



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL
ESTADO DE HIDALGO



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E
INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y
SISTEMAS

*“Guiado háptico local con perspectivas de
diagnóstico y rehabilitación neuropsicológica.”*

Tesis para obtener el título de:

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Presentan:

*Aviña Grimaldo Areli Saray
Hernández Rojas Elizabeth*

Director de Tesis:

Dr. Omar A. Domínguez Ramírez

Co-Directores:

*M. en C. Martha Idalid Rivera González
M. en C. Mariano J. Pozas Cárdenas*



Pachuca de Soto, Hgo.2006

Resumen

Discapacidades neuropsicológicas como mal de Parkinson, esclerosis múltiple y ataxia, son enfermedades que en la población se han dado con mayor frecuencia en los últimos años producidos por daños generados en las áreas que tienen la función de la motilidad en el cerebro, de las cuales hasta la fecha no existe una cura pero existe la posibilidad de la rehabilitación. La rehabilitación es un proceso encaminado a lograr que las personas con discapacidades estén en condiciones de alcanzar y mantener un estado funcional desde el punto de vista físico, intelectual, sensorial, etc; en todos los ámbitos que se desarrollen. Estudios previos realizados por neurólogos sustentan que como seres humanos tenemos una parte del cerebro que aprende por simple y llana costumbre. En base a este estudio se ha retomado el concepto de rehabilitación en personas con discapacidades neuropsicológicas, por lo que la comunidad de neurociencias ha decidido empezar a hacer estudios de diagnóstico y rehabilitación en pacientes con dichas discapacidades utilizando interfaces hápticas.

Las interfaces hápticas juegan un papel relevante en tareas de telepresencia y teleoperación, como de manejo de residuos peligrosos, manejo remoto de robots móviles y manipuladores, aplicaciones médicas, mantenimiento a distancia, etc; en este trabajo de investigación se tiene como perspectiva que la interfaz háptica R2SG, interactúe con el paciente y un ambiente virtual, de esta forma un neurólogo podrá dar un bosquejo más exacto sobre el diagnóstico y rehabilitación de su paciente.

Es por eso que en este trabajo se realiza un estudio con una interfaz de dos grados de libertad de desempeño planar sin gravedad R2SG, obteniendo primero el análisis de su estructura mecánica desde el punto de vista cinemático y dinámico para obtener un ambiente de simulación en matlab para corroborar que el análisis obtenido sea correcto, posteriormente fueron aplicados estos modelos experimentalmente en la interfaz realizando movimientos aleatorios para que la comprobación del análisis obtenido fuera en tiempo real; por último se aplicaron dos técnicas de control, control articular y control cartesiano a la cinemática y a la dinámica de la interfaz a nivel simulación; siendo el control cartesiano una de las técnicas mas innovadoras dentro del control para el seguimiento de trayectorias. Se realizó una comparación entre estas dos técnicas de control dentro del seguimiento de dos trayectorias diferentes, una evaluada por un sistema de ecuaciones y otra prediseñada dentro de un laberinto diseñado en Delphi. Este estudio se llegó solo a simulación por lo que tiene perspectivas para aplicarse a la medicina neurológica con propósitos de diagnóstico y rehabilitación en pacientes con discapacidades mencionadas al inicio del texto.

Índice general

1. Introducción	9
1.1. Introducción	9
1.2. Justificación del trabajo	9
1.3. Objetivo general	10
1.4. Objetivos específicos	10
1.5. Contribución del trabajo de investigación	10
1.6. Organización de la tesis.	10
2. Las interfaces hápticas en la rehabilitación	13
2.1. Introducción	13
2.2. Estado del arte de las interfaces hápticas	13
2.3. Discapacidades neuropsicológicas	17
2.4. Estrategias de diagnóstico y rehabilitación de discapacidades neuropsicológicas	23
2.5. Trabajos significativos de diagnóstico y rehabilitación con interfaces hápticas	26
2.6. Conclusiones	29
3. Modelo cinemático directo e inverso de la interfaz háptica R2SG	31
3.1. Introducción	31
3.1.1. Características físicas y geométricas de la interfaz háptica (R2SG)	33
3.2. Obtención analítica del modelo cinemático	34
3.2.1. Modelo cinemático directo de posición (MCDP)	35
3.2.2. Modelo cinemático inverso de posición (MCIP)	37
3.2.3. Modelo cinemático directo de velocidad (MCDV)	39
3.2.4. Modelo cinemático inverso de velocidad (MCIV)	40
3.2.5. Modelo cinemático directo de aceleración (MCDA)	40
3.2.6. Modelo cinemático inverso de aceleración (MCIA)	41
3.3. Comprobación en matlab de la cinemática obtenida	42
3.4. Comprobación experimental de la cinemática de la interfaz háptica R2SG	46
3.5. Conclusiones	53
4. Modelo dinámico de la interfaz háptica R2SG	55
4.1. Introducción	55
4.1.1. Modelo dinámico directo e inverso de un robot.	56
4.2. Análisis del modelo dinámico.	57
4.2.1. Modelado mediante la formulación de Newton-Euler.	57
4.2.2. Ecuación general.	58
4.2.3. Propiedades de la dinámica.	59

4.2.4. Ecuación de Euler-Langrage.	61
4.2.5. Método para obtener el par de cada eslabón.	64
4.3. Simulaciones en matlab de la dinámica obtenida.	69
4.4. Comprobación experimental de la dinámica de la interfaz háptica R2SG	75
4.5. Conclusiones	82
5. Control articular y cartesiano aplicado a la interfaz háptica R2SG	83
5.1. Introducción	83
5.2. Generalidades del control de movimiento de robots manipuladores	83
5.3. Antecedentes del control cartesiano	84
5.4. Controladores empleados para guiado háptico local en plataforma experimental R2SG	85
5.4.1. Control PID articular	85
5.4.2. Control PID no lineal cartesiano	86
5.5. Resultados en simulación y experimentos	87
5.5.1. Control PID articular	89
5.5.2. Control PID no lineal cartesiano	91
5.6. Conclusiones	96
6. Conclusiones, observaciones y perspectivas	97
6.1. Perspectivas del trabajo	97
7. Acrónimos, glosario y apéndices	99
7.1. Lista de acrónimos	99
7.2. Glosario	101
7.3. Apéndice A: programas de simulación en matlab	106
7.4. Apéndice B: Documento publicado	143

Índice de figuras

2.1. Sistema nervioso central del cerebro [28].	17
2.2. Médula espinal [19].	18
2.3. Sección de corte de la parte media del cerebro [27].	19
2.4. En la EM la vaina de mielina sufre destrucción por inflamación y cicatrización [26].	20
2.5. Ambiente de trabajo [38].	26
2.6. Laberinto sencillo [38].	27
2.7. Laberinto complejo [38].	27
2.8. Diagrama de una interfaz háptica [46].	28
2.9. Laberinto virtual en Open GL [46].	28
2.10. Volante háptico [46].	29
3.1. Diagrama clásico de control articular.	32
3.2. Mecanismo de eslabones articulares.	33
3.3. Representación planar de la IH R2SG.	34
3.4. Representación planar de la IH R2SG.	34
3.5. Diagrama para obtener el MCDP.	35
3.6. Diagrama para obtener el MCIP codo abajo.	37
3.7. Diagrama para obtener el MCIP codo arriba.	38
3.8. Diagrama de flujo para la comprobación de la cinemática obtenida.	42
3.9. Coordenada operacional x (real y deseada)	43
3.10. Coordenada operacional y (real y deseada)	43
3.11. Espacio de trabajo de x vs y	43
3.12. Coordenada operacional x_p (real y deseada)	44
3.13. Coordenada operacional y_p (real y deseada)	44
3.14. Espacio de trabajo de x_p vs y_p	44
3.15. Coordenada operacional x_{pp} (real y deseada).	45
3.16. Coordenada operacional y_{pp} (real y deseada).	45
3.17. Espacio de trabajo de x_{pp} vs y_{pp}	45
3.18. Diagrama para la comprobación experimental del MC y MD de la IH R2SG.	46
3.19. Área de trabajo de la IH.	47
3.20. Variable art1 del exp 1.	47
3.21. Variable art2 del exp 2.	47
3.22. Velocidad art1 del exp 1.	48
3.23. Velocidad art2 del exp 1.	48
3.24. Coordenada operacional x del exp 1.	48
3.25. Coordenada operacional y del exp 1.	48
3.26. Velocidad operacional en x del exp 1.	49

3.27. Velocidad operacional en y del exp 1.	49
3.28. Espacio de trabajo del exp 1.	49
3.29. Índice de manipulabilidad del exp 1.	50
3.30. Variable art1 del exp 2.	50
3.31. Variable art2 del exp 2.	50
3.32. Velocidad art1 del exp 2.	51
3.33. Velocidad art2 del exp 2.	51
3.34. Coordenada operacional x del exp 2.	51
3.35. Coordenada operacional y del exp 2.	51
3.36. Velocidad operacional en x del exp 2.	52
3.37. Velocidad operacional en y del exp 2.	52
3.38. Espacio de trabajo del exp 2.	52
3.39. Índice de manipulabilidad del exp 2.	53
4.1. Representación de las variables a utilizar en el análisis del modelo dinámico.	57
4.2. Relación de la dinámica inversa y directa [15].	58
4.3. Gráfica de la fricción seca o de Coulomb.	62
4.4. Aproximación de la fricción seca con una función hiperbólica.	63
4.5. Vista perpendicular del robot de dos grados de libertad.	64
4.6. Vista física perpendicular del robot de dos grados de libertad.	65
4.7. Variables a utilizar para el eslabón uno.	65
4.8. Variables a utilizar para el eslabón dos.	67
4.9. Simulación de la coordenada generalizada uno.	70
4.10. Simulación de la coordenada generalizada dos.	70
4.11. Resultado de la velocidad angular uno.	71
4.12. Resultado de la velocidad angular dos.	71
4.13. Resultado obtenido de la simulación del Lagrangiano.	72
4.14. Espacio de trabajo en simulación de la dinámica.	72
4.15. Índice de manipulabilidad.	73
4.16. Par en simulación del eslabón uno.	73
4.17. Par en simulación del eslabón dos.	74
4.18. Propiedad simétrica definida positiva.	75
4.19. Propiedad antisimétrica.	75
4.20. Coordenada generalizada uno.	76
4.21. Coordenada generalizada dos.	76
4.22. Velocidad angular uno.	77
4.23. Velocidad angular dos.	77
4.24. Coordenada operacional x	78
4.25. Coordenada operacional y	78
4.26. Velocidad operacional x	79
4.27. Velocidad operacional y	79
4.28. Espacio de trabajo de la IH (R2SG).	80
4.29. Índice de manipulabilidad de la IH (R2SG).	80
4.30. Propiedad simétrica definida positiva de la IH (R2SG).	81
4.31. Propiedad antisimétrica de la IH (R2SG).	82
5.1. Ejemplo de un robot manipulador [17].	83
5.2. Configuración cámara fija [41].	84

5.3. Trayectoria deseada: rosa.	88
5.4. Visualización del laberinto en 3D.	89
5.5. Trayectoria deseada generada dentro del laberinto realizado en delphi.	89
5.6. Coordenada generalizada real y deseada (θ_1) del laberinto.	89
5.7. Coordenada generalizada real y deseada (θ_2) del laberinto.	89
5.8. Velocidad angular deseada y real del eslabón 1 en el laberinto.	90
5.9. Velocidad angular deseada y real del eslabón 2 en el laberinto.	90
5.10. Coordenada operacional x deseada y real del efector final del laberinto.	90
5.11. Coordenada operacional y deseada y real del efector final del laberinto.	90
5.12. Prueba realizada en el laberinto.	91
5.13. Curva obtenida aplicando el control.	91
5.14. Coordenada generalizada q_1 deseada de la rosa	92
5.15. Coordenada Generalizada q_1 y q_{d1} real y deseada de la rosa	92
5.16. Coordenada Generalizada q_2 deseada de la rosa	92
5.17. Coordenada Generalizada q_2 y q_{d2} (real y deseada) de la rosa	92
5.18. Errores articulares de la rosa.	93
5.19. Coordenada Operacional p_x deseada de la rosa	94
5.20. Coordenada Operacional X real y p_x deseada de la rosa	94
5.21. Coordenada Operacional p_y deseada de la rosa	94
5.22. Coordenada Operacional Y real y p_y deseada de la rosa	94
5.23. Errores Operacionales en X y Y de la rosa.	95
5.24. Espacio operacional p_x vs p_y deseado de la rosa	96
5.25. Espacio operacional: X vs Y real y p_x vs p_y deseado de la rosa	96

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Las interfaces hápticas (IH), corresponden a un medio en el cual un humano interactúa con un ambiente de visualización virtual. El humano puede cambiar en cualquier momento al ambiente virtual y recibe señales como respuesta. Háptica es el estudio de combinar el sentido humano del tacto con un mundo que es generado por una computadora. La realidad virtual es el medio que permite la interacción entre una computadora digital y un usuario [46].

1.2. Justificación del trabajo

La comunidad de interfaces hápticas en el mundo, concentrada en eventos científicos de prestigio como EURO-HAPTICS, conferencia de PHANTOM y conferencias de realidad virtual, han centrado de manera predominante su atención en estudios psicológicos y neurológicos. Es por esto del gran interés en el diseño y construcción de dispositivos hápticos con la consideración de aspectos psicológicos y fisiológicos y, de los algoritmos de fuerza de reacción y exploración [46].

Hay un interés mayor por la comunidad de neurociencias, en involucrar esta tecnología para conocer el desempeño de un paciente durante experimentos clásicos para diagnóstico y, a partir de ello derivar un mecanismo de rehabilitación.

Los pacientes con discapacidades neurológicas y psicológicas dan a conocer algunos de los efectos de su problemática en la actitud conductual y motriz. Los métodos clásicos para la verificación del estado de salud, no permiten almacenar y dar un juicio tangible del experimento y, mucho menos correlacionarlo con otras variables del paciente, como por ejemplo la actividad eléctrica cerebral [46].

Un dispositivo háptico, permite instrumentar los efectos motrices derivados de alguna discapacidad, como puntos de contacto con objetos virtuales, fuerzas de reacción, desplazamientos y velocidades operacionales. La tarea significativa de los especialistas en neurociencias es la interpretación de estas variables físicas para describir, con variables médicas, la situación del paciente durante el experimento [46].

Los neropsicólogos han dado a conocer una amplia gama de técnicas de rehabilitación para los diferentes estados de salud. En la teoría que confirma estos aspectos, existe la que garantiza el beneficio como consecuencia de la

experiencia adquirida a través de la manipulación dirigida. Este aspecto es uno de los propuestos para lograr la rehabilitación, utilizando técnicas de guiado háptico y entrenamiento remoto.

1.3. Objetivo general

Diseñar e implementar de forma experimental, el control articular y cartesiano para la interacción de una interfaz háptica con desempeño planar de dos grados de libertad R2SG con perspectivas de diagnóstico y rehabilitación neuropsicológica.

1.4. Objetivos específicos

- Obtener los modelados cinemático y dinámico tanto analíticamente como experimentalmente de la IH (R2SG).
- Diseñar una estrategia de control articular y cartesiano con base a el modelo dinámico así pudiendo realizar el seguimiento de una trayectoria con el dispositivo háptico para la rehabilitación.
- Realizar un análisis comparativo del control cartesiano y articular para poder sacar una conclusión de cual control es el mejor a implementar.

1.5. Contribución del trabajo de investigación

Este trabajo de tesis tiene como contribución lo siguiente:

- Obtención y comprobación experimental de los modelos matemáticos del dispositivo háptico.
- Estudios de manipulabilidad cinemática y dinámica.
- Diseño e implementación de un control no lineal cartesiano a nivel simulación digital.
- Conformación de una plataforma experimental para diagnóstico neuromotriz.
- Se dejan bases significativas para constituir una plataforma de rehabilitación basada en guiado háptico local.

1.6. Organización de la tesis.

Este documento está organizado en 6 capítulos, la descripción de ellos es definida a continuación:

- En el capítulo 2, se aborda un estudio correspondiente a las interfaces hápticas, sus propósitos y principios de operación; se hace énfasis en sus aplicaciones en el ámbito del diagnóstico y la rehabilitación neurológica y neuropsicológica, para ellos se consideran los aspectos relevantes de este tipo de discapacidades.
- En el capítulo 3, se presenta la síntesis del modelo cinemático directo e inverso de posición, velocidad y aceleración, todo ello basado en la metodología Denavit-Hartenberg, se dan a conocer las propiedades cinemáticas basadas en el índice de manipulabilidad que describe el desempeño del robot con relación a su espacio de configuraciones admisibles o regiones no singulares. En este mismo capítulo se da a conocer la plataforma experimental y se efectúan comprobaciones experimentales de la cinemática directa e inversa, así como la manipulabilidad cinemática, dichos experimentos fueron evaluados mediante el desplazamiento aleatorio del dispositivo háptico.

- En el capítulo 4, se presenta la síntesis del modelo dinámico del dispositivo háptico R2SG basado en la formulación Euler-Lagrange, describiendo las fuerzas inerciales, de Coriolis, centripetas, gravitatorias y de fricción, para este último se propone un modelo de fricción dinámica y seca y se describen las propiedades en términos de la velocidad articular. Se evalúan a nivel simulación las propiedades dinámicas típicas de un robot manipulador, así como la manipulabilidad dinámica, la comprobación experimental de la dinámica del dispositivo háptico esta basado en las propiedades de la matriz de inercia y de antisimetría, ejecutando de manera aleatoria evoluciones en el espacio de configuraciones admisibles.
- En el capítulo 5, se presenta la estrategia de control no lineal utilizada, para ello se propuso un control por modos deslizantes de segundo orden, conocido en la literatura como control PID no lineal, se propone el mismo controlador en régimen cartesiano y se planifica una trayectoria a lo largo de un laberinto virtual, tal que es posible apreciar el desempeño de este controlador para esta tarea de movimiento y, para el seguimiento de una rosa de 3 pétalos que valida su buen desempeño.
- En esta tesis se presenta al final los apéndices de programas en matlab y Delphi Pascal, un glosario de términos y una lista de acrónimos y abreviaturas.

Capítulo 2

Las interfaces hápticas en la rehabilitación

2.1. Introducción

Son abundantes los aportes de la realidad virtual, que van desde aplicaciones en entretenimiento hasta aplicaciones mas complejas como tareas de cirugía.

Por lo mencionado anteriormente en el capítulo uno, se darán a conocer las enfermedades neurológicas más importantes que existen, así como sus estrategias de rehabilitación para poder comprender mejor el objetivo de utilizar interfaces hápticas y laberintos virtuales.

También se darán a conocer algunos trabajos significativos empleando interfaces hápticas en la rehabilitación de pacientes con distintos tipos de discapacidades previos a nuestro proyecto de investigación.

2.2. Estado del arte de las interfaces hápticas

La palabra "haptics", hace referencia al sentido kinestético. Una IH es usada como un dispositivo de medida kinemática y provee información táctil del paciente [49].

Las interfaces hápticas, permiten al operador mantener la sensación de interacción con el entorno remoto. En ocasiones, y gracias a la diferencia en la frecuencia de las señales kinestética, visual y sonora, la realimentación háptica se combina fácilmente con realimentación óptica o acústica [49].

