidad (derivador de Euler). Los MCIP y MCIV fueron evaluados con el movimiento operacional, para obtener la conducta correspondiente en el espacio articular, y que a su vez se empleó para validar a los MCDP y MCDV. Tal y como representa la Figura15.

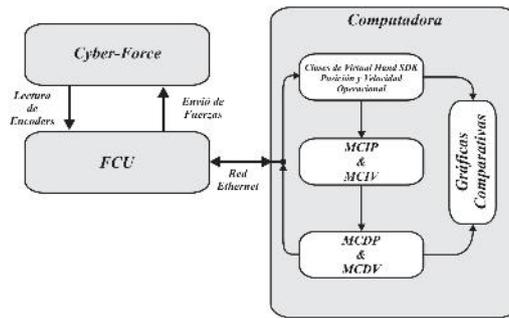


FIGURA 15:
Diagrama descriptivo de la validación experimental para el modelo cinemático.

5.1. Validación experimental activa de la cinemática

Consiste en modificar a las coordenadas operacionales a partir de un movimiento aleatorio e inducido por el operador humano (Figura 16), con el propósito de instrumentar a la posición operacional con un tiempo de muestreo de $MT = 0,0058s$, y la estimación de la velocidad operacional empleando una aproximación de Euler. Todo ello con base en el Bloque B de la Figura 15. La Figura 17 muestra la comparación entre la posición operacional, proporcionada por las clases Virtual Hand SDK y el modelo cinemático analítico (Sección 3); del mismo modo la prueba de velocidad (Figura 18).

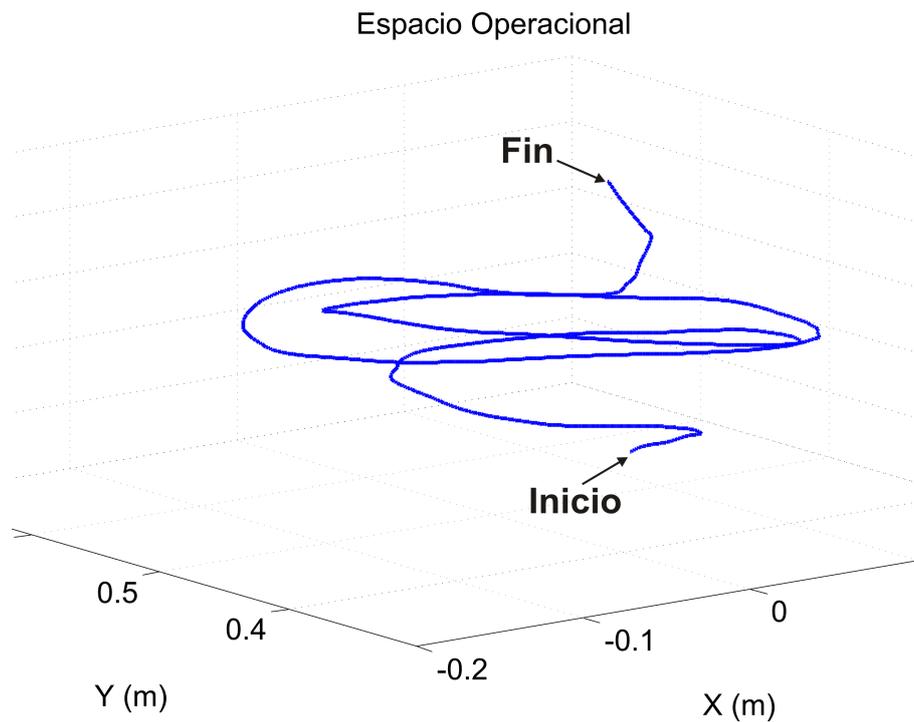


FIGURA 16:
Trayectoria definida por el operador humano para la validación de la cinemática.

El dispositivo CyberForce, tiene como propósito la posición y orientación del exoesqueleto CyberGrasp.

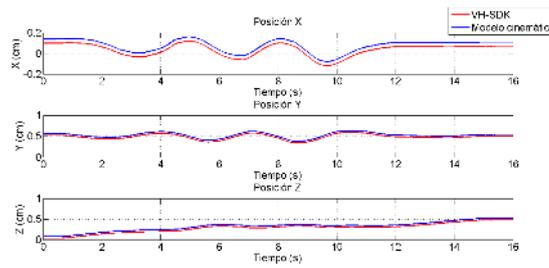


FIGURA 17:
Validación de la cinemática de posición (MCDP y MCIP).