La **retroalimentación de fuerza**, es el área de la háptica que trata con dispositivos que interactúan con músculos y tendones y, dan al humano una sensación de que se aplica una fuerza. Estos dispositivos principalmente consisten de robots manipuladores que proporcionan una fuerza de reacción al usuario con fuerzas correspondientes al ambiente virtual en el que esta el órgano terminal [46].

La **retroalimentación táctil**, trata con dispositivos que interactúan con los nervios terminales en la piel, los cuales indican la presencia de calor, presión y textura. Estos dispositivos típicamente han sido usados para indicar si el usuario esta en contacto con un objeto virtual. Otros dispositivos de retroalimentación táctil han sido utilizados

para estimular la textura de un objeto virtual [46].

Ivan Sutherland, uno de los fundadores de la realidad virtual, sugirió que el "sentido humano kinestético es como otro canal independiente al cerebro, un canal cuya información es asimilada de una manera bastante subconsciente". Esta y otras afirmaciones condujeron a los investigadores a desarrollar interfaces hápticas, añadiendo un canal de entrada independiente, la cantidad de información que es procesada por el cerebro es aumentada. El aumento en la información reduce el error y el tiempo tomado para completar una tarea, también reduce el consumo de energía y la magnitud de las fuerzas de contacto usadas en una situación de teleoperación. Los humanos usan sus manos para explorar ambientes que tienen pobre o nada de visibilidad. Los humanos identifican con relativa facilidad, objetos tridimensionales colocados en sus manos pero no son capaces de identificar objetos en dos dimensiones, sin embargo, tienen maneras particulares de explorar tales espacios, tal como la de superficies levantadas sobre un plano [46].

El conjunto de procedimientos investigados por Lederman, Klatzky y Balakrishnan, describen como los humanos recogen información acerca de una superficie de dos dimensiones. Esto sucede identificando una esquina y entonces siguiendo un contorno. Los despliegues hápticos por sí solos, son casi inútiles, pero cuando ellos son usados en combinación con un despliegue visual, ellos pueden ser más útiles que un despliegue estereoscópico o un despliegue con múltiples puntos de vista. Para el diseño y construcción de una interfaz háptica, es necesario considerar las características anatómicas y fisiológicas del humano, a partir de ello se definen los métodos para generar la fuerza de reacción, el ambiente de visualización virtual y las técnicas de control a utilizar [46].

Un **dispositivo háptico**, es un mecanismo de eslabones articulados cuyos fines no son los mismos que los de un robot manipulador, sin embargo, la estrategia de modelado matemático es la misma. El modelo cinemático del dispositivo háptico corresponde al conjunto de ecuaciones que relacionan posición, velocidad y aceleración de las variables articulares con las coordenadas operacionales o variables de posición y orientación representadas en el espacio cartesiano. El modelo dinámico del dispositivo háptico está constituido por las ecuaciones de movimiento que relacionan fuerzas debidas a efectos inerciales, Coriolis, centrípetas, gravitatorias y de fricción [49].

Existen diferentes tipos de dispositivos hápticos. Las plataformas de movimientos para simuladores y travesías simuladas, los guantes con retroalimentación de fuerza, los dermatoesqueletos, mayordomos, etc; son formas de retroalimentación de fuerza.

Plataformas de movimiento: la plataforma de movimiento fue originalmente diseñada para usarse en simuladores de vuelo para entrenamiento de pilotos. Una plataforma es fijada a un conjunto de brazos hidráulicos. De acuerdo al cambio de movimiento del despliegue visual, la plataforma se inclina y se mueve en una trayectoria sincronizada para dar al usuario un sentimiento de que en realidad esta volando [49].

Guantes: para la interacción con pequeños objetos en un mundo virtual, el usuario puede usar uno de varios guantes diseñados para dar retroalimentación sobre las características del objeto; esto se puede lograr a través de pistones neumáticos los cuales están montados sobre la palma del guante. Cuando un objeto virtual es colocado en la mano virtual, la mano verdadera del usuario puede realmente cerrarse alrededor del objeto [49].

Dermatoesqueletos: son utilizados para simular la resistencia de objetos en un mundo virtual. Un dermatoesqueleto es un brazo robótico sujeto a una persona en alguno de sus miembros [49].

Mayordomos: es un robot que se opone al movimiento del humano cuando este intenta moverse a través de un objeto virtual y lo hace poniendo en los límites del objeto a un objeto real. El mayordomo proporciona una impedancia mecánica del ambiente, esto es inercia, viscosidad y rigidez. El inconveniente de su uso es que solo puede presenciar estas propiedades para un solo punto a la vez. La temperatura y la textura son totalmente desconocidos

al usuario. Para determinar las posiciones cartesianas (x , y , z) y la orientación (yaw, pitch y roll) de alguna parte del cuerpo del humano en referencia a un punto fijo, es mediante los dispositivos de posicionamiento [49].

Los cascos, los guantes de datos, los joysticks, los trajes de datos de cuerpo completo y muchos otros tipos de dispositivos de interacción de realidad virtual, tienen dispositivos de posicionamiento. La calidad de un sistema de posicionamiento depende de la latencia, la tasa de actualización, la resolución y la exactitud. Los dispositivos de posicionamiento de seis grados de libertad más comunes son de tecnología mecánica, electromagnética, ultrasónica, infrarroja e inercial [49].

Posicionadores mecánicos: son similares a un brazo de robot y consisten de una estructura articulada con eslabones rígidos, una base de soporte y un órgano terminal activo el cual es sujetado a la parte del cuerpo siendo posicionada, frecuentemente es la mano. Es rápido y exacto, pero tiene una área restringida de operación [49].

Posicionadores electromagnéticos: permite que varias partes del cuerpo sean posicionadas simultáneamente y funcionará correctamente si los objetos vienen entre la fuente y el detector. La fuente produce tres campos electromagnéticos perpendiculares uno de otro. El detector sobre el cuerpo del humano mide la fuerza y dirección del campo electromagnético y envía esta información de regreso a la computadora. La computadora triangula la distancia y la orientación de los tres ejes perpendiculares en el detector relativos a los tres campos electromagnéticos producidos por la fuente, estos son inexactos, sufren de problemas de latencia, distorsión de datos y sensibles a ruido electromagnético existente en el área de trabajo [49].

Posicionadores ultrasónicos: consisten en tres emisores de ondas sonoras de alta frecuencia en una formación rígida que forman la fuente para tres receptores que también están en un arreglo rígido en el usuario. Los métodos para calcular la posición y la orientación son el método de fase coherente y el método de tiempo de vuelo. En el método de la fase coherente, la posición y orientación es detectada calculando la diferencia en las fases de las ondas sonoras que alcanzan a los receptores desde los emisores comparadas a las ondas sonoras producidas por el receptor. El segundo método mide el tiempo en que el sonido emitido por los transmisores en momentos conocidos, alcanza los sensores. Solamente se requiere de un transmisor para calcular la posición pero el cálculo de la orientación requiere encontrar las distancias entre los tres sensores, también tienen un volumen de operación restringido y deben tener una línea directa de vista entre emisor y receptor, también es afectado por cambios de temperatura y presión, así como el nivel de humedad del ambiente de trabajo [49].

Posicionadores infrarrojos: usan emisores fijos en un arreglo rígido mientras que las cámaras reciben la luz infrarroja. Para fijar la ubicación del posicionador, una computadora debe triangular una posición basada en los datos de las cámaras. Es eficiente salvo que en el espacio de operación exista otra fuente de luz infrarroja, alta densidad de luz o brillo que afectará el grado de correctitud de la medida [49].

Posicionadores inerciales: permiten al usuario moverse en un espacio de operación grande ya que no hay cable o hardware conectado entre la computadora y el posicionador. Aplican el principio de conservación del momento angular [49].

Las interfaces hápticas han sido de relevante interés en áreas comerciales, militares, médicas y de investigación. El primer sistema de enseñanza con realidad virtual fue desarrollado con fines de instrucción médica. Sin embargo, con anterioridad fueron desarrollados sistemas de entrenamiento para cirugía, especialmente para cirugía de mínima invasión (MIS) y que posteriormente se comercializó. Otras aplicaciones relevantes en este ámbito son en diagnósticos, anestesiología, procedimientos de rehabilitación, etc. Otras aplicaciones son en entretenimiento, la cual aprovecha el potencial gráfico y auditivo, en la actualidad diversos juegos de video hacen uso de la retroalimentación táctil y de fuerza. La telerobótica es un área de reciente madurez, en el que un dispositivo háptico puede definir la posición y

orientación de un robot remoto y a su vez sentir por medio de él, la reacción cuando el robot interactúa con una superficie de restricción (telepresencia), sin embargo, aún se estudian nuevas técnicas para estabilizar un sistema teleoperado en presencia de retardos en la comunicación. En últimas fechas, las aplicaciones de las interfaces hápticas han abarcado el área militar en el manejo de armas de forma remota, así como entrenadores de vuelo y manejo de equipo de guerra. A continuación se presentan de manera detallada algunas de las aplicaciones [49].

Aplicaciones médicas: el conocimiento médico ha tenido un aumento extraordinario en los últimos 30 años, esto a impulsado a las escuelas de medicina a modernizar la metodología de enseñanza aplicada en las áreas de anatomía humana, fisiología y patología [49].

Los atlas de anatomía han sido substituidos por CDROM's interactivos para entrenamiento de la anatomía con navegación virtual. Los primeros sistemas de enseñanza médica con realidad virtual, fueron desarrollados por Rosen, Lasko-Harwill y Satava en 1996. Los sistemas de entrenamiento quirúrgico, especialmente para cirugía mínima invasiva desarrollados por Virtual Reality Inc; se encuentran comercialmente disponibles, estos sistemas usan un sistema HMD (casco para inmersión en sistemas de visualización virtual) para inmersión dentro de un paciente virtual, proporcionando una intuitiva y poderosa instrucción al estudiante o residente, sin embargo, estos sistemas de entrenamiento carecen de retroalimentación háptica, lo cual limita su utilidad. Esta deficiencia hace imprácticos a los entrenadores quirúrgicos modernos, lo mismo ocurre para la enseñanza en áreas relacionadas como diagnóstico, anestesiología, o procedimientos de rehabilitación. La primera fase en proporcionar un cuidado médico es determinar el diagnóstico de la enfermedad del paciente. La práctica médica de rutina hace uso de técnicas sofisticadas de diagnóstico a través de termografía computacional, imágenes de resonancia magnética e imágenes de ultrasonido, sin embargo, el procedimiento de diagnóstico más antiguo es palpar los órganos del cuerpo y tejidos [49].

Aplicaciones en entretenimiento: es otra aplicación de los dispositivos de retroalimentación háptica en entretenimiento con realidad virtual. Esta es una industria millonaria, la cual utiliza tradicionalmente efectos visuales y de sonido en respuesta a la posición instantánea del usuario (jugador). En la actualidad la retroalimentación táctil y de fuerza es involucrada en algunos juegos de video, situación que incrementa la interactividad y el realismo [49].

Otras aplicaciones son en el ámbito de la música y excursiones virtuales. Los sistemas de realidad virtual que utilizan retroalimentación táctil y de fuerza, son los sistemas Arcades, los pioneros, son el BattleTech Center de Chicago y el Legend Quest Center de Inglaterra. Otro sistema de menor costo es el sistema para uso en el hogar, que fue introducido en 1995, éste utiliza tecnología HMD y joystick en lazo abierto con el que se mide la posición de la mano del jugador. Los joysticks con retroalimentación de fuerza, efectos de vibraciones y amortiguamiento fueron introducidos por EXOS Co. en 1995. Muchas compañías de video juegos, como Sierra On-Line, Microsoft, y Looking Glass desarrollaron juegos con el joystick denominado PowerStick. La tecnología de la realidad virtual ha beneficiado en muchas otras formas de entretenimiento, tal como las exhibiciones de arte interactivas, museos virtuales o música virtual. Cadoz estudió la integración de la retroalimentación háptica en simulaciones que involucran instrumentos musicales en mundos virtuales. Después Gillespie y Cutkosky desarrollaron un modelo para la simulación de un piano utilizando un teclado sintetizador con retroalimentación háptica [49].

Aplicaciones en telerobótica: en un sistema telerobótico, el operador ejecuta una tarea a distancia con la ayuda de un robot localizado en una estación remota. La telerobótica, es actualmente utilizada en diversos campos, inclusive reparaciones en naves o plataformas espaciales (utilizando un manipulador en el transbordador espacial), bajo el océano u operaciones de rescate, en el mantenimiento y manejo de equipo y sustancias nucleares. En todas estas aplicaciones, el operador necesita sentir lo que ocurre en la estación remota en donde se efectúa la tarea real. Por lo tanto, la retroalimentación visual, auditiva y de fuerza son esenciales para desarrollar una tarea remota. Los primeros desarrollos en telerobótica fueron con aplicaciones espaciales, desarrollados en la NASA por Johnson Space Center. Uno de los problemas que actualmente afectan a los sistemas telerobóticos, son la inercia del robot manipu-

lador y retardos en la comunicación, situación que afecta negativamente en la estabilidad. Se han utilizado técnicas de prevención de colisiones en la estación remota por influencia de la inestabilidad del sistema telerobótico. Otros sistemas similares son utilizados en teleprogramación y tele-operación en espacios restringidos [49].

2.3. Discapacidades neuropsicológicas

El *sistema nervioso central, somático, craneoespinal o voluntario*, comprende el encéfalo, conjunto de estructuras alojadas en la cavidad craneana, la médula, ubicada en el canal raquídeo, los nervios y los órganos terminales efectores y receptores [28].

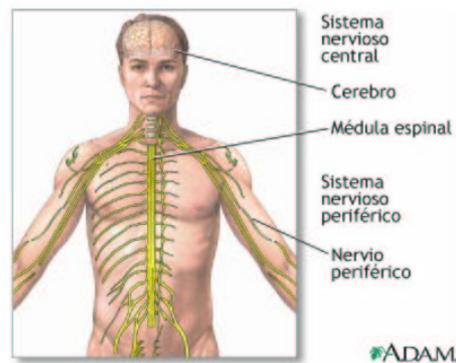


Figura 2.1: Sistema nervioso central del cerebro [28].

Sus funciones principales son: la percepción de sensaciones, es decir la sensibilidad y la elaboración de movimientos, o sea, la motilidad, mediante las cuales el individuo se conecta con el medio que lo rodea [28].

Por lo mencionado anteriormente, gran parte de la movilidad y sensibilidad, lo refleja el sistema nervioso central; pero pueden llegar a existir daños severos en lo que es la parte del cerebro por lo que se generan enfermedades neurológicas y neuropsicológicas como las que mencionaremos a continuación:

El ***mal de parkinson***: también conocido como parálisis agitante o parálisis con temblor, es un trastorno cerebral caracterizado por temblor y dificultad en la marcha, en la movilidad y en la coordinación. La enfermedad está asociada con el daño a una parte del cerebro que está relacionada con el movimiento [42].

Afecta aproximadamente a 2 de cada 1,000 personas y se desarrolla más frecuentemente después de los 50 años de edad; aunque en ocasiones se presenta en adultos jóvenes y pocas veces en niños, esta enfermedad se presenta tanto en los hombres como en las mujeres y es uno de los trastornos neurológicos más comunes en las personas de edad avanzada [42].

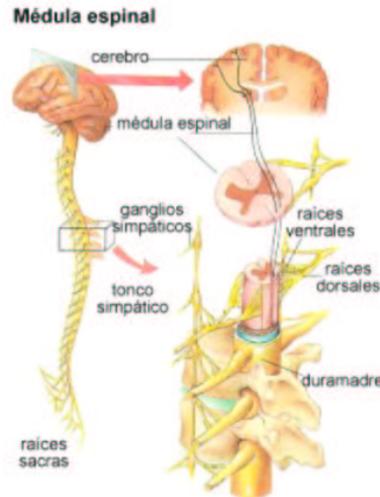


Figura 2.2: Médula espinal [19].

Es causado por el deterioro progresivo de las células nerviosas de la parte del cerebro que controla el movimiento muscular. La dopamina, una de las sustancias utilizadas por las células para transmitir impulsos, se produce normalmente en esta área. El deterioro de esta área del cerebro reduce la cantidad de dopamina disponible para el organismo [42].

La insuficiencia de dopamina afecta el equilibrio entre ella y otros transmisores tales como la acetilcolina. En ausencia de dopamina, las células nerviosas no pueden transmitir mensajes en una forma adecuada, ocasionando la pérdida de la función muscular.

La razón exacta del deterioro de las células cerebrales se desconoce. La enfermedad puede afectar uno o ambos lados del cuerpo, con grados variables en la pérdida de la función.

Los síntomas que se presentan son [42]:

- Rigidez muscular.
 - Agarrotamiento.
 - Dificultad para flexionar los brazos o las piernas.
- Postura inestable.
- Encorvada o desplomada.
- Pérdida del equilibrio.
- Cambios en el paso (patrón de caminar).
- Marcha arrastrada.
- Movimientos lentos.



Figura 2.3: Sección de corte de la parte media del cerebro [27].

- Dificultad para iniciar cualquier movimiento voluntario.
 - Dificultad para iniciar la marcha.
 - Dificultad para pararse de una silla.
- Pasos cortos seguidos de la necesidad de correr para mantener el equilibrio.
- Congelamiento del movimiento cuando este se suspende e incapacidad para reiniciarlo.
- Achaques musculares (mialgia).
- Agitación, temblor (de grado variable o pueden no presentarse).
 - Generalmente ocurren en momentos de reposo, pero pueden presentarse en cualquier momento.
 - Pueden tornarse lo suficientemente severos como para interferir con las actividades.
 - Pueden empeorar cuando la persona está cansada, excitada o estresada.
 - Puede presentarse frotamiento del pulgar y dedos de la mano (rodamiento de píldora).
- Cambios en la expresión facial:
 - Reducción de la capacidad para manifestar expresiones faciales.
 - Cara con aspecto de "máscara".
 - Mirada fija.
 - Posible incapacidad para cerrar la boca.
 - Reducción del ritmo de parpadeo.
- Cambios en el habla y en la voz:
 - Habla lenta.
 - Bajo volumen de voz.

- Monotonía.
- Dificultad para hablar.
- Pérdida de la destreza motriz fina.
 - Dificultad para escribir: la letra puede ser pequeña e ilegible.
 - Dificultad para comer.
 - Dificultad para desarrollar cualquier actividad que requiera movimientos finos.
 - Movimiento lento e incontrolado.
- Caídas frecuentes.
- Disminución de la función intelectual (puede ocurrir y puede ser severa).
- Variedad de síntomas gastrointestinales, principalmente estreñimiento.

La **esclerosis múltiple**, es también conocida como esclerosis diseminada y esclerosis en placas. Es una enfermedad cuya causa es desconocida. Se caracteriza por la aparición de placas (estructuras caracterizadas por la pérdida de mielina que envuelve el axón neuronal) en el sistema nervioso central (S.N.C.), estas placas aparecen por brotes y pueden surgir en cualquier parte de la sustancia blanca del S.N.C. De causa desconocida, se caracteriza por la presencia de lesiones neuropatológicas; fundamentalmente, de placas desmielinizantes, es decir, placas que aparecen o se desarrollan tras la agresión de las vainas de mielina, membrana que rodea los axones nerviosos. La edad de comienzo más frecuente es entre los 20 y los 40 años, siendo rara antes de los 10 años o después de los 50 años. La enfermedad es más frecuente en mujeres que en hombres, su frecuencia varía también, según la zona del mundo, siendo más frecuente en E.U.A. y Europa Occidental [26].



Figura 2.4: En la EM la vaina de mielina sufre destrucción por inflamación y cicatrización [26].

La esclerosis múltiple (EM), es una enfermedad que afecta, de forma intermitente, a la sustancia blanca, es decir, la mielina, de la médula espinal figura (2.4) y del cerebro. La mielina recubre las fibras nerviosas y permite la conducción del impulso nervioso. Se producen inflamaciones pequeñas y localizadas dentro del sistema nervioso central (médula y cerebro), que suelen dejar cicatrices llamadas lesiones o placas (esclerosis) en la mielina. A veces estas inflamaciones

se acompañan de síntomas que el que las padece nota, o signos que el neurólogo aprecia a través de exploraciones [26].

Estas apariciones inesperadas de síntomas tales como afectación de la vista, pérdida de fuerza o de sensibilidad en una parte del cuerpo, **temblor** y problemas en el control urinario, se denominan exacerbaciones o comúnmente "brotos" [26].

No hay ninguna EM típica. Es individual y, por eso, no es posible dar una sola descripción general, ni un único pronóstico. Sin embargo, hay algunos síntomas que son comunes para muchas personas [18]:

- Visión doble, visión borrosa.
- Debilidad y torpeza de un miembro.
- Sensaciones alteradas en los brazos o en las piernas, como hormigueo o insensibilidad (esta se describe a menudo como "pisar algodón").
- Vértigo o falta de equilibrio.
- Cansancio que no es proporcional con lo que usted ha estado haciendo, o cansancio imprevisible.
- La necesidad de orinar con más frecuencia y/o con más urgencia.

La *enfermedad de Ataxia*, es una alteración, parcial o total, de la coordinación muscular. Puede manifestarse como temblor involuntario de partes del cuerpo durante la realización de movimientos voluntarios (típicamente en las manos), como dificultad para realizar movimientos precisos, o como dificultad para mantener el equilibrio de la postura corporal. La ataxia no es una enfermedad en sí misma, sino un síntoma característico de algunos procesos degenerativos. Puede ser causada por un traumatismo o una enfermedad del sistema nervioso central. Como segunda definición es una coordinación de movimientos desordenados, ya que la palabra "ataxia" proviene del antiguo griego y significa etimológicamente "sin orden". En definición propia de diccionario, ataxia sería: "deterioro en la coordinación en los movimientos musculares". Esta descoordinación puede afectar a los dedos y manos, a los brazos y piernas, al cuerpo, al habla, a los movimientos oculares, al mecanismo de tragado, etc [29].

Generalmente, la ataxia es causada por una pérdida de función en la parte del cerebro que sirve como centro de coordinación", llamada cerebelo. El cerebelo está situado en la parte posterior del cráneo. La parte derecha del cerebelo controla la coordinación en la parte derecha del cuerpo y la parte izquierda controla la coordinación de la izquierda [29].

La ataxia también puede estar causada por alguna anomalía en las vías principales que conducen hacia dentro o hacia fuera del cerebelo. La información entra en el cerebelo a través del cordón espinal y es transmitida a otras partes del cerebro. Aunque el cerebelo no controla directamente la energía (función motora) o de sensación (función sensorial), el motor y las vías sensoriales deben funcionar correctamente para proporcionar la entrada en buenas condiciones al cerebro [29].

Síntomas acompañantes, según el tipo de ataxia, pudieran ser [29]:

- Deformidades esqueléticas.
- Cardiopatías.
- Diplopia.
- Disartria.

- Distonía muscular.
- Diabetes.
- Disminución sensorial, etc.

Existen otras enfermedades neuropsicológicas que son parte de la sintomatología clínica general de las enfermedades extrapiramidales y estas se pueden dividir básicamente en dos:

- *Síndromes hipercinésicos-hipotónicos*, en los que están en primer término los movimientos involuntarios, que suelen cambiar de localización. El tono de reposo suele estar rebajado en el intervalo. En estos pertenecen las siguientes enfermedades:
 - La corea.
 - La atetosis.
 - El balismo.
 - Las distonías.
 - La enfermedad de Wilson.
- *Síndrome acinésico-rígido*, en el cual, se combina una disminución de los movimientos espontáneos y acompañantes con un aumento del tono. Los movimientos involuntarios (temblor), no están siempre en primer término. El síndrome de Parkinson pertenece a este grupo.

A continuación se va hacer una breve reseña sobre las enfermedades del síndrome hipercinésico-hipotónico:

La **corea** se basa patológicoanatómicamente en un fallo del sistema estriado. Un foco circunscrito como puede ser una metástasis tumoral, sólo en pocos casos conduce a una corea. Se destruyen las células pequeñas. Patofisiológicamente se interrumpe, por desunión del fascículo estriado, el control de la sustancia negra de Sömmerring sobre movimientos acompañantes y tono, el cual, desde los campos premotrices, emite irregularmente los impulsos recibidos por la sustancia negra a las células ganglionarias de las astas anteriores. La sustancia negra consiste en una atrofia de las células ganglionares hasta la destrucción total, con añadidura de la neuroglia.

Clínicamente, la corea se caracteriza por movimientos irregulares, no simétricos, que se desencadenan repentinamente, breves, acentuados distalmente e involuntarios.

En la **atetosis**, los trastornos motrices atetóticos aparecen en caso de lesión del cuerpo estriado, del globo pálido y raramente también en el caso de lesión del tálamo y del núcleo rojo. Patofisiológicamente desaparecen los impulsos que van desde el cuerpo interno del globo pálido a los núcleos del tálamo. Estos últimos no envían ya los impulsos fisiológicos a los campos corticales premotrices extrapiramidales, los cuales envían, por su parte, excitaciones, no guiadas, a centros más bajos y a la médula espinal.

El cuadro clínico de la atetosis está caracterizado por los movimientos involuntarios irregulares, que se desarrollan con lentitud, sobre todo distalmente exagerados de forma llamativa y que parecen ser atormentadamente agarrotados. Las articulaciones suelen ser flexionadas demasiado o son hiperextendidas.

El **hemibalismo**, está originado por una lesión primaria del cuerpo de Luys contralateral y más raramente por una transformación secundaria del mismo en lesión del cuerpo estriado y del globo pálido, que están en comunicación doble con él. Es característica la aparición de movimientos instantáneos, lanzante y disparados, que afectan varios miembros a la vez.

Los **síndromes dístonos**, son un grupo a cual pertenecen una serie de trastornos de la motilidad, en los cuales algunos músculos aislados o grupos de músculos llevan a cabo unas contracciones que pueden durar más o menos tiempo y que son involuntarias y tónicas. La coordinación trastornada de tensión y relajación de los agonistas y antagonistas, los unos sobre los otros, es una particularidad característica de estos trastornos.

La tortícolis espástica: este trastorno se basa siempre en lesiones del cuerpo estriado de índole heterogénea. El cuadro clínico está caracterizado por una hipercinesia limitada a los músculos del cuello y de la nuca.

Distonía de torsión: en esta enfermedad se hallan siempre transformaciones en el putamen, pero también en otras zonas nucleares, en las que las células ganglionares grandes suelen estar más afectadas que las pequeñas. El cuadro clínico está caracterizado por la aparición de movimientos lentos, que se desarrollan con mucha fuerza, predominantemente rotativos, de la cabeza, cintura escapular y tronco, acompañados por movimientos de las extremidades de índole variable, pero sobre todo movimientos atetóticos de los dedos.

2.4. Estrategias de diagnóstico y rehabilitación de discapacidades neuropsicológicas

La psicología de la rehabilitación se definió como "el estudio y aplicación de principios psicosociales al comportamiento de las personas que sufren una discapacidad física, cognitiva, del desarrollo emocional". Los psicólogos de la rehabilitación han de preocuparse del crecimiento personal y social de las personas con discapacidades, promoviendo su perspectiva personal y un óptimo uso de sus capacidades; han de tener como metas y objetivos la mejora de la práctica de la rehabilitación y la promoción de cambios en el entorno para hacer así más accesibles las oportunidades en las relaciones sociales, en el empleo, en la educación, en la comunidad y en las actividades de ocio a las personas que sufren deficiencias y discapacidades.

La rehabilitación es un proceso encaminado a lograr que las personas con discapacidad estén en condiciones de alcanzar y mantener un estado funcional óptimo desde el punto de vista físico, sensorial, intelectual, psíquico o social, de manera que cuenten con medios para modificar su propia vida y de ser independientes. La rehabilitación puede abarcar medidas para proporcionar o restablecer funciones o para compensar la pérdida o falta de una función o limitación funcional. El proceso de rehabilitación no supone la prestación de atención médica preliminar. Abarca una amplia variedad de medidas y actividades, desde la rehabilitación más básica y general hasta las actividades de orientación específica, como, por ejemplo, la rehabilitación profesional.

Hoy es posible explicar con detalle a los afectados con capacidades para comprender o procesar bien la información y a sus familias, qué les sucede y cuál es el origen de sus problemas, pero no es tan fácil responder a las múltiples preguntas que plantean acerca de qué hacer para solucionarlos o mostrarles tratamientos específicos con indicadores, pronósticos u objetivos a mediano o largo plazo.

Hay estrategias de tratamiento y material de trabajo puntual para entrenar, activar o rehabilitar determinadas funciones dañadas, por ejemplo, la orientación, la memoria, la atención, etc; pero estas son, parciales e insuficientes y muy poco centradas en las demandas y actividades de la vida diaria. La carencia de programas específicos no es el único problema. En numerosos neuropsicólogos se observa un acusado reduccionismo y una percepción limitada de los horizontes que comprende la vida del individuo en tratamiento rehabilitador por problemas ocasionados por el daño cerebral. La falta de relación entre una neuropsicología más orientada a proponer y verificar modelos cognitivos pero con escasas aportaciones a la aplicación de estos modelos en los programas de rehabilitación, es evidente. Los esfuerzos por la rehabilitación de los afectados han de tener unos objetivos y los neuropsicólogos han de contribuir a lograrlos integrando su quehacer en el proceso de recuperación.

Como por ejemplo, casos específicos como parkinson, la esclerosis múltiple y ataxia se aplican los siguientes tratamientos:

Tratamiento para el Parkinson:

No se conoce ninguna cura para el mal de Parkinson. El tratamiento está orientado a controlar los síntomas y debe ajustarse al paciente.

Los medicamentos controlan los síntomas principalmente mediante el incremento de los niveles de dopamina en el cerebro. A medida que cambian los síntomas, se puede necesitar ajustar el tipo de medicamento, la dosis que se administra, la cantidad de tiempo entre las dosis o la combinación de los medicamentos que se administran. Muchos de estos medicamentos pueden causar efectos secundarios severos, así que el monitoreo y seguimiento del médico es importante.

El deprenil puede mejorar de alguna manera a los pacientes afectados levemente. La amantadina o los anticolinérgicos se pueden utilizar para reducir los temblores tempranos o leves. La levodopa es un medicamento que el cuerpo transforma en un transmisor cerebral llamado dopamina y se puede usar para incrementar la concentración de ésta en el organismo, lo cual a su vez puede permitir el mejoramiento del movimiento y del equilibrio. La carbidopa es un medicamento que reduce los efectos secundarios de la levodopa y permite que ésta trabaje mejor.

Algunos de los medicamentos adicionales que ayudan a reducir los síntomas o a controlar los efectos secundarios del tratamiento principal son: antihistamínicos, antidepresivos, agonistas de tipo dopamina, inhibidores de la monoaminooxidasa (MAOI) y otros.

Es importante tener una buena nutrición y salud en general. Se debe continuar el ejercicio, haciendo un ajuste en el nivel de actividad para satisfacer los niveles de energía cambiantes que se puedan presentar. Se recomienda igualmente tener períodos regulares de descanso y evitar el estrés, ya que la fatiga o el estrés pueden empeorar los síntomas. La fisioterapia y terapias del lenguaje y ocupacional pueden ayudar a mejorar el desempeño y la independencia.

Las ayudas simples, tales como la ubicación de barandas o pasamanos en las áreas comúnmente usadas de la casa, los utensilios especiales para comer, pueden ser muy útiles para quienes se les dificultan las actividades de la vida cotidiana.

Trabajadores sociales u otros servicios de asesoramiento pueden ayudar a la persona afectada a hacer frente a su enfermedad y pueden prestar ayuda en obtener asistencia adecuada como servicios de comidas a domicilio donde sea apropiado.

Se pueden recomendar tratamientos experimentales o poco comunes. Por ejemplo, en algunas personas la cirugía para destruir el tejido causante de los temblores puede reducir los síntomas. El trasplante de tejido de la glándula suprarrenal al cerebro se ha experimentado con resultados variables.

Tratamiento de la Esclerosis Múltiple:

Ante la presencia de un brote de suficiente severidad, generalmente se recomienda la toma de cortisona en algunas de sus formas de administración: oral, intramuscular o endovenosa. Esta última se realiza por medio de suero en un medio hospitalario. No debe autotratarse. La forma de administración o su indicación siempre son criterio de su especialista, sea en el caso de la cortisona o en el de cualquier otro medicamento que se prescriba con la intención de

alterar la actividad de base de la forma de la esclerosis múltiple (EM) que se padezca.

Tratamiento sintomático:

Se dispone de una gran cantidad de medicamentos y de terapias capaces de mejorar muchos de los síntomas asociados con la EM. Es por ello que estos tratamientos se denominan sintomáticos. Muchos especialistas los consideran la base del tratamiento que puede actualmente ofrecerse a los afectados. El neurólogo sugiere cuándo y cómo se deben de tratar los síntomas que se padezcan. Cada vez se confiere más importancia al papel, dentro de la rehabilitación, del apoyo y mantenimiento de los afectados por la EM y sus familias. También contribuye a la superación de las consecuencias después de tener un brote de EM y ayuda a adaptarse e integrarse de nuevo en la vida socio-laboral.

La rehabilitación se entiende como el conjunto de servicios médicos y paramédicos que funcionan en equipo de forma coordinada. Estos equipos analizan los problemas médicos, laborales, sociales o familiares secundarios al padecimiento de una EM y establecen objetivos de tratamiento según las disponibilidades científico-terapéuticas o de apoyo psicosocial. Los profesionales de la salud que se pueden ver implicados comprenden neurólogos, urólogos, rehabilitadores, psiquiatras, neuro-psicólogos, trabajadores sociales, psicólogos, fisioterapeutas, terapeutas ocupacionales y personal de enfermería especializado. Cada fase evolutiva requiere un tipo específico de asistencia que quizás se limite a controles regulares a criterio de su neurólogo. Aunque aún no disponemos de un medicamento capaz de curar la EM, ello no significa que no tenga tratamiento. En el complejo proceso de asistir la problemática relacionada con esta enfermedad, todos los esfuerzos son pocos. Los recursos asistenciales de todos los países tienen sus límites. La tendencia actual es la de englobar en el concepto de tratamiento todos los recursos de apoyo disponibles, dirigidos a mejorar la calidad de vida de los afectados por EM y sus familias.

En abril de 1993, se publicó un prometedor estudio, en una prestigiosa revista de neurología, en el que se evalúa la eficacia de administrar interferón beta 1-b (vendido actualmente bajo el nombre "Betaferon") por vía subcutánea para tratar las formas remitentes de EM. Estas se caracterizan por la presencia de brotes. El resultado de este riguroso trabajo sugiere que este tratamiento puede disminuir el número de brotes así como su intensidad. También reduciría el área de daño producido en la mielina (sustancia blanca) por la EM, si lo comparamos con aquellos afectados que no tomaron interferón beta 1-b durante el tiempo de duración del estudio. Lamentablemente, el interferón beta 1-b no consigue atajar la progresión de la EM y no constituye aún el tratamiento capaz de curarla. Sin embargo, la demostración de que su administración puede alterar la evolución natural de esta enfermedad, supone un notable avance científico que permite aventurar modalidades de este tratamiento más eficaces en el futuro.

Tratamiento para la Ataxia:

En la actualidad no hay curación para ninguna de las ataxias, excepto las debidas a productos tóxicos. Los trasplantes de cerebro o la cirugía cerebral que a veces se realizan en personas con la enfermedad de Parkinson, no han sido estudiadas para esta enfermedad y, actualmente, no se recomiendan para personas con ataxia. Los tratamientos dirigidos contra el sistema inmunológico, útiles para personas con múltiple esclerosis, no tienen expectativa de poder ayudar a las personas con ataxia, y deben evitarse. Cuando los científicos entiendan mejor los cambios en el cerebro que conducen a la ataxia, trabajarán para desarrollar nuevos medicamentos que puedan reducir la velocidad de progresión de la enfermedad o puedan detenerla.

2.5. Trabajos significativos de diagnóstico y rehabilitación con interfaces hápticas

La rehabilitación de pacientes que han perdido capacidad sensorial y motriz, es de interés para la comunidad de interfaces hápticas. En el transcurso de estos últimos tiempos se han realizado investigaciones con el propósito de mejorar la salud humana haciendo uso de la tecnología implementando interfaces hápticas, que sirven para la simulación de entornos, situaciones y sensaciones mediante realidad virtual y tecnologías del tacto, desarrollo de entornos y ambientes inteligentes, desarrollo de herramientas de apoyo y entrenamiento personal mediante aplicaciones de software inteligentes y accesibles, desarrollo de herramientas de rehabilitación neuromotora e inteligentes y tele-presencia, tele-asistencia y tele-rehabilitación como es el caso de los siguientes ejemplos de investigación:

Brown y colaboradores de la Universidad de Dartmouth, desarrollaron un prototipo exoskeleton utilizado como dispositivo protético para pacientes que han perdido el control muscular en sus manos, y consiste de una estructura de aluminio provista de sensores de posición y que son rearmadas anatómicamente mediante un guante de lycra. Un sistema con los mismos propósitos fue diseñado y construido recientemente por Burdea y colaboradores en la Universidad de Rutgers. Hogan y colaboradores del MIT desarrollaron la estación de trabajo MIT-MANUS con propósitos de terapia y entrenamiento. El sistema consiste en un robot de cinco grados de libertad y dos computadoras para control y para retroalimentación visual y auditiva para el paciente [49].

Otro trabajo realizado con el uso de interfaces hápticas para la rehabilitación presenta una forma de evaluar las extremidades superiores (manos) en pacientes con enfermedades neuropsicológicas. Este proyecto emplea un motor con características cinemática y dinámicas de UL (upper limb). La metodología está basada en crear un ambiente virtual, usando una computadora para la información visual y una interfaz háptica PHANTOM [38].



Figura 2.5: Ambiente de trabajo [38].

PHANTOM es la interfaz háptica que es usada como un dispositivo de medida cinemática y provee información táctil del paciente. En el medio virtual fue creado un laberinto en el plano frontal del paciente al inicio de cada prueba (para el control de movimiento de la interfaz háptica del paciente). El paciente puede mover el punto (una pelota) a través del laberinto en tres dimensiones sintiendo las fuerzas de las paredes controlando el movimiento del bastón de la interfaz háptica. La primera misión del paciente fue pasar el laberinto lo más rápido posible, con el menor número de contactos sobre las paredes del laberinto. Las pruebas presentan varios grados de complejidad, cambiando el laberinto con varios anchos y longitudes del sendero al igual que la fricción de las paredes [49].

mediante un dispositivo háptico se observa en el siguiente diagrama a bloques de una interfaz háptica (2.8) [46].

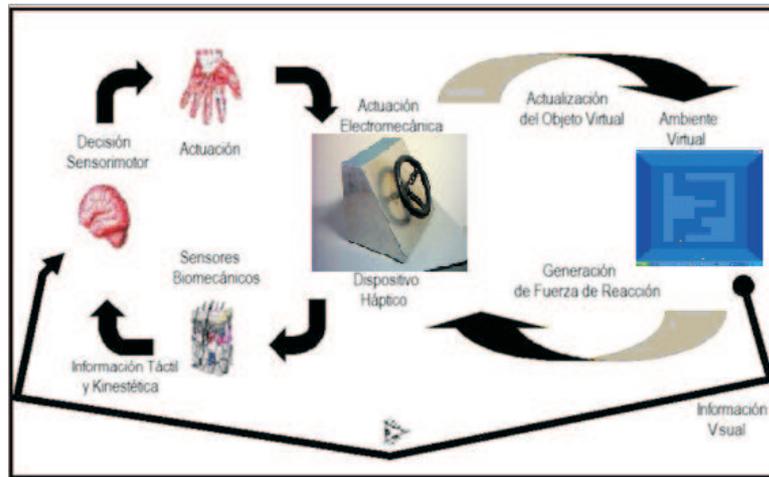


Figura 2.8: Diagrama de una interfaz háptica [46].

El dispositivo está dotado de sensores de posición y velocidad angular en articulaciones, estos resultados son enviados al algoritmo para la asignación de comportamiento complejo, modificando el humano la representación en el ambiente virtual [46].

También se presentó un laberinto virtual hecho con el programa Open GL (2.9), en el cual el operador humano es representado por un objeto virtual esférico al que llamaremos paciente virtual, la dirección es definida mediante un volante háptico que permite solamente retroalimentación kinestésica [46].



Figura 2.9: Laberinto virtual en Open GL [46].

Como propósito se tiene que el paciente se desplace a través del laberinto virtual sin interactuar con las paredes, ya que si ocurre contacto se sentirá una fuerza de reacción la cual se manifestará físicamente en el dispositivo háptico y que percibirá el paciente kinestésicamente. El paciente controla su posición en el ambiente virtual mediante un volante (2.10), en el que el torque de contacto es manifestado mediante un servomotor de corriente directa y, la posición y velocidad es caracterizada con el codificador óptico acoplado a la flecha del motor [46].



Figura 2.10: Volante háptico [46].

En la actualidad ya existen interfaces hápticas con diferentes propósitos como las siguientes:

- **APHASIA PROJECT:** proyecto de investigación interdisciplinar para diseñar tecnologías que apoyen a los sujetos con afasia en su vida cotidiana. Trabajan en la aplicación de PDA´s [49].
- **Sistema PEAT:** funciona como "suplente" de las capacidades realizadas en el cerebro humano por los lóbulos frontales [49].
- **P-ITS:** sistema para facilitar la deambulaci3n en exteriores para personas mayores y personas con deficiencias visuales, basado en tecnologías ubícuas [49].
- **Autominder:** robot autónomo que puede vivir en casa con la persona mayor, le recuerda las actividades que tiene que realizar durante el día, monitoriza las acciones que lleva a cabo y si fuera necesario le recuerda o ayuda en su realizaci3n [49].
- **RoboCare:** sistema integrado de robots para el cuidado de personas mayores. Son sistemas inteligentes capaces no sólo de programar y planificar las AVD, sino de asegurarse de que ocurren y además interpretar cuándo ocurren [49].
- **COACH:** prototipo que identifica las actividades que está llevando a cabo el paciente [49].
- **Nursebot Project:** robot inteligente que ofrece vigilancia, recuerda las tareas cotidianas, manipula objetos y ofrece interacci3n social.
- **RCA (Robotic Caregiver's Assistant):** monitoriza las acciones del paciente, identificando acciones inusuales [49].

2.6. Conclusiones

Como se puede ver en ninguno de los casos en particular de las enfermedades producidas por algun daño en el sistema nervioso no existe metodos apropiados para la cura total de este tipo de enfermedades. Lo único que se busca es mejorar la calidad de vida de cada uno de los pacientes que padecen estos problemas de salud. Y por lo que podemos observar en nuestro entorno muchas personas preocupadas por el bienestar humano se han dado a la tarea de buscar algunas alternativas para obtener soluci3n parcial a cierto tipo de padecimientos. Esto influye de manera positiva puesto que motiva a seguir con este proyecto, pensando que éste puede ser una aportaci3n útil para muchas personas involucradas en estos tipos de situaciones. En este capítulo se present3 un breve estudio del estado del arte de las interfaces hápticas, sus contribuciones a las ciencias médicas, en particular a las neurociencias, y la descripci3n de las discapacidades neurológicas que justifican el desarrollo de este trabajo de investigaci3n.

Capítulo 3

Modelo cinemático directo e inverso de la interfaz háptica R2SG

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta las características físicas y geométricas para la IH con desempeño planar de dos grados de libertad (R2SG), la cadena cinemática haciendo uso del método trigonométrico para definir las coordenadas generalizadas de la interfaz en función de las coordenadas operacionales. Y a partir de estas ecuaciones se obtiene la cinemática directa e inversa de velocidad y aceleración. Así como también se muestran las gráficas representativas de simulación que comprueban las ecuaciones cinemáticas de posición, velocidad y aceleración, tanto de la tarea directa como inversa, al igual que las gráficas experimentales obtenidas de la plataforma planar.

La *cinemática* es la ciencia del movimiento que trata a éste sin importarle las fuerzas que lo causan. Dentro de la cinemática se estudia la posición, la velocidad, aceleración y todas las derivadas de las variables de posición de mayor orden con respecto al tiempo o cualquier otra variable. El estudio de la cinemática de los manipuladores se refiere a todas las propiedades geométricas basadas en el tiempo del movimiento [3].

El **modelo cinemático directo** es el problema geométrico de calcular la posición y orientación del efector final del robot, dados una serie de ángulos entre las articulaciones. La cinemática directo calcula la posición y orientación del marco de referencia del efector final con respecto al marco de la base. El objetivo principal de ésta, es conocer el desempeño del robot manipulador en el espacio operacional o de trabajo tanto en posición como en velocidad [43].

El **modelo cinemático inverso** de los robots manipuladores dada la posición y orientación del efector final, consiste en calcular todos los posibles conjuntos de ángulos entre las articulaciones que podrían usarse para obtener la posición y orientación deseada [43]. El problema cinemático inverso es más complicado que la cinemática directa ya que las ecuaciones no son lineales, sus soluciones no son siempre fáciles o incluso posibles en una forma cerrada. La existencia o no de la solución lo define el espacio de trabajo de un robot dado. La ausencia de una solución significa que el robot no puede alcanzar la posición y orientación deseada porque se encuentra fuera del espacio de trabajo del robot o fuera de los rangos permisibles de cada una de sus articulaciones [15]. El objetivo principal de la cinemática inversa es planificar trayectorias en el espacio operacional o de trabajo para controladores articulares.

El diagrama (3.1) representa el diagrama clásico de control articular y funciona de la siguiente manera:

- El usuario ingresa las trayectorias deseadas \vec{x}_d y $\vec{\dot{x}}$.

- Estos valores son empleados en el algoritmo del modelo cinemático inverso para obtener los valores de la variable articular y de la velocidad articular con los que se desea que el robot se desempeñe $\vec{\theta}_d$ y $\vec{\dot{\theta}}_d$
- Diagrama realimentado: éste se refiere a una operación que en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida ($\vec{\theta}$ y $\vec{\dot{\theta}}$) del sistema y alguna entrada de referencia ($\vec{\theta}_d$ y $\vec{\dot{\theta}}_d$) lo continúa haciendo con base en esta diferencia.
- Se emplea la cinemática directa para obtener los valores de posición y velocidad real que se esta generando, mientras el robot trabaja.

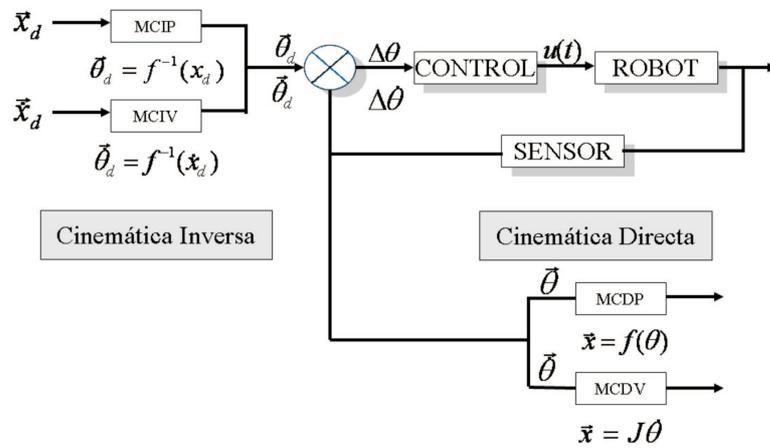


Figura 3.1: Diagrama clásico de control articular.

donde:

\vec{x}_d : Posición deseada

$\vec{\dot{x}}_d$: Velocidad deseada

$\vec{\theta}_d$: Variable articular deseada

$\vec{\dot{\theta}}_d$: Velocidad articular deseada

$\Delta\theta$: Error de la variable articular

$\Delta\dot{\theta}$: Error de la velocidad articular

$u(t)$: Señal de Control

$\vec{\theta}$: Variable articular real

$\vec{\dot{\theta}}$: Velocidad articular real

J : Matriz Jacobiana

MCDP : Modelo cinemático directo de posición

MCIP : Modelo cinemático inverso de posición

MCDV : Modelo cinemático directo de velocidad

MCIV : Modelo cinemático inverso de velocidad

Como se puede apreciar en el diagrama clásico de control articular la cinemática inversa tiene el objetivo de planificar trayectorias en el espacio operacional para controladores articulares y la Cinemática Directa permite conocer el desempeño del robot en el espacio operacional o de trabajo tanto en posición como en velocidad.

3.1.1. Características físicas y geométricas de la interfaz háptica (R2SG)

La estructura mecánica de la IH (R2SG), esta cosntruida de dos eslabones móviles y dos articulaciones, los eslabones son de las mismas características físicas y geométricas pero de diferente longitud. Los actuadores son motores de corriente continua, ambos están ubicados en cada una de las articulaciones con el propósito de obtener la movilidad de cada uno de los eslabones. En la figura (3.2) se presenta la estructura del mecanismo de eslabones articulados [48].

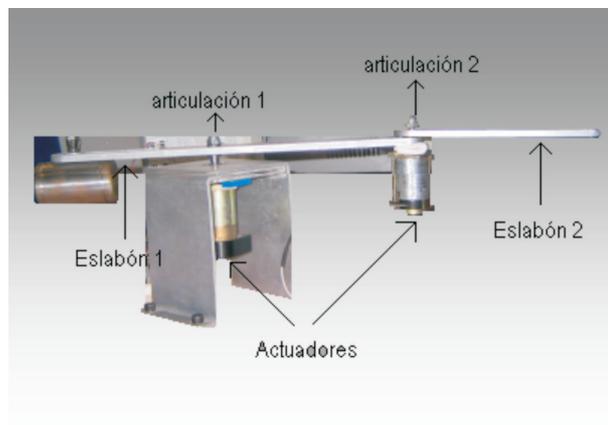


Figura 3.2: Mecanismo de eslabones articulares.

La forma planar representativa de la IH, indicando características geométricas como : longitud de los eslabones y variables articulares o coordenadas generalizadas se representan en la figura (3.3) [48].

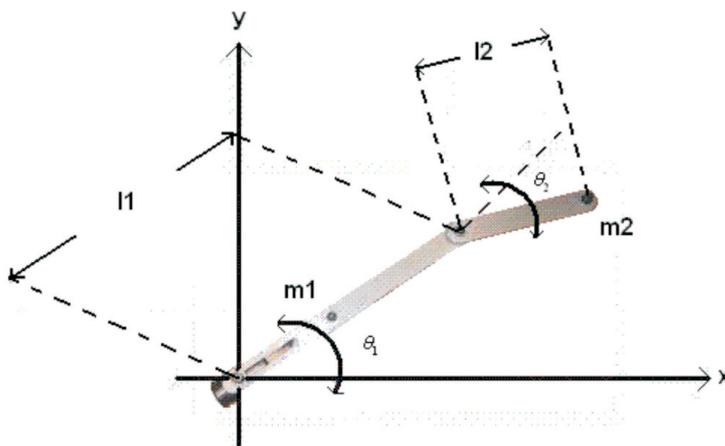


Figura 3.3: Representación planar de la IH R2SG.

La ubicación de los marcos ortonormales de la interfaz (R2SG), se exhiben en la figura (3.4), donde O_0 y O_1 , representan el origen de las articulaciones correspondientes. El plano de referencia es el X-Y, esto implica que el eje Z es ortogonal al plano [48].

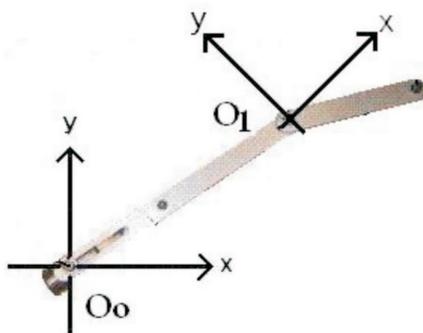


Figura 3.4: Representación planar de la IH R2SG.

3.2. Obtención analítica del modelo cinemático

En la mayoría de las aplicaciones de robótica, se está interesado en la descripción espacial del efector final del manipulador con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fija [15].

La cinemática del robot trata con el estudio analítico de la geometría del movimiento de un robot con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo como una función del tiempo sin considerar las fuerzas-momentos que originan dicho movimiento. Así pues, trata con la descripción analítica del desplazamiento espacial del robot como función del tiempo, en particular las relaciones entre variables espaciales de tipo de articulación y la posición y orientación del efector final del robot [15].

En este caso se resolvera la cinemática por el método geométrico, este procedimiento es adecuado para robots de pocos grados de libertad o para el caso de que se consideren solo los primeros grados de libertad, dedicados a posicionar el extremo. El procedimiento en si se basa en encontrar suficiente número de relaciones geométricas en las que intervendrán las coordenadas del extremo del robot, sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus elementos [3].

3.2.1. Modelo cinemático directo de posición (MCDP)

Este modelo consiste en determinar cual es la posición y orientación del extremo final de la IH, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos de la plataforma [3], [15].

$$\vec{x} = f(\theta) \quad (3.1)$$

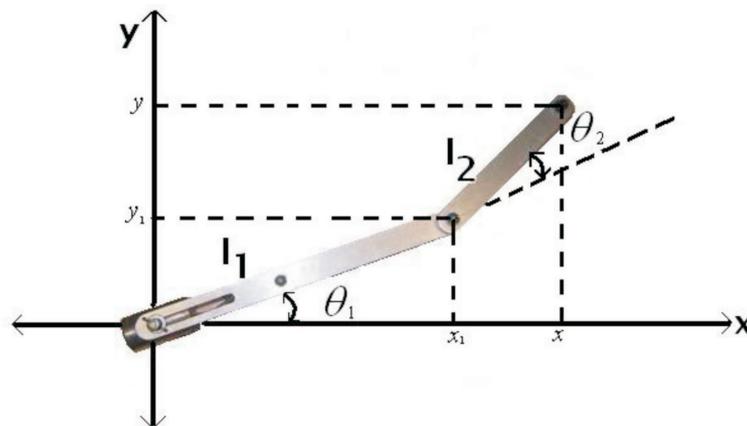


Figura 3.5: Diagrama para obtener el MCDP.

donde de la figura (3.5):

(x_1, y_1) : coordenadas operacionales del eslabón 1.

(x, y) : coordenadas operacionales del efector final.

l_1 : longitud del eslabón 1.

l_2 : longitud del eslabón 2.

θ_1 y θ_2 : coordenadas articulares 1 y 2 respectivamente.

Para adquirir las ecuaciones del MCDP, primeramente se obtienen mediante la ley de senos y cosenos las coordenadas operacionales de l_1 como se muestran en las ecuaciones (3.2) y (3.3) respectivamente.

$$x_1 = l_1 \cos \theta_1 \quad (3.2)$$

$$y_1 = l_1 \sin \theta_1 \quad (3.3)$$

La posición del efector final es la diferencia que hay entre la coordenada x y la coordenada x_1 , al igual que en y y y_1 como se muestra a continuación:

$$x - x_1 = l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.4)$$

$$y - y_1 = l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.5)$$

Despejando a x y y se tiene:

$$x = x_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.6)$$

$$y = y_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.7)$$

Sustituyendo la ecuación (3.2) en (3.6) y (3.3) en (3.7) se determinan las coordenadas operacionales que describen la posición del efector final.

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.8)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.9)$$

Para mayor comodidad en este trabajo de investigación se utiliza la siguiente abreviación de senos y cosenos en los modelos cinemáticos.

$$x = l_1 C_1 + l_2 C_{12} \quad (3.10)$$

$$y = l_1 S_1 + l_2 S_{12} \quad (3.11)$$

donde:

C_1 : $\cos(\theta_1)$.

C_{12} : $\cos(\theta_1 + \theta_2)$.

S_1 : $\sin(\theta_1)$.

S_{12} : $\sin(\theta_1 + \theta_2)$.

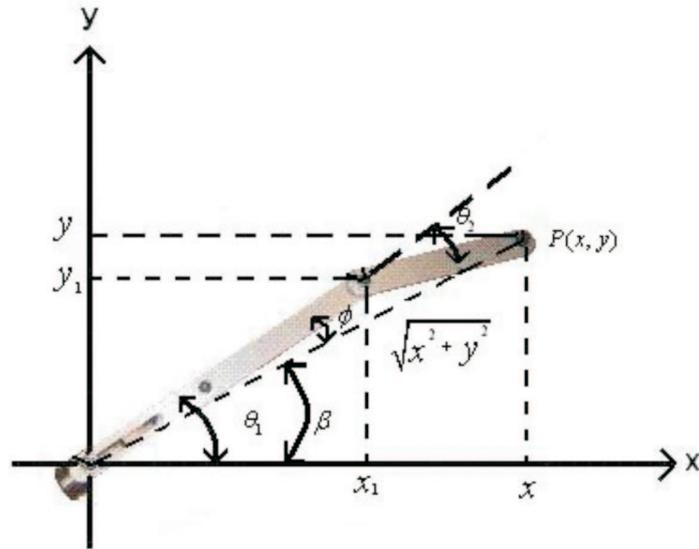


Figura 3.7: Diagrama para obtener el MCIP codo arriba.

Cálculo de β

El valor de β es determinado por las coordenadas operacionales del efector terminal (x, y) empleando la función trigonométrica \tan^{-1}

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \tag{3.16}$$

a lo que es equivalente en matlab

$$\beta = \text{atan2}(y, x) \tag{3.17}$$

Cálculo de ϕ

Aplicando ley de senos y cosenos involucrando el valor de ϕ , basandose en la figura (3.6) o (3.7) se obtiene la siguiente ecuación

$$\frac{\sin(\phi)}{l_2} = \frac{\sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tag{3.18}$$

despejando de la ecuación (3.36) el valor de ϕ es

$$\phi = \sin^{-1} \frac{l_2 \sin \theta_2}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tag{3.19}$$

Cálculo de θ_2

Remitiendonos nuevamente a la ley de senos y cosenos ahora involucrando el valor de θ_2 se tiene

$$\cos(180^\circ - \theta_2) = \frac{l_1^2 + l_2^2 - (x^2 + y^2)}{2l_1 l_2} \tag{3.20}$$

A partir de la ecuación (3.20) el valor de θ_2 se convierte en

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left\{ \frac{x^2 + y^2 - (l_1^2 + L_2^2)}{2l_1l_2} \right\} \quad (3.21)$$

3.2.3. Modelo cinemático directo de velocidad (MCDV)

El modelado cinemático de un robot busca las relaciones entre las variables articulares y la posición (expresada normalmente en forma de coordenadas cartesianas) y orientación del extremo del robot. En esta relación no se tienen en cuenta las fuerzas o pares que actúan sobre el robot (actuadores, cargas, fricciones, etc.) y que pueden originar el movimiento del mismo. Sin embargo, sí que debe permitir conocer, además de la relación entre las coordenadas articulares y del extremo, la relación entre sus respectivas derivadas. Así, el sistema de control del robot debe establecer que velocidades debe imprimir a cada articulación (a través de sus respectivos actuadores) para conseguir que el extremo desarrolle una trayectoria temporal concreta, por ejemplo, una línea recta a velocidad constante [15].

$$\dot{x} = J \dot{\theta} \quad (3.22)$$

Para este y otros fines, es de gran utilidad disponer de la relación entre las velocidades de las coordenadas articulares y las de posición y orientación del extremo del robot. La relación entre ambos vectores de velocidad se obtiene a través de la denominada matriz Jacobiana (J) [15].

La matriz J directa permite conocer las velocidades del extremo del robot a partir de los valores de las velocidades de cada articulación.

Realizando la primera derivada a las ecuaciones (3.10) y (3.11), que representan el MCDP con respecto del tiempo, se obtiene la cinemática directa de velocidad.

Sea definida la derivada de x y y como

$$\dot{x} = \frac{d}{dt} [l_1 C_1 + l_2 C_{12}] \quad (3.23)$$

$$\dot{y} = \frac{d}{dt} [l_1 S_1 + l_2 S_{12}] \quad (3.24)$$

Realizando el procedimiento de derivación a las ecuaciones (3.23) y (3.24) definimos:

$$\dot{x} = -l_1 S_1 - l_2 S_{12}(\dot{\theta}_1) - (l_2 S_{12})(\dot{\theta}_2) \quad (3.25)$$

$$\dot{y} = (l_1 C_1 + l_2 C_{12})(\dot{\theta}_1) + (l_2 C_{12})(\dot{\theta}_2) \quad (3.26)$$

donde (3.25) y (3.26) son la forma matemática que representa al MCDV

Representación Matricial de \dot{x} y \dot{y}

A partir de la representación matricial de \dot{x} y \dot{y} se obtiene los valores de J .

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

donde:

$$J_{11} = -l_1 S_1 - l_2 S_{12}$$

$$J_{21} = l_1 C_1 + l_2 C_{12}$$

$$J_{12} = l_2 S_{12}$$

$$J_{22} = l_2 C_{12}$$

3.2.4. Modelo cinemático inverso de velocidad (MCIV)

La matriz Jacobiana inversa permitirá conocer las velocidades determinadas en el extremo del robot.

$$\dot{\theta} = J^{-1} \dot{x} \tag{3.27}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{inv11} & J_{inv12} \\ J_{inv21} & J_{inv22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

donde:

$$\det = l_1 l_2 S_{12} C_1 - S_1 C_{12}$$

$$J_{inv11} = l_2 C_{12} / \det$$

$$J_{inv21} = l_1 C_1 + l_2 C_{12} / \det$$

$$J_{inv12} = -l_2 S_{12} / \det$$

$$J_{inv22} = l_1 S_1 - l_2 S_{12} / \det$$

3.2.5. Modelo cinemático directo de aceleración (MCDA)

El MCDA resulta de la segunda derivada de las ecuaciones que representan al MCDP. Si se retoman las ecuaciones (3.25) y (3.26) del MCDV y se obtiene la derivada de estas, se tendrán las ecuaciones que describen el modelo cinemático directo de aceleración [15].

$$\ddot{x} = J \ddot{\theta} + \dot{J} \dot{\theta} \tag{3.28}$$

Definiendo la derivada de \dot{x} y \dot{y} :

$$\frac{d}{dt} \dot{x} = \frac{d}{dt} \left[[-l_1 S_1 - l_2 S_{12}] \dot{\theta}_1 - [l_2 S_{12}] \dot{\theta}_2 \right] \tag{3.29}$$

$$\frac{d}{dt} \dot{y} = \frac{d}{dt} \left[l_1 C_1 + l_2 C_{12} \dot{\theta}_1 + l_2 C_{12} \dot{\theta}_2 \right] \tag{3.30}$$

De modo que, efectuando el procedimiento de derivación tenemos que

$$\ddot{x} = [-l_1 S_1 - l_2 S_{12}] \ddot{\theta}_1 - [l_2 S_{12}] \ddot{\theta}_2 - l_2 C_{12} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - [l_1 C_1 \theta_1 + l_2 C_{12}] \dot{\theta}_1^2 - l_2 C_{12} \dot{\theta}_2^2 \quad (3.31)$$

$$\ddot{y} = [l_1 C_1 + l_2 C_{12}] \ddot{\theta}_1 + [l_2 C_{12}] \ddot{\theta}_2 - 2l_2 S_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - [l_1 S_1 - l_2 S_{12}] \dot{\theta}_1^2 - l_2 S_{12} \dot{\theta}_2^2 \quad (3.32)$$

Representación matricial del MCDA:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{J}_{11} & \dot{J}_{12} \\ \dot{J}_{21} & \dot{J}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

donde:

$$\dot{J}_{11} = -(l_1 C_1 + l_2 C_{12}) \dot{\theta}_1 + 2l_2 C_{12} \dot{\theta}_2$$

$$\dot{J}_{12} = -l_2 C_{12} \dot{\theta}_1$$

$$\dot{J}_{21} = -(l_1 S_1 + l_2 S_{12}) \dot{\theta}_1 + 2l_2 S_{12} \dot{\theta}_2$$

$$\dot{J}_{22} = l_2 C_{12} \dot{\theta}_1$$

3.2.6. Modelo cinemático inverso de aceleración (MCIA)

La forma representativa clásica del MCIA es como se presenta a continuación

$$\ddot{\theta} = J^{-1} [\ddot{x} - \dot{J}\dot{\theta}] \quad (3.33)$$

Este se obtiene a partir del despeje de $\ddot{\theta}$ de la ecuación (3.28) y su representación matricial es la siguiente

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{inv11} & J_{inv12} \\ J_{inv21} & J_{inv22} \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} \dot{J}_{11} & \dot{J}_{12} \\ \dot{J}_{21} & \dot{J}_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \right]$$

3.3. Comprobación en matlab de la cinemática obtenida

Para obtener la comprobación de la cinemática empleamos el siguiente diagrama de flujo:

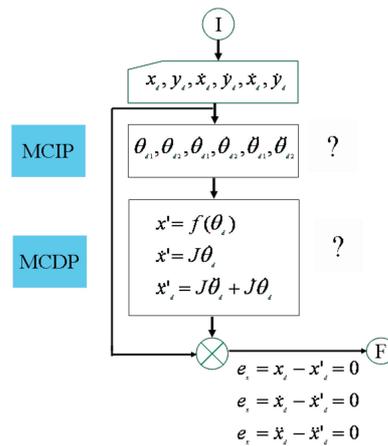


Figura 3.8: Diagrama de flujo para la comprobación de la cinemática obtenida.

El diagrama (3.8) se interpreta de la siguiente manera:

- Se ingresan las trayectorias que se desean
- Se emplea el MCI para obtener la posición, la velocidad y la aceleración articular.
- Con los valores obtenidos en la cinemática inversa se emplea el MCD para obtener las trayectorias realizadas.
- Por último se comparan los valores deseados y los valores obtenidos los cuales deben ser igual a 0 si el análisis es correcto.

Trayectorias deseadas:

$$x = \sin(t) \quad (3.34)$$

$$y = \cos(t) \quad (3.35)$$

$$\dot{x} = \cos(t) \quad (3.36)$$

$$\dot{y} = -\sin(t) \quad (3.37)$$

$$\ddot{x} = -\sin(t) \quad (3.38)$$

$$\ddot{y} = -\cos(t) \quad (3.39)$$

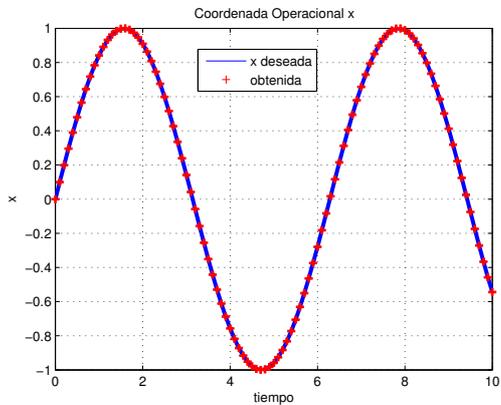


Figura 3.9: Coordenada operacional x (real y deseada)

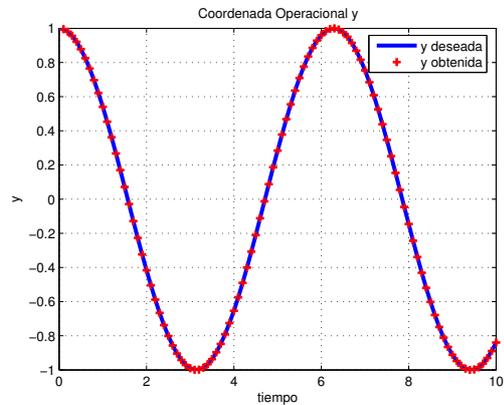


Figura 3.10: Coordenada operacional y (real y deseada)

La figura (3.9) y (3.10) muestran el valor de las coordenadas operacionales en x ecuación (3.34), y en y ecuación (3.35) que representan el seguimiento de las trayectorias que se tomaron en cuenta para la comprobación del MCDP y MCIP, al igual que las trayectorias resultantes del algoritmo y análisis empleado.

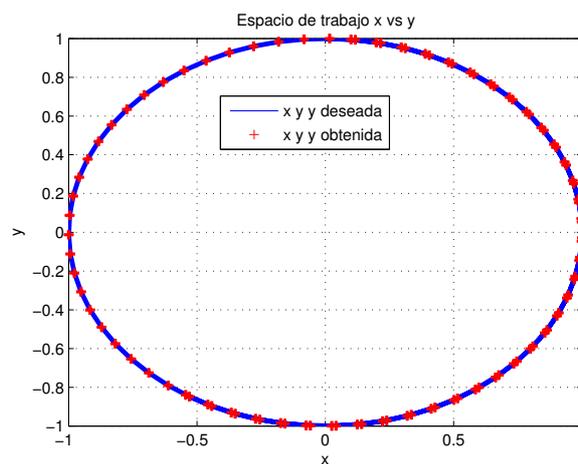


Figura 3.11: Espacio de trabajo de x vs y.

Por otro lado la figura (3.11) refleja el espacio de trabajo de x vs y .

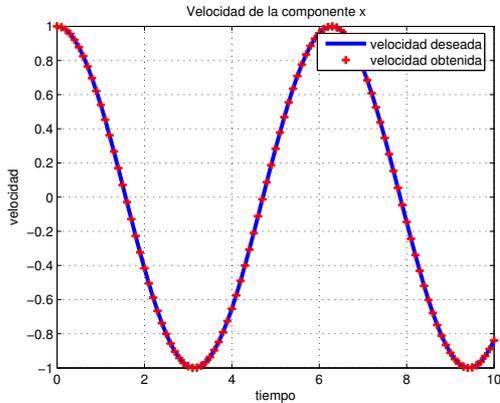


Figura 3.12: Coordenada operacional x_p (real y deseada)

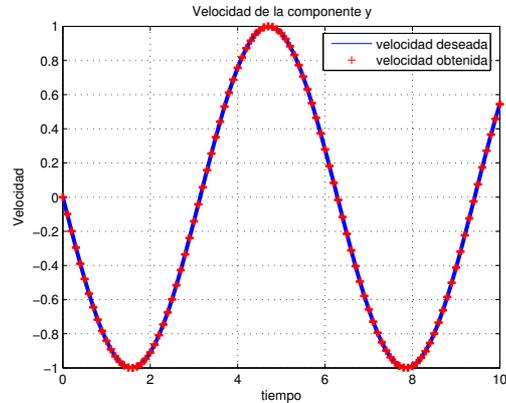


Figura 3.13: Coordenada operacional y_p (real y deseada)

En las figuras (3.12) y (3.13) se obtiene el seguimiento de trayectorias que se desea al aplicar el MCDV y el MCIV, al igual que su respuesta; estas representan la derivada de las trayectorias de las coordenadas operacionales (3.34) y (3.35) respectivamente, las cuales dan como resultado (3.36) y (3.37)

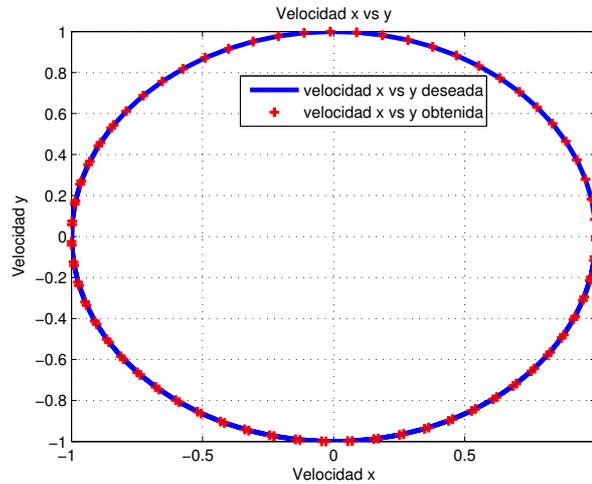


Figura 3.14: Espacio de trabajo de x_p vs y_p .

La gráfica (3.14) que se proyecta es la imagen del espacio singular de velocidad real y la velocidad deseada.

De igual manera las gráficas (3.15) y (3.16) reflejan el seguimiento de trayectorias de las ecuaciones (3.38) y (3.39) que se desea al aplicar el MCDA y el MCIA. Como se puede apreciar también se visualiza el sistema de respuesta; estas representan la derivada de las trayectorias de las coordenadas deseadas de velocidad, ecuaciones (3.36) y (3.37) respectivamente.

La gráfica (3.17), igual que en las imágenes (3.11) y (3.14) se aprecia la trayectoria del espacio de trabajo de la aceleración real y la aceleración deseada.

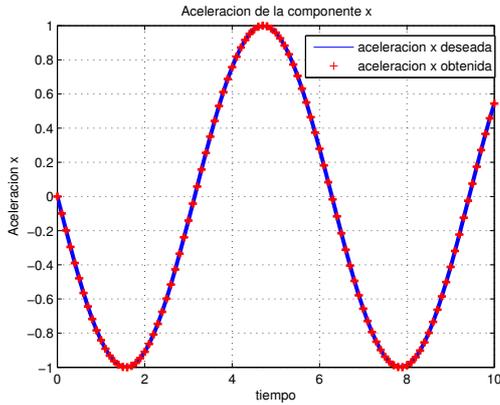


Figura 3.15: Coordenada operacional xpp (real y deseada).

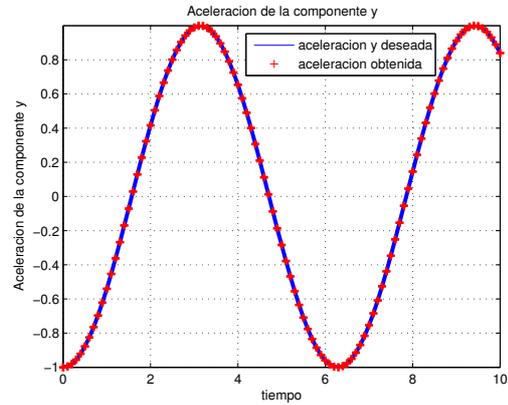


Figura 3.16: Coordenada operacional ypp (real y deseada).

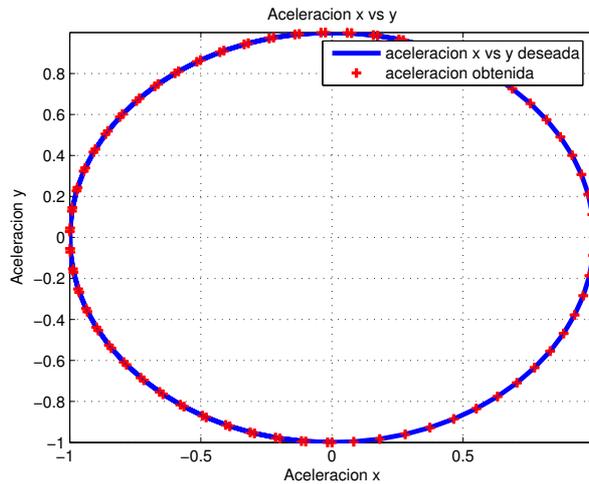


Figura 3.17: Espacio de trabajo de xpp vs ypp.

Como se puede ver la comprobación analítica de las ecuaciones que describen la Cinemática Directa e Inversa de Posición, Velocidad y Aceleración son correctos y esto lo pudimos verificar con el algoritmo empleado en matlab.

3.4. Comprobación experimental de la cinemática de la interfaz háptica R2SG

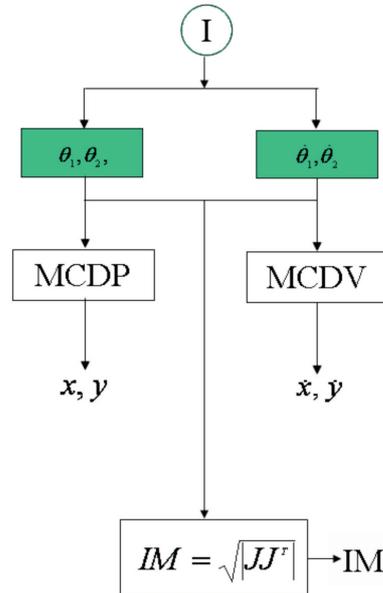


Figura 3.18: Diagrama para la comprobación experimental del MC y MD de la IH R2SG.

Para la comprobación experimental de la cinemática obtenida se empleó la siguiente lógica de programación en la interfaz R2SG.

- De la interfaz R2SG se obtienen las variables articulares 1 y 2.
- A partir de los valores de las variables articulares se obtiene el valor de la velocidad articular 1 y 2.
- Se emplea el MCDP para obtener el valor en x y el valor en y de la posición del efector final de la interfaz.
- Al igual que se emplea el MCDV para obtener el valor de las velocidades del efector final.
- Se obtiene el índice de manipulabilidad.

Se realizaron varios experimentos con el uso de la IH R2SG y la plataforma gráfica de Delphi, como se muestra en la fig (3.19), haciendo uso del algoritmo (3.18).



Figura 3.19: Área de trabajo de la IH.

Experimento 1:

Los actuadores de la IH R2SG mediante circuitería proporcionan los valores de posición de los eslabones uno y dos, que a partir de una regla de tres nos da el valor en grados de θ_1 y θ_2 , debido a que los actuadores tienen codificadores ópticos, estos datos representan a las variables articulares y su valor depende de los movimientos generados en la IH. La figura (3.20) y (3.21) son representativas de los resultados obtenidos de la trayectoria realizada de la variable articular 1 y de la variable articular 2 respectivamente.

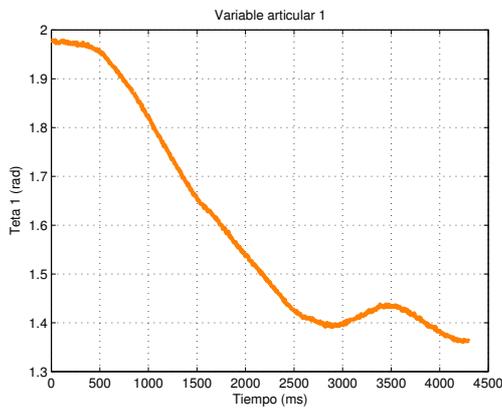


Figura 3.20: Variable art1 del exp 1.

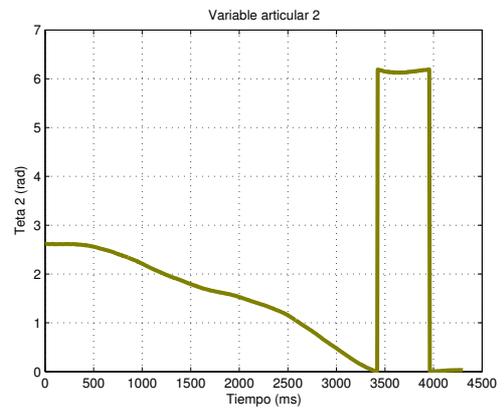


Figura 3.21: Variable art2 del exp 2.

Las imágenes (3.22) y (3.23) son una aproximación de las velocidades articulares del eslabón 1 y del eslabón 2 que se hizo mediante código a partir de los datos de las variables articulares capturados de la IH.

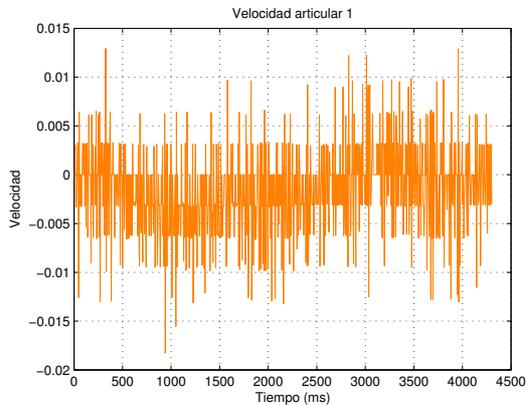


Figura 3.22: Velocidad art1 del exp 1.

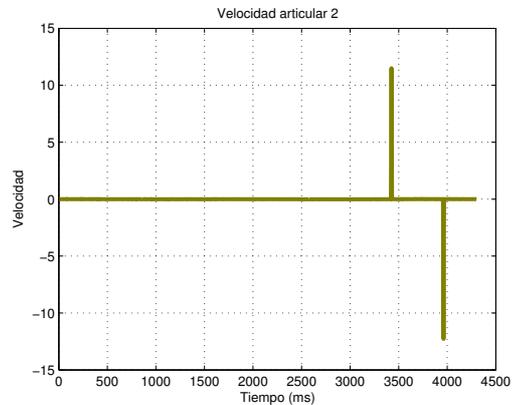
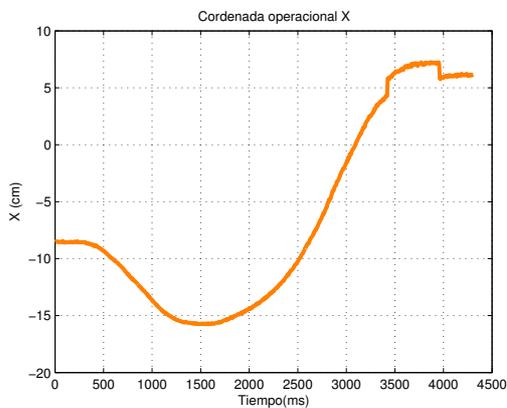
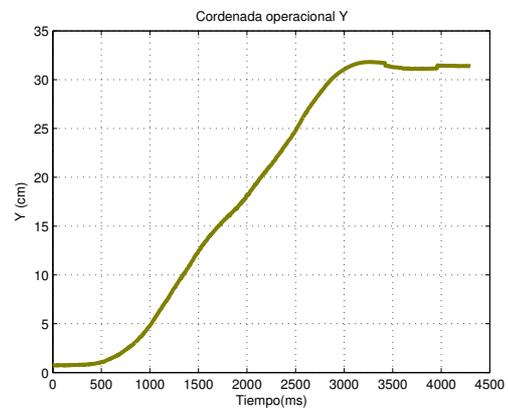


Figura 3.23: Velocidad art2 del exp 1.

Las coordenadas operacionales en x y y , son producto de emplear mediante código de programación el MCDP representado por las ecuaciones (3.8) y (3.9), esto es porque se tienen los datos de longitudes y variables articulares necesarios para desarrollar el modelo. Y la resultante de aplicar el MCDP son las gráficas (3.24) y (3.25), que nos indican la posición en x y y del efector final.

Figura 3.24: Coordenada operacional x del exp 1.Figura 3.25: Coordenada operacional y del exp 1.

De la misma forma las figuras (3.26) y (3.27) proyectan las velocidades operacionales x y y del efector terminal generadas por la trayectoria despenada.

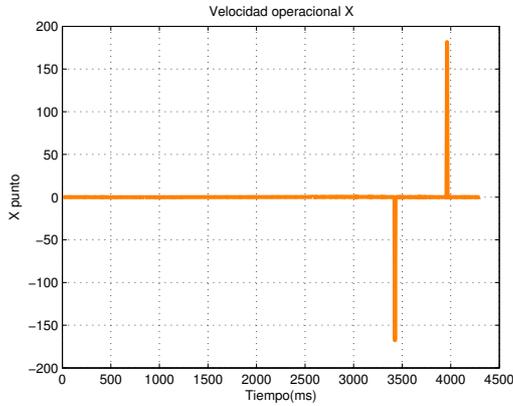


Figura 3.26: Velocidad operacional en x del exp 1.

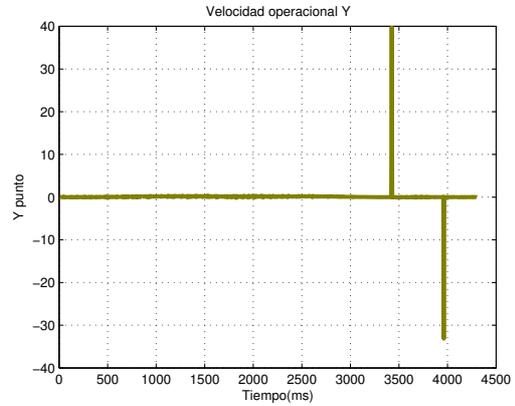


Figura 3.27: Velocidad operacional en y del exp 1.

En la figura (3.28) se aprecia el movimiento realizado del experimento 1, donde el espacio de trabajo esta representado por la circunferencia y el trazo es la trayectoria. A simple vista se puede notar que toca puntos singulares la señal desarrollada.

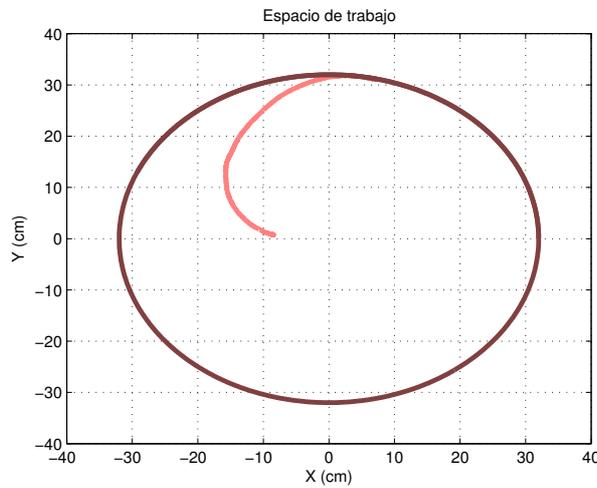


Figura 3.28: Espacio de trabajo del exp 1.

La figura (3.29) representa el índice de manipulabilidad (IM). Este esta denominado o se obtiene por la ecuación (3.40), desarrollado por Yoshikawa y la cual nos ayuda a monitorear , como su nombre lo indica, que tan manipulables es la IH, es decir, mientras el IM sea diferente de 0 indica que se encuentra dentro de su espacio de trabajo, si llega a ser igual a 0 indica que esta tocando puntos singulares o puntos no permisibles para la IH. Como se puede observar la ecuación del IM esta intimamente relacionada con la matriz J.

$$IM = \sqrt{|J^T J|} \tag{3.40}$$

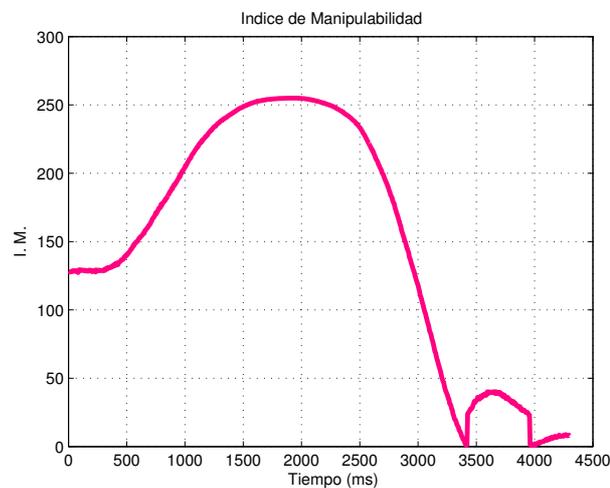


Figura 3.29: Índice de manipulabilidad del exp 1.

Experimento 2:

En el experimento 2 se desarrolló una trayectoria de mayor complejidad a comparación del experimento 1. Las figuras (3.30), (3.31), (3.32), (3.33), (3.34), (3.35), (3.36) y (3.37) son representativas de todas las variables reportadas y analizadas de la IH.

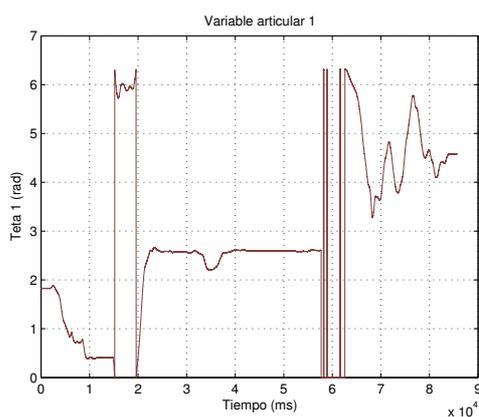


Figura 3.30: Variable art1 del exp 2.

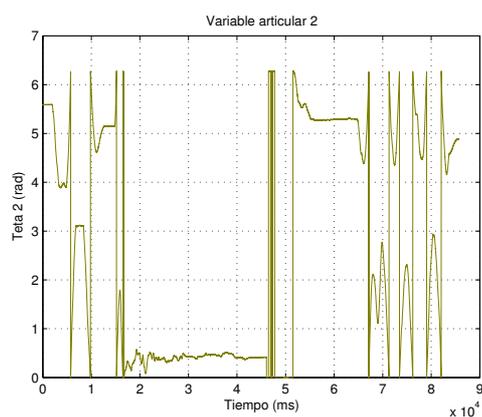


Figura 3.31: Variable art2 del exp 2.

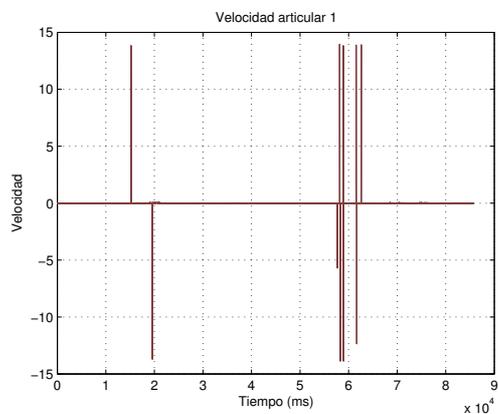


Figura 3.32: Velocidad art1 del exp 2.

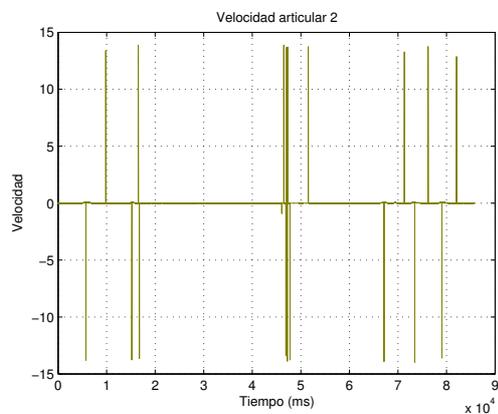


Figura 3.33: Velocidad art2 del exp 2.

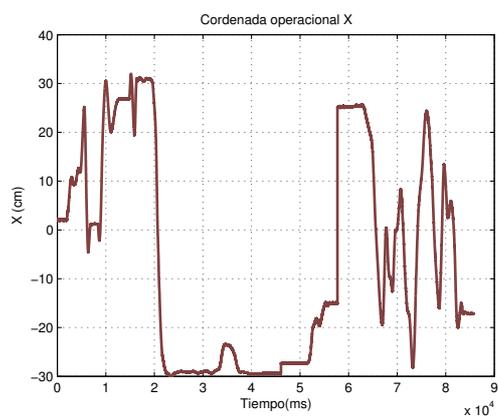


Figura 3.34: Coordenada operacional x del exp 2.

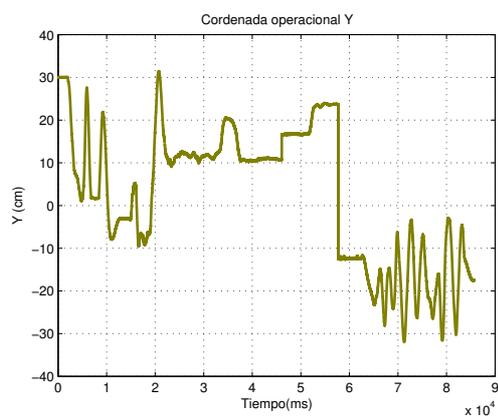


Figura 3.35: Coordenada operacional y del exp 2.

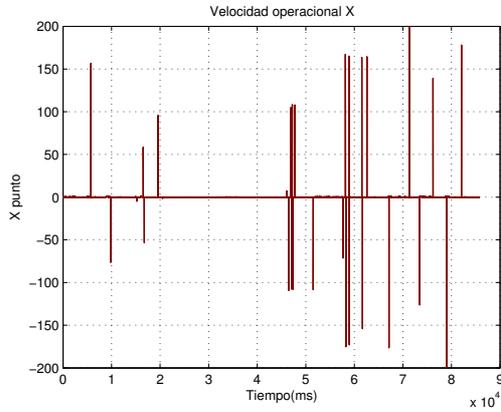


Figura 3.36: Velocidad operacional en x del exp 2.

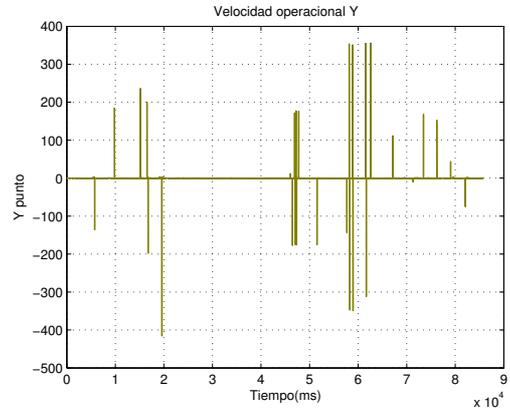


Figura 3.37: Velocidad operacional en y del exp 2.

La gráfica (3.29) es el monitoreo del IM de la trayectoria (3.28) y la gráfica (3.39) de la (3.38), por lo tanto, comparando desempeños de ambas gráficas hemos comprobado que partir de la simulación experimental de la matriz de inercia los acercamientos de esta señal con 0 son muy similares a la señal que representa el índice de manipulabilidad explícitamente cuando ocurre contacto con el contorno del espacio de trabajo.

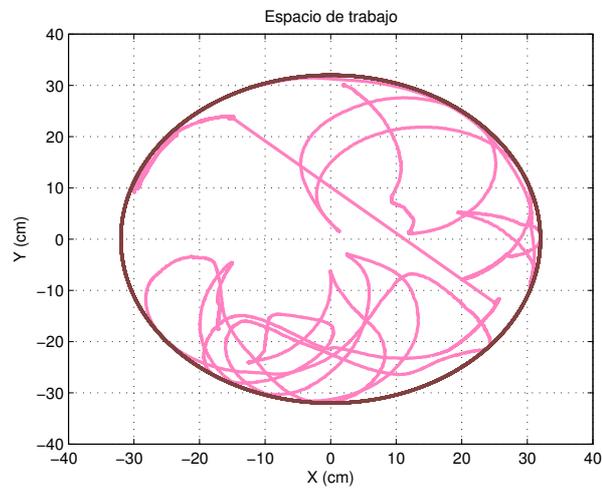


Figura 3.38: Espacio de trabajo del exp 2.

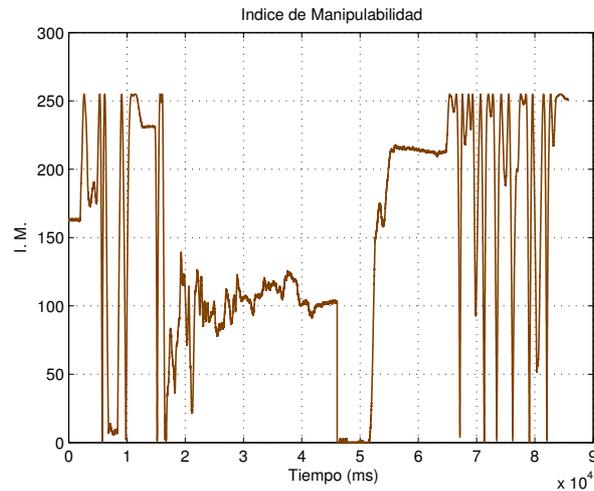


Figura 3.39: Índice de manipulabilidad del exp 2.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se analizó el MCD y el MCI de posición, velocidad y aceleración de la IH, comprobando que el análisis fuese correcto haciendo uso de la programación, empleando el programa de matlab y concluyendo que los modelos obtenidos son correctos, ya que en la simulación el seguimiento a cada una de las trayectorias deseadas es la esperada.

La comprobación de los modelos obtenidos no solo se quedó en la etapa de la simulación ya que estos datos se emplearon discretamente en la IH; verificando que se puede tener un control de todas las variables que intervienen en la IH, como sus coordenadas operacionales en x y y , variables articulares, velocidades, etc, así como también y considerado como uno de los puntos más importantes encontrados en estos experimentos el poder monitorear el desempeño planar de la IH, cuidando puntos no admisibles y admisibles dentro del espacio de trabajo y de esta manera cuidar la vida útil de la IH para que no realice esfuerzos y por lo tanto no haya desgastes, estos monitoreos se hacen mediante las gráficas del espacio de trabajo y del IM.

Capítulo 4

Modelo dinámico de la interfaz háptica R2SG

4.1. Introducción

En este capítulo, se presenta el análisis del modelo dinámico de la interfaz háptica (IH) con desempeño planar de dos grados de libertad (R2SG), empleando los métodos de Newton-Euler y Euler-Lagrange, ya que éste será de suma importancia para el comportamiento y el diseño de los controles que se van a aplicar en la trayectoria deseada en el laberinto virtual para la rehabilitación del paciente. También se muestran las gráficas representativas de simulación que comprueban las ecuaciones dinámicas y sus propiedades al igual que las gráficas experimentales obtenidas de la plataforma planar.

La dinámica se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en el se origina. Por lo tanto, el modelo dinámico de un robot tiene por objeto conocer la relación matemática entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo, como se describe a continuación [44].

- La localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo y sus derivadas: velocidad y aceleración.
- Las fuerzas pares aplicadas en las articulaciones (o en el extremo del robot).
- Los parámetros dimensionales del robot, como longitud, masa e inercias de sus elementos.

La obtención de este modelo para mecanismos de uno o dos grados de libertad no es excesivamente compleja, pero a medida que el número de grados de libertad aumenta, el planteamiento y obtención del modelo se complica enormemente. Por este motivo no siempre es posible obtener un modelo dinámico expresado de una forma cerrada, esto es, mediante una serie de ecuaciones normalmente del tipo diferencial de segundo orden, cuya integración permita conocer que el movimiento surge al aplicar unas fuerzas o que fuerzas hay que aplicar para obtener un movimiento determinado. Para la realización de este trabajo no habrá tanta complejidad, pues como se dijo al principio nuestra IH (R2SG) que ocupamos es de dos grados de libertad [44].

El modelo dinámico debe ser resuelto entonces de manera iterativa mediante la utilización de un procedimiento numérico [44].

El problema de la obtención del modelo dinámico de un robot es, por lo tanto, uno de los aspectos más complejos de la robótica, lo que ha llevado a ser obviado en numerosas ocasiones. Sin embargo, el modelo dinámico es imprescindible para conseguir los siguientes fines [44]:

- Simulación del movimiento del robot.
- Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot.
- Dimensionamiento de los actuadores.
- Diseño y evaluación del control dinámico del robot.

Es importante hacer notar que el modelo dinámico completo de un robot debe incluir no solo la dinámica de sus elementos (barras o eslabones), sino también la propia de sus sistemas de transmisión de los actuadores y sus equipos electrónicos de mando. Estos elementos incorporan al modelo dinámico nuevas inercias, rozamientos, saturaciones de los circuitos electrónicos, etc; aumentando aún más su complejidad [44].

Cuando una fuerza es aplicada a un cuerpo, tiende a acelerarse de acuerdo a la ley de Newton. Por lo tanto, la dinámica es la rama de la mecánica que estudia conjuntamente el movimiento y las fuerzas que lo originan. En las bases de esta definición, el comportamiento de la dinámica de un robot es descrita en términos de razón de tiempo de cambios de la configuración de los brazos en relación de los torques empleados por los actuadores [44].

El control de movimiento debe fijarse a los eslabones, que es el fin de trazo de una trayectoria deseada de un sistema de control que ha producido pares en la articulación para balancear la fuerza de los eslabones. Cuando un eslabón es acelerado, el actuador proporciona un par que puede vencer la inercia [15].

Un actuador puede hacer cuatro tipos de pares [44]:

Par dinámico: el cual surge del movimiento.

Par estático: el cual surge en la fricción del mecanismo.

Par gravitacional: el cual surge de la fuerza de gravedad actuada en el eslabón.

El par de vector de fuerzas: el cual surge del trabajo.

Hay tres tipos de pares dinámicos que surgen del movimiento del manipulador [44]:

Par inercial: es proporcionado por la articulación de aceleración en concordancia con la segunda ley de Newton.

Par centripetal: surge de las fuerzas centripetales, las cuales obligan a un cuerpo a rotar alrededor de un punto.

Par de Coriolis: surge de la fuerza vertical derivada de la interacción de dos eslabones rotando, estos son proporcionales al producto de la articulación de velocidad de esos eslabones.

4.1.1. Modelo dinámico directo e inverso de un robot.

Modelo dinámico directo: expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen [15].

Modelo dinámico inverso: expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas [15].

4.2. Análisis del modelo dinámico.

4.2.1. Modelado mediante la formulación de Newton-Euler.

Para que un movimiento del efector final lleve a cabo una tarea, el programa de control planea una trayectoria, así, convirtiendo el movimiento deseado en una secuencia de tiempo en el movimiento de la articulación. Esta trayectoria planeada, encuentra sus fuerzas y pares actuando en el eslabón usando la formulación de Newton-Euler [44].

La ecuación de Newton-Euler, se relaciona con las fuerzas y pares de velocidad y aceleración de los centroides de los eslabones por tomarse en cuenta las masas, longitudes, posiciones e inercias de los eslabones [15].

Por lo tanto, este método es basado en la segunda ley de Newton ($F = ma$); es un procedimiento recursivo en el que para n número de eslabones se calcula las velocidades articulares (\dot{q}), las aceleraciones articulares (\ddot{q}) y las aceleraciones al centro de la masa de la barra l [15].

La formulación de Newton-Euler parte del equilibrio de fuerzas y pares [15]:

$$\sum F = m (dv) \quad (4.1)$$

$$\sum T = Iw + w(Iw) \quad (4.2)$$

Un adecuado desarrollo de estas ecuaciones (4.1) y (4.2), conduce a una formulación recursiva en la que se obtienen la posición, velocidad y aceleración del eslabón i referidos a la base del robot a partir de los correspondientes del eslabón $i-1$ y del movimiento relativo de la articulación i . De este modo, partiendo del eslabón uno se llega al eslabón n . Con estos datos se procede a obtener la fuerzas y pares actuantes sobre el eslabón i referidos a la base del robot a partir de los correspondientes al eslabón $i+1$, recorriéndose de esta forma todos los eslabones desde el eslabón n al eslabón uno [15].

En la figura (4.1), podemos ver claramente las variables que se estudiarán para obtener nuestro modelo dinámico, también se puede observar que no se muestran las variables de las longitudes de los centros de gravedad (LCG), ya que estos se encuentran en las articulaciones. En esta figura, también se puede verificar la vista física del la IH (R2SG).

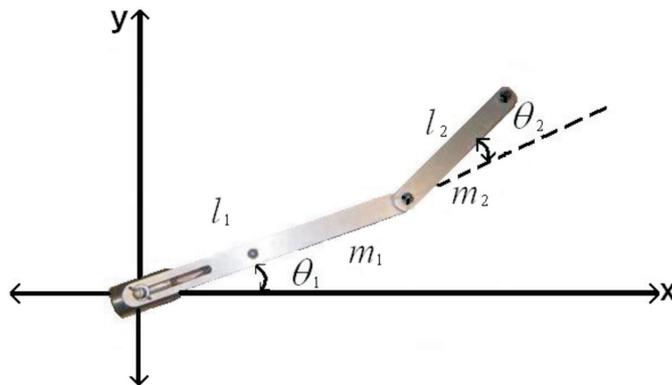


Figura 4.1: Representación de las variables a utilizar en el análisis del modelo dinámico.

donde:

l_1, l_2 : longitud de los eslabones.

m_1, m_2 : masas de los eslabones.

θ_1, θ_2 : variables articulares.

\mathbf{x}, \mathbf{y} : coordenadas operacionales.

4.2.2. Ecuación general.

La ecuación Newton-Euler, describe la fuerza y el par aplicado a la articulación por un actuador como función de otras fuerzas y par actuando en la articulación. Estas ecuaciones, expresan la articulación, par y fuerza en términos de velocidad y aceleración de los centros de los eslabones [44].

Pero como el movimiento de los centros depende de la estructura cinemática del manipulador, estas no son independientes y por consecuencia, estas no son adecuadas como variables de salida [44].

Para obtener ecuaciones adecuadas para usarse en el control de movimiento del manipulador, estas ecuaciones son reorganizadas de tal forma que expresan una salida y una entrada explícita relacionadas en términos de variables independientes generalizadas en los ángulos de las articulaciones. Para la dinámica directa, la entrada es el par de la articulación y la salida son las variables de posición de la articulación. Para la dinámica inversa, la entrada es la variable de posición de la articulación y la salida es el par de la articulación. En la siguiente figura (4.2), se puede mostrar un diagrama de la dinámica inversa y dinámica directa [44].

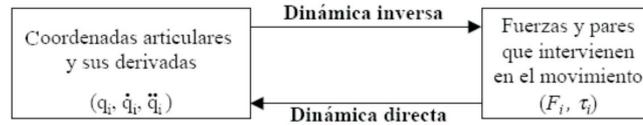


Figura 4.2: Relación de la dinámica inversa y directa [15].

La forma cerrada de la ecuación Newton-Euler de la dinámica a la que es llamada ecuación general es [44]:

$$\tau = H(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F(\dot{\theta}) \quad (4.3)$$

donde:

$H(\theta) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$: matriz de inercia.

$C(\theta, \dot{\theta}) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$: matriz de Coriolis.

$G(\theta) \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$: matriz de gravedad.

$F(\dot{\theta}) \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$: matriz de fricción.

En donde n va a ser igual a dos por ser la IH (R2SG) de dos grados de libertad.

En la ecuación (4.3), se puede observar que la sumatoria de la matriz de inercia, Coriolis, gravedad y fricción va a dar como resultado, la fuerza o par que se va aplicar al robot.

4.2.3. Propiedades de la dinámica.

La dinámica considera los efectos debidos a las inercias, fuerzas de Coriolis, gravedad, perturbaciones y otros. Esta revela la relación entre la señal de control $\tau(t)$ y las variables articulares $q(t)$, la cual, es requerida para propósitos de diseño de un sistema de control. Es por eso que la dinámica de un robot debe satisfacer algunas importantes propiedades físicas que sirven para observar la estabilidad o inestabilidad del robot (que tan bien puede desempeñar una tarea) y la manipulabilidad de este (si alcanza a realizar una tarea dependiendo si se encuentra en su espacio de trabajo o no) al momento de ejecutar algunas operaciones, además, dichas propiedades son de particular valía en el estudio de sistemas de control para robots manipuladores; estas son descritas a continuación [47]:

Propiedad (I):

$$\begin{aligned} H(\theta) &= H(\theta)^T \\ \forall x, x^T H(\theta) x &> 0 \\ x &\in \mathfrak{R}^{n \times 1} \end{aligned} \quad (4.4)$$

En la propiedad I, se condiciona que la matriz de inercia juega un papel muy importante tanto en el modelado dinámico como en el diseño de controladores para robots [47]. En el primer caso, la matriz de inercia se encuentra relacionada con la energía cinética y en el segundo caso se emplean propiedades de esta, para el estudio de estabilidad de sistemas de control de robots. Una de sus propiedades de esta matriz es la mencionada anteriormente ecuación (4.4), donde la matriz $H(\theta)^{-1}$, existe y es definida positiva. El desarrollo de dicha propiedad se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} x^T H(\theta) x &= \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_1 H_{11} + x_2 H_{21} & x_1 H_{12} + x_2 H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \\ &= x_1 \{x_1 H_{11} + x_2 H_{21}\} + x_2 \{x_1 H_{12} + x_2 H_{22}\} \\ x^T H(\theta) x &= x_1^2 H_{11} + 2x_1 x_2 H_{12} + x_2^2 H_{22} > 0 \end{aligned}$$

En el desarrollo de esta propiedad, podemos comprobar que al multiplicar un vector x^T por la matriz de inercia podemos llegar a un resultado en el cual sabemos que nunca va a darnos un resultado negativo; es por eso que esta propiedad es llamada "propiedad simétrica definida positiva".

Propiedad (II):

$$\forall x | x \in \mathfrak{R}^{n \times 1} \quad x^T \left\{ \dot{H}(\theta) - 2C(\theta, \dot{\theta}) \right\} x \equiv 0 \quad (4.5)$$

La propiedad II, implica que las fuerzas ficticias en el sistema del robot no disipan energía, esta propiedad es vital para la demostración de estabilidad [47]. La matriz de Coriolis esta relacionada con la matriz de inercia por la

expresión anterior (4.5). A continuación podemos observar el desarrollo de dicha propiedad, donde sabemos que x es cualquier vector, por lo tanto, las derivadas de la matriz de inercia quedan:

$$\dot{H}_{11} = -2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 \quad (4.6)$$

$$\dot{H}_{12} = -m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 \quad (4.7)$$

$$\dot{H}_{21} = \dot{H}_{12} \quad (4.8)$$

$$\dot{H}_{22} = 0 \quad (4.9)$$

Al restar la derivada de la matriz de inercia con dos veces la matriz de coriolis tenemos:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 + 4m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 & -m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 + 2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 \\ -m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 + 2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

En la realización de estas operaciones de la matriz mencionada anteriormente, se le van a nombrar con la letra E donde su resultado es el siguiente:

$$E_{11} = 2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 \quad (4.10)$$

$$E_{12} = m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 \quad (4.11)$$

$$E_{21} = -\left(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right) m_2 l_1 l_2 s_2 \quad (4.12)$$

$$E_{22} = 0 \quad (4.13)$$

Por lo tanto, en la realización de las operaciones obtuvimos lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{aligned} x_1 \{x_1 E_{11} + x_2 E_{21}\} + x_2 \{x_1 E_{12} + x_2 E_{22}\} = \\ x_1^2 E_{11} + x_1 x_2 \{E_{21} + E_{12}\} + x_2^2 E_{22} \end{aligned} \quad (4.14)$$

donde la sumatoria de $E_{21} + E_{12}$, la nombraremos una gran E y esta es igual a:

$$E_{21} + E_{12} = m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 - 2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 = E = -2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2 \quad (4.15)$$

Nos podemos dar cuenta, de que el resultado de la propiedad es el correcto, ya que se llega a lo siguiente:

$$x^T \left\{ \dot{H}(\theta) - 2C(\theta, \dot{\theta}) \right\} x = x_1^2 E_{11} + x_1 x_2 (E) \equiv 0 \quad (4.16)$$

A esta propiedad se le llama antisimétrica ya que se puede comprobar que la derivada de la matriz de inercias menos dos veces la matriz de Coriolis debe de dar un resultado igual a 0.

Propiedad (III):

$$H(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) + F(\dot{\theta}) = YP \quad (4.17)$$

$$Y = Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (4.18)$$

$$P = P(m, l, I, b, k, LCG) \quad (4.19)$$

donde:

Y: regresor de elementos no lineales.

P: vector de parámetros.

En la propiedad III, de acuerdo con la ecuación (4.3), que es no lineal, es que puede expresarse en términos lineales de los parámetros dinámicos del robot. Esta característica es básica para el análisis de controladores adaptables [47].

Es importante saber que se tienen que cumplir las propiedades de la dinámica para saber su estabilidad o inestabilidad y manipulabilidad del robot. Para nuestro trabajo solo se comprobará matemáticamente, en simulación y experimentalmente la propiedad I y II, ya que estas dos bastan para darse cuenta si nuestro modelo dinámico obtenido es correcto.

4.2.4. Ecuación de Euler-Lagrange.

Para el modelado dinámico se emplea la metodología del Lagrangiano; también conocido como el método de Euler-Lagrange. Las ecuaciones de Euler-Lagrange, son un procedimiento para obtener las ecuaciones que describen el movimiento dinámico del sistema. Con este procedimiento tenemos un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias con respecto de las coordenadas generalizadas del sistema. La forma general de la ecuación de Euler-Lagrange está dada como [44]:

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\delta}{\delta \dot{\theta}} L - \frac{\delta}{\delta \theta} L \quad (4.20)$$

Los fenómenos tribológicos en sistemas electromecánicos son inevitables, tal es el caso de la fricción viscosa, que es dependiente de la velocidad. La tribología se deriva de la palabra griega tribos, "frotar o rozar". Es usado para la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación de superficies en contacto. Las tareas del especialista en tribología (tribólogo), son las de reducir la fricción y desgaste para conservar y reducir energía, lograr movimientos más rápidos y precisos, incrementar la productividad y reducir el mantenimiento [15]. La fricción viscosa es representada por la función $F(\dot{\theta}) = b\dot{\theta}$, donde b, es el coeficiente de fricción viscosa. Es por esto que la ecuación (4.21) de Euler-Lagrange modificada queda:

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\delta}{\delta \dot{\theta}} L - \frac{\delta}{\delta \theta} L + b\dot{\theta} \quad (4.21)$$

También se consideró la fricción seca o de Coulomb ecuación (4.22), donde k es el coeficiente de fricción:

$$F_c(\dot{\theta}) = k \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad (4.22)$$

De acuerdo con la ecuación (4.22), en la figura (4.3), podemos observar el comportamiento de la fricción de Coulomb, donde sus condiciones iniciales están dados por:

$$\operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \begin{cases} 1, \dot{\theta} > 0 \\ 0, \text{ind} \\ -1, \dot{\theta} < 0 \end{cases}$$

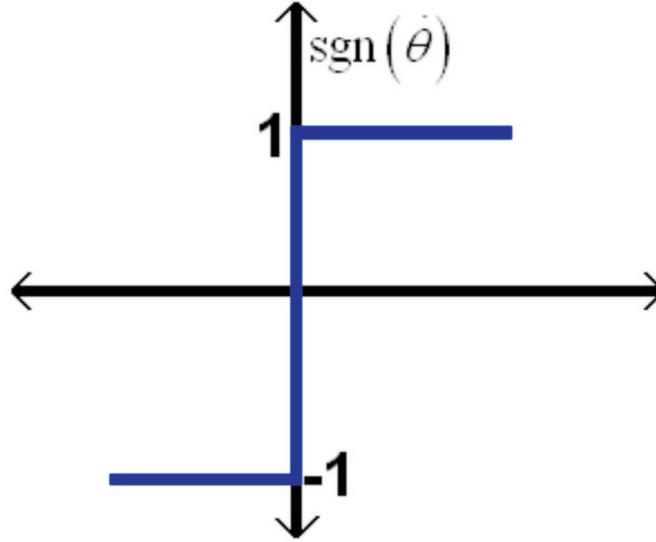


Figura 4.3: Gráfica de la fricción seca o de Coulomb.

Debido a que la función $\text{sgn}(\dot{\theta})$ es una función de saturación muy costosa computacionalmente, la comunidad de tribología ha realizado una aproximación con funciones trascendentes hiperbólicas. Se encontró una aproximación que dice:

$$\lim_{\beta \rightarrow \infty} \tanh(\beta \dot{\theta}) = \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (4.23)$$

Para su explicación, en la figura (4.3), pudimos observar la gráfica ideal para la fricción seca o de Coulomb, donde se muestra a la función $\text{sgn}(\dot{\theta})$ y la figura (4.4), se puede observar la aproximación de la fricción seca o de Coulomb con una función tangente hiperbólica encontrada por la comunidad de tribología.

En consecuencia, la ecuación Euler-Lagrange en términos de fricción viscosa y seca, es definida como:

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\delta}{\delta \dot{\theta}} L - \frac{\delta}{\delta \theta} L + b \dot{\theta} + k \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (4.24)$$

donde la ecuación Euler-Lagrange en términos de la aproximación con la función hiperbólica es:

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\delta}{\delta \dot{\theta}} L - \frac{\delta}{\delta \theta} L + b \dot{\theta} + k \tanh(\beta \dot{\theta}) \quad (4.25)$$

En la ecuación de Euler-Lagrange generalizada (4.25), para un robot manipulador de n grados de libertad la variable L nos representa el Lagrangiano [15].

La formulación Lagrangiana, describe el comportamiento de la dinámica de un robot en términos de trabajo hecho por energía almacenada en el sistema. El robot es tratado como una caja negra que tiene una energía balanceada. La

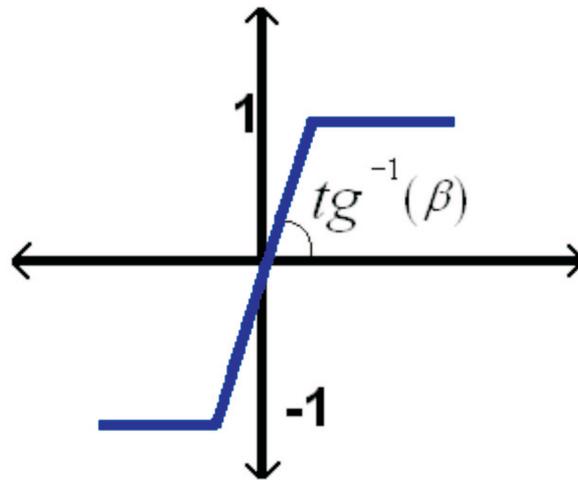


Figura 4.4: Aproximación de la fricción seca con una función hiperbólica.

fuerza de compulsión es eliminada durante la formulación de la ecuación. Como con la dinámica de Newton-Euler, la ecuación de forma cerrada puede ser derivada en algunos sistemas de coordenadas. Es por eso que la ecuación Lagrangiana esta descrita como [44]:

$$L = \sum_{i=0}^n (k_i - P_i) \quad (4.26)$$

donde:

L: Lagrangiano.

n: número de grados de libertad igual a dos.

k_i: energía cinética del i-ésimo eslabón (4.27).

$$k_i = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.27)$$

P_i: energía potencial del i-ésimo eslabón (4.28).

$$P_i = mgh \quad (4.28)$$

Como ya se dieron a conocer lo que significa cada una de las variables del Lagrangiano y, retomando que n es el número de grados de libertad y que la IH (R2SG) tiene dos grados de libertad, nuestra ecuación para el Lagrangiano queda:

$$L = k_1 + k_2 - P_1 - P_2 \quad (4.29)$$

4.2.5. Método para obtener el par de cada eslabón.

Como ya se mencionó anteriormente, la IH (R2SG) es de desempeño planar y en la figura (4.5), podemos analizar como se ve nuestra IH (R2SG) desde un punto de vista perpendicular y la razón por la cual se va a despreciar la gravedad.

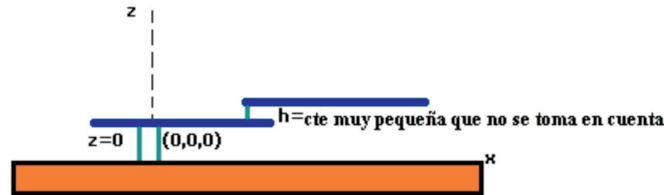


Figura 4.5: Vista perpendicular del robot de dos grados de libertad.

$$h_1 = 0 \quad p_1 = m_1 g h_1$$

$$h_2 = h \quad p_2 = m_2 g h$$

En la figura (4.6), podemos ver a la IH (R2SG) físicamente y se observa que los centros de masas se encuentran en las articulaciones y por lo tanto para el eslabón uno sus condiciones iniciales son iguales a cero y un soporte pequeño que tiene el eslabón dos hace que este tenga una altura pequeña, pero esta se va a despreciar por ser constante.

Los pasos para la obtención el par electromagnético son:

- Obtener el Lagrangiano.
- Obtener la derivada parcial con respecto $\dot{\theta}$ del Lagrangiano.
- Obtener la derivada con respecto del tiempo de la derivada parcial de $\dot{\theta}$ del Lagrangiano.
- Obtener la derivada parcial con respecto de θ del Lagrangiano.
- Se obtiene el par para cada eslabón.

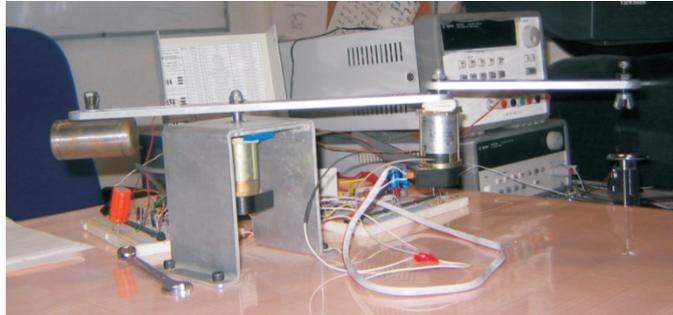


Figura 4.6: Vista física perpendicular del robot de dos grados de libertad.

Obtención del Lagrangiano para el eslabón uno.

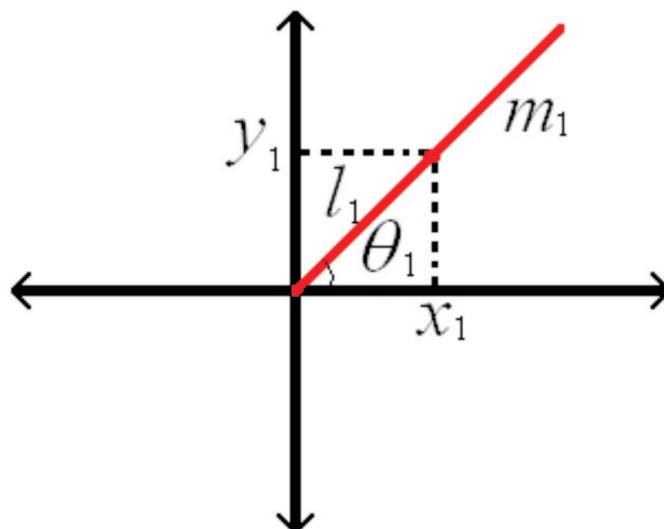


Figura 4.7: Variables a utilizar para el eslabón uno.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, en el estudio físico del robot, las medidas de las masas y las longitudes para el eslabon uno, fueron las siguientes: $m_1=0.81$ Kg y $l_1=0.17$ m.

El primer paso a realizar para la obtención del Lagrangiano para el eslabón uno figura(4.7), es obtener la energía cinética ecuación (4.27), por lo tanto nos podemos percatar de que la única variable que tenemos como incognita es v_1^2 y, esta variable va a ser igual a la sumatoria de las derivadas de las coordenadas operacionales del robot elevadas al cuadrado, ecuación (4.30).

$$v_1^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 \quad (4.30)$$

Para realizar esta ecuación nos basaremos en las ecuaciones de las coordenadas operacionales del modelo cinemático directo de posición obtenidas en el capítulo anterior donde, para el eslabón uno se tiene:

$$x_1 = l_1 c_1 \quad (4.31)$$

$$y_1 = l_1 s_1 \quad (4.32)$$

En la realización de las derivadas de las ecuaciones (4.31) y (4.32), se obtuvo el siguiente resultado:

$$\dot{x}_1 = \frac{d}{dt} x_1 = \frac{d}{dt} \{l_1 c_1\} = -l_1 s_1 \dot{\theta}_1 \quad (4.33)$$

$$\dot{y}_1 = \frac{d}{dt} y_1 = \frac{d}{dt} \{l_1 s_1\} = l_1 c_1 \dot{\theta}_1 \quad (4.34)$$

Enseguida, se prosiguió a realizar la sumatoria para posteriormente obtener la energía cinética:

$$v_1^2 = l_1^2 s_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_1^2 c_1^2 \dot{\theta}_1^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (4.35)$$

Retomando la ecuación (4.35), la energía cinética queda como:

$$k_1 = \frac{1}{2} m_1 \left(l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \right) \quad (4.36)$$

Como ya se habia mencionado anteriormente, para la obtención de la energía potencial del eslabón uno, esta sera igual a 0, ya que como se observa en la figura (4.5)y (4.6), el centro de masa para el eslabón uno se encuentra ubicado en una altura igual a 0, por lo tanto $P_1=0$.

Obtención del Lagrangiano para el eslabón dos.

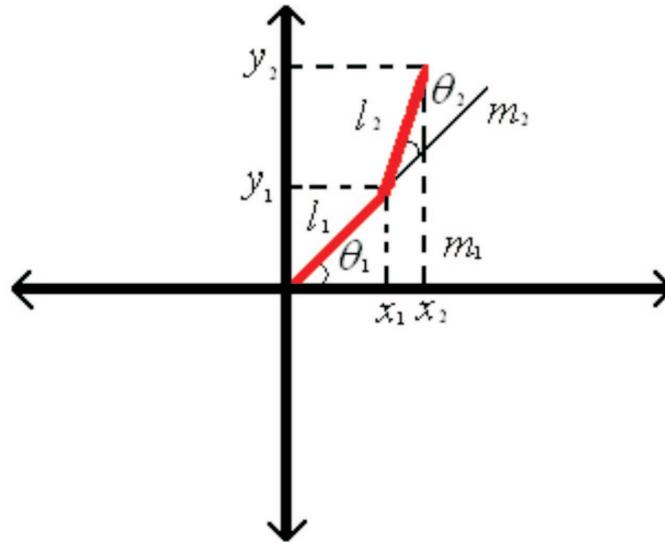


Figura 4.8: Variables a utilizar para el eslabón dos.

También se obtuvo las medidas de las masas y las longitudes para el eslabón dos, donde: $m_2=0.112$ Kg y $l_2=0.15$ m.

Para la obtención del Lagrangiano del eslabón dos, figura(4.8), se va a seguir el mismo paso que se siguió para el eslabón uno, que fué adquirir la energía cinética ecuación (4.27), donde ahora la variable a resolver es v_2^2 , esta incognita se resuelve de la misma forma que la ecuación (4.30).

Para la realización de esta ecuación, también nos basamos en las ecuaciones de las coordenadas operacionales del modelo cinemático directo de posición mencionadas en el capítulo anterior donde, para el eslabón dos se tiene:

$$x = l_1 c_1 + l_2 c_{12} = x_1 + l_2 c_{12} \quad (4.37)$$

$$y = l_1 s_1 + l_2 s_{12} = y_1 + l_2 s_{12} \quad (4.38)$$

El resultado de las derivadas de las ecuaciones (4.37) y (4.38) es el siguiente:

$$\dot{x} = \frac{d}{dt}x = \frac{d}{dt} \{l_1 c_1 + l_2 c_{12}\} = -l_1 s_1 \dot{\theta}_1 - l_2 s_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (4.39)$$

$$\dot{y} = \frac{d}{dt}y = \frac{d}{dt} \{l_1 s_1 + l_2 s_{12}\} = l_1 c_1 \dot{\theta}_1 + l_2 c_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (4.40)$$

El siguiente paso, es realizar la sumatoria para posteriormente obtener la energía cinética, como se realizó la operación para el eslabón uno:

$$v_2^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \{s_1^2 + c_1^2\} + 2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \{s_1 s_{12} + c_1 c_{12}\} + l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \{s_{12}^2 + c_{12}^2\} \quad (4.41)$$

como se puede observar $s_1 s_{12} + c_1 c_{12} = c_2$, esto es debido a una identidad trigonométrica, la cual se resuelve de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} s_1 s_{12} + c_1 c_{12} &= s_1 (s_1 c_2 + s_2 c_1) + c_1 (c_1 c_2 - s_1 s_2) \\ &= s_1^2 c_2 + s_1 s_2 c_1 + c_1^2 c_2 - s_1 s_2 c_1 \\ &= c_2 \{s_1^2 + c_1^2\} = c_2 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Por lo tanto, el resultado de la sumatoria de v_2^2 es:

$$v_2^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + 2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) c_2 + l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \quad (4.43)$$

y así se obtiene la energía cinética que queda como:

$$k_2 = 1/2 m_2 \left(\dot{\theta}_1^2 (l_1^2 + 2 l_1 l_2 c_2 + l_2^2) + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 (2 l_1 l_2 c_2 + 2 l_2^2) + \dot{\theta}_2^2 l_2^2 \right) \quad (4.44)$$

Para la obtención de la energía potencial del eslabon dos, se puede observar en la figura (4.5), una altura que es demasiado pequeña la cual se va a despreciar por ser esta una constante, por consiguiente para la energia potencial dos tenemos $P_2 = m_2 g h$ a h la llamaremos z_0 por lo que queda $P_2 = m_2 g z_0$.

De acuerdo a la ecuación (4.29), con los resultados de la energía cinética y potencial obtenidos para los eslabones uno y dos, el Lagrangiano queda de la forma:

$$L = 1/2 m_1 \left(l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \right) + 1/2 m_2 \left((l_1^2 + 2 l_1 l_2 c_2 + l_2^2) \dot{\theta}_1^2 + (2 l_1 l_2 c_2 + 2 l_2^2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + l_2^2 \dot{\theta}_2^2 \right) - m_2 g z_0 \quad (4.45)$$

Obtención del par electromagnético para el eslabón uno.

Para el análisis del par electromagnético, el primer paso a realizar es la obtención de la derivada parcial con respecto de $\dot{\theta}$ del Lagrangiano ecuación (4.46), para posteriormetente obtener la dervediada con respecto del tiempo de dicha derivada parcial obtenida ecuación (4.47).

$$\frac{\delta}{\delta \dot{\theta}_1} L_1 = m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 \left((l_1^2 + 2 l_1 l_2 c_2 + l_2^2) \dot{\theta}_1 + (l_1 l_2 c_2 + l_2^2) \dot{\theta}_2 \right) \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\delta}{\delta \dot{\theta}_1} L_1 &= ((m_1 + m_2) l_1^2 + 2 m_2 l_1 l_2 c_2 + m_2 l_2^2) \ddot{\theta}_1 + \\ & (m_2 l_1 l_2 c_2 + m_2 l_2^2) \ddot{\theta}_2 - 2 m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2^2 \end{aligned} \quad (4.47)$$

Por último se obtiene la derivada parcial con respecto de θ :

$$\frac{\delta}{\delta \theta_1} L_1 = 0 \quad (4.48)$$

la forma general para el par electromagnético del eslabón uno queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= ((m_1 + m_2) l_1^2 + 2 m_2 l_1 l_2 c_2 + m_2 l_2^2) \ddot{\theta}_1 + (m_2 l_1 l_2 c_2 + m_2 l_2^2) \ddot{\theta}_2 - \\ & 2 m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2^2 + b_1 \dot{\theta}_1 + k_1 \tanh(\beta_1 \dot{\theta}_1) \end{aligned} \quad (4.49)$$

Obtención del par electromagnético para el eslabón dos.

Igualmente que en el eslabón uno, el eslabón dos se obtuvo de la misma manera donde el primer paso a realizar es la obtención de la derivada parcial con respecto de $\dot{\theta}$ del Lagrangiano ecuación (4.50), para posteriormente obtener la derivada con respecto del tiempo de dicha derivada parcial obtenida ecuación (4.51).

$$\frac{\delta}{\delta \dot{\theta}_2} L_2 = m_2 (l_1 l_2 c_2 + l_2^2) \dot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2 \quad (4.50)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta}{\delta \dot{\theta}_2} L_2 = m_2 (l_1 l_2 c_2 + l_2^2) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad (4.51)$$

También como en el eslabón uno, por último se obtuvo la derivada parcial con respecto de θ :

$$\frac{\delta}{\delta \theta_2} L_2 = -m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (4.52)$$

La forma general para el par electromagnético del eslabón uno queda de la siguiente forma:

$$\tau_2 = m_2 (l_1 l_2 c_2 + l_2^2) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1^2 + b_2 \dot{\theta}_2 + k_2 \tanh(\beta_2 \dot{\theta}_2) \quad (4.53)$$

4.3. Simulaciones en matlab de la dinámica obtenida.

En las siguientes gráficas se puede observar las simulaciones realizadas, las cuales muestran las coordenadas generalizadas de los dos eslabones, las velocidades angulares de estos, el Lagrangiano obtenido, la comprobación de las propiedades I y II, el desempeño en el espacio de trabajo, su índice de manipulabilidad, y los torques obtenidos anteriormente, con el fin de comprobar que los resultados de la dinámica de nuestra IH (R2SG), son correctos.

El programa se simuló con una función seno por lo tanto en la gráfica (4.9), se puede observar el comportamiento de la coordenada generalizada q1, lo mismo es para la gráfica (4.10), donde también podemos observar el comportamiento de la coordenada operacional q2.

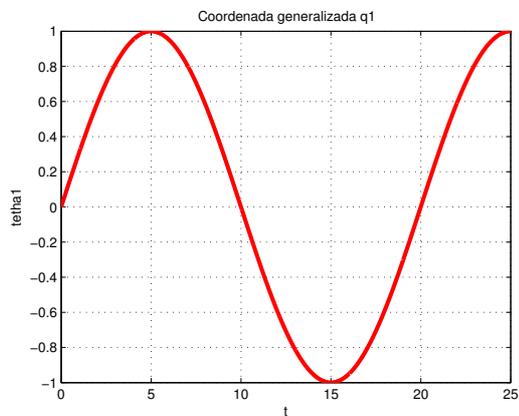


Figura 4.9: Simulación de la coordenada generalizada uno.

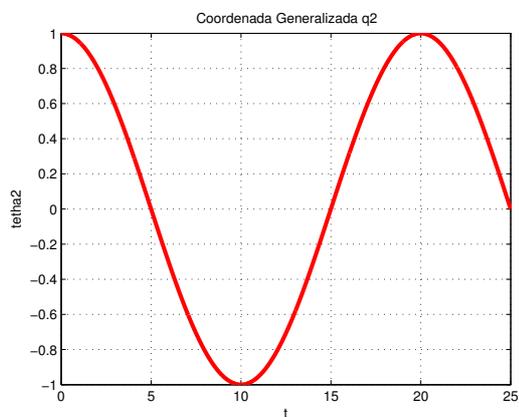


Figura 4.10: Simulación de la coordenada generalizada dos.

Como se explicó anteriormente, para tener el modelo dinámico, se adquirió el Lagrangiano, por lo tanto se tuvo primero que haber obtenido la energía cinética.

En las gráficas (4.11) y (4.12), podemos observar claramente las derivadas de las coordenadas operacionales, que demuestran las velocidades angulares para el eslabón uno y eslabón dos respectivamente que se aplicarán al Lagrangiano.

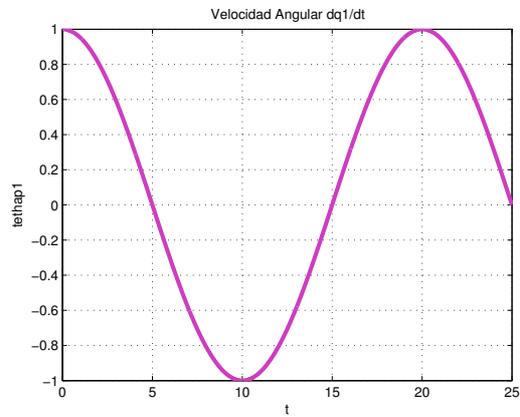


Figura 4.11: Resultado de la velocidad angular uno.