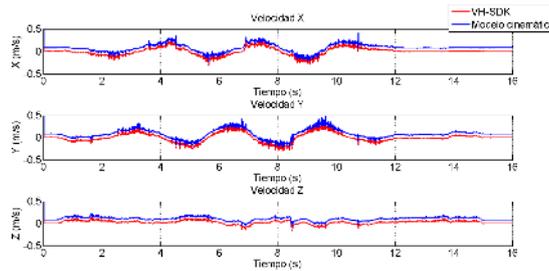


FIGURA 18:
Validación de la cinemática de velocidad (MCDV y MCIV).

6. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL PASIVA DE LA CINEMÁTICA

Con el propósito de validar a la cinemática presentada en la Sección 3 en planificación de movimiento, se propone la aplicación de una estrategia de control pasiva-robusta clásica, tipo proporcional-derivativa en sus versiones articular (Ecuación 10) y cartesiana (Ecuación 11) (F.L.Lewis et al. (1993)).

$$\tau = -k_{\theta} s_{\theta} \quad (10)$$

$$f = -k_x s_x \quad (11)$$

En donde, $s_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} + \alpha_{\theta} \theta$ representa al error extendido en el espacio articular; $s_x = \frac{dx}{dt} + \alpha_x x$ y corresponde al error extendido en el espacio cartesiano; $\theta = \theta - \theta_d \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ constituye al vector de error de posición articular, $x = x - x_d \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ constituye al vector de error de coordenadas operacionales; θ_d y x_d representan al conjunto de trayectorias articulares y cartesianas deseadas respectivamente; $K_{\theta} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $K_x \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $\alpha_{\theta} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ y $\alpha_x \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ corresponden a matrices de ganancias de control simétricas y definidas positivas.

6.1. Planificación de movimiento

La tarea $T_{DH}(t)$, como consigna de movimiento aplicada al dispositivo háptico, es constituida por tres trayectorias; $T_{DH1}(t)$ corresponde a la regulación basada en seguimiento operacional, con el propósito de resolver la dinámica inercial debido al estado de reposo y de movimiento, así como establecer un tiempo de convergencia t_{b1} . La trayectoria $T_{DH2}(t)$, corresponde al lugar geométrico de una circunferencia (Ecuación 12), con un tiempo de duración $T_{c2} = 2\pi / \omega$; con ω como la velocidad angular, r el radio, $[X_c, Y_c, Z_c]$ el

centro de la circunferencia y $T_{Cn} = t_{bn} - t_{bn-1}$ es el tiempo de convergencia de la n-ésima trayectoria de $T_{DH}(t)$. $T_{DH-3}(t)$ corresponde a la regulación basada en seguimiento hasta la condición inicial de la tarea.

$$T_{DH}(t) = \begin{cases} T_{DH-1}(t) & 0 \leq t \leq t_{b1} \\ T_{DH-2}(t) & t_{b1} < t \leq t_{b2} \\ T_{DH-3}(t) & t_{b2} < t \leq t_{b3} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} X_d(t) \\ Y_d(t) \\ Z_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c + r \cos(\omega t) \\ Y_c \\ Z_c + r \sin(\omega t) \end{bmatrix} \tag{12}$$

Las trayectorias $T_{DH-1}(t)$ y $T_{DH-3}(t)$, son definidas por el polinomio de la Ecuación 13, con un tiempo base T_{Cn} ; y corresponde a la trayectoria de seguimiento operacional o articular de acuerdo a la ley de control aplicada, con una conducta suave que limita esfuerzos electromecánicos del mecanismo de eslabones articulados, y garantiza convergencia en tiempo finito. Su derivada $\xi'_n(t)$ contribuye a que la velocidad en el tiempo de convergencia sea cero, y cuyo valor máximo sea en la mitad de dicho tiempo.

$$\xi_n(t) = 10 \frac{(t - t_{bn-1})^3}{T_{Cn}^3} - 15 \frac{(t - t_{bn-1})^4}{T_{Cn}^4} + 6 \frac{(t - t_{bn-1})^5}{T_{Cn}^5} \tag{13}$$

Dada la planificación de movimiento en el espacio operacional, las trayectorias que involucran a la regulación basada en seguimiento son descritas como:

$$T_{DH-1}(t) : (X_c + r)\xi(t), Y_c\xi(t), Z_c\xi(t) \text{ en } t_{b0} \leq t \leq t_{b1}$$

$$T_{DH-3}(t) : (X_c - r)\xi(t), Y_c\xi(t), Z_c\xi(t) \text{ en } t_{b2} < t \leq t_{b3}$$

Las trayectorias para seguimiento en el espacio articular son obtenidas con el uso de la cinemática inversa de posición y velocidad definidas en la Sección 3.

6.2. Circunferencia

La Tabla 6.2, contiene los parámetros numéricos requeridos para la tarea de seguimiento $T_{DH}(t)$ y las ganancias de control. El desempeño en el espacio de trabajo operacional, bajo las estrategias de control (de la Sección 6) en comparación con la referencia (definida en la Sección 6.1), es presentado en la Figura 19.

TABLA 6.2

Parámetro	Valor
K_θ	[75, 75, 75]
α_θ	[0.01, 0.01, 0.01]
K_x	[300, 300, 300]
α_x	[0.01, 0.01, 0.01]
t_{b0}	0 s
t_{b1}	8 s
t_{b2}	24 s
t_{b3}	32 s
r	0.1 m
$[X_c, Y_c, Z_c]$	[0, 0.508, 0.235] m
$[X_0, Y_0, Z_0]$	[0, 0.506, 0.492] m

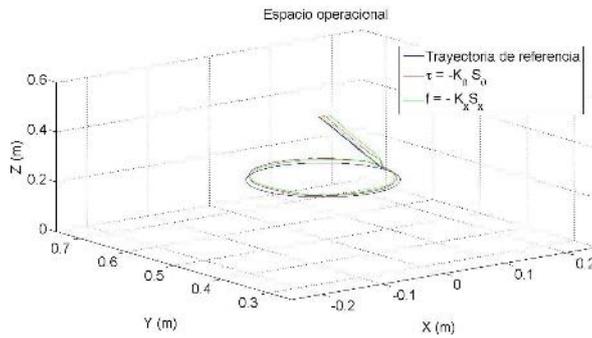


FIGURA 19:
Desempeño en el espacio de trabajo.

En las Figuras 20 y 21 se muestran los resultados de posiciones articulares y operacionales, en las Figuras 22 y 23 se muestran las velocidades de las componentes articulares y operacionales, donde para el caso del control articular se implementa el MCIP y el MCIV para el cálculo del control, el MCDP y MCDV para la representación en el en el espacio operacional y la relación par fuerza para enviar los valores de τ transformados a fuerza f en la serie de tiempo.

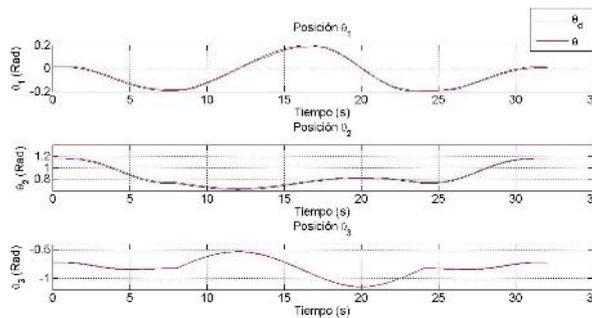


FIGURA 20:
Posición en controlador articular.

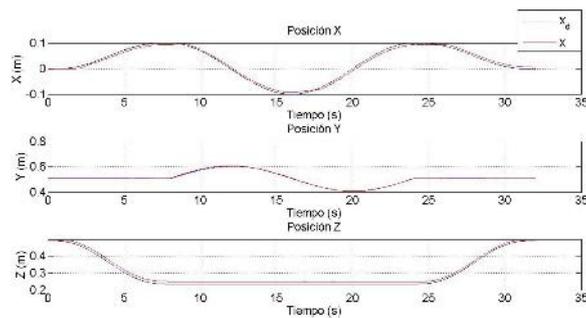


FIGURA 21:
Posición en controlador cartesiano.

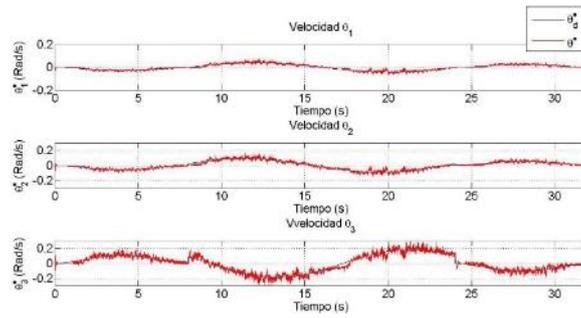


FIGURA 22:
Velocidad en controlador articular.

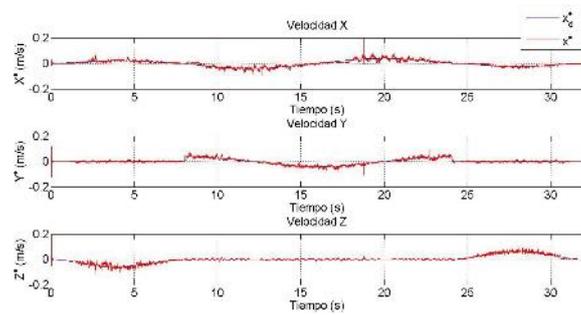


FIGURA 23:
Velocidad en controlador cartesiano.

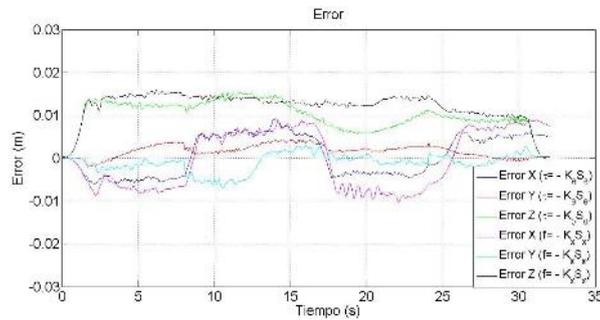


FIGURA 24:
Error de posición articular y cartesiano.

En la Figura 25 y 26 se muestra el error extendido de posición articular y operacional.

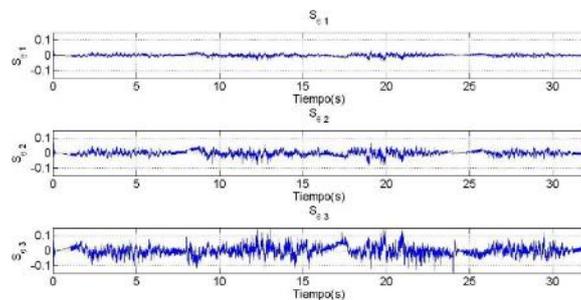


FIGURA 25:
Error extendido articular

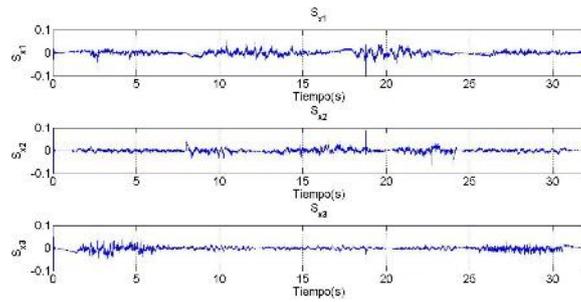


FIGURA 26:
Error extendido cartesiano

En la siguiente Figura 27 se muestra la fuerza aplicada por el controlador articular y cartesiano.

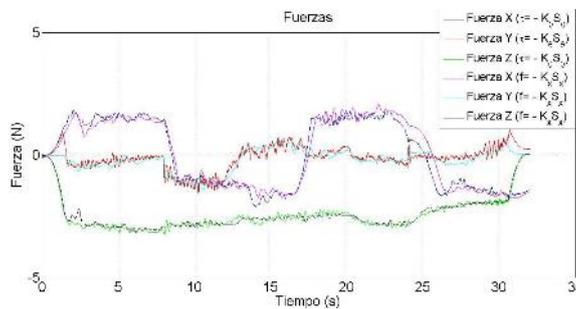


FIGURA 27:
Señal de Fuerza

Para este experimento se muestra la energía consumida por los controladores como se muestra en la Figura 28.

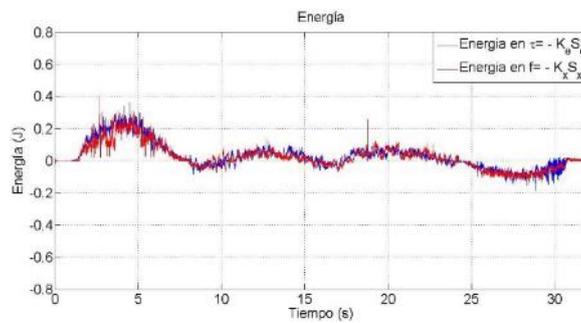


FIGURA 28:
Energía.

Por último, se muestra la gráfica de manipulabilidad de la trayectoria en el tiempo en la Figura 29, 30.

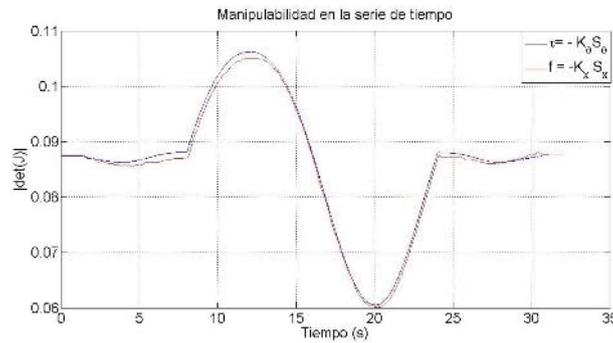


FIGURA 29:
Manipulabilidad de la trayectoria.

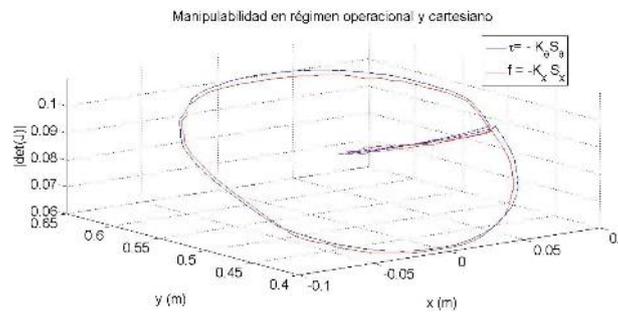


FIGURA 30:
Manipulabilidad de la trayectoria.

7. CONCLUSIONES

Los resultados que se presentan en este trabajo de investigación permiten evaluar al dispositivo CyberForce en diferentes aplicaciones y experimentos, como un dispositivo háptico de interacción física hombre-máquina. La obtención del modelo cinemático del dispositivo háptico, tiene un gran impacto en este trabajo de investigación, puesto que no existen antecedentes de estos resultados reportados en la literatura y es significativamente empleado en la planificación de movimiento ante la aplicación de estrategias de control articular, así como en la evaluación de algoritmos de detección de contacto en inmersión virtual activa. Los experimentos que se incluyen en este capítulo permite verificar el rendimiento del dispositivo y la comprobación del modelo cinemático, dando así una seguridad de implementar estrategias de control en el espacio articular obteniendo resultados satisfactorios al concluir una tarea. Por otra parte, el análisis de manipulabilidad del dispositivo háptico (basado en su matriz Jacobiana) muestra la configuración de espacios admisibles que permiten realizar planificación de movimiento en zonas en donde el esfuerzo mecánico es bajo o despreciable, lo que contribuye en la vida útil y un rendimiento considerable en el mecanismo de eslabones articulados y elementos electrónicos de potencia.

De los resultados obtenidos en este estudio comparativo del controlador lineal proporcional derivativo articular y cartesiano, se puede visualizar que ambos controladores garantizar seguimiento de trayectorias y minimizar los errores de estado estable en posición y velocidad. Se garantiza la arquitectura abierta a través de la planificación de técnicas lineales de control para guiado háptico, validación de la cinemática de posición y diferencial para la planificación de movimiento en espacios articular y cartesiano útil en tareas de guiado háptico.

REFERENCIAS

- Briseño-Cerón, A., 2012. Sistemas Robóticos Complejos para Interacción Háptica con Alto Desempeño Antropomórfico. UPSIN.
- C., B. G., 1996. Force and touch feedback for virtual reality. Electrical and Computer Engineering Department, The State University of New Jersey.
- Daubechies, I., 1990. Foundations of Robotics: Analysis and control. MIT Press. Denavit, J., Hartenberg, R. S., 1955. A kinematic notation for lower pair mechanism. Applied Mechanics, 215–221.
- Domínguez-Ramírez, V.-P., 2004. Diseño e integración de una interfaz háptica activa realista. CINVESTAV México.
- F.L.Lewis, Abdallah, C. T., Dawson, D. M., 1993. Control of Robot Manipulators. Macmillan Publishing Company, Eerwhon, NC.
- Jarillo-Silva, A., Domínguez-Ramírez, O. A., 2010. Joint control strategy for haptic guidance. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), 411 – 416, DOI: 10.1109/CERMA.2010.53. LLC, C. S., 2007. CyberForce User's Guide Version 2.0. rev E.
- Spong, M. W., 1989. Robot Dynamics and Control. John Wiley and Sons.
- T., M., Salisbury, K., 1994. The phantom haptic interface a device for probing virtual objects. Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems.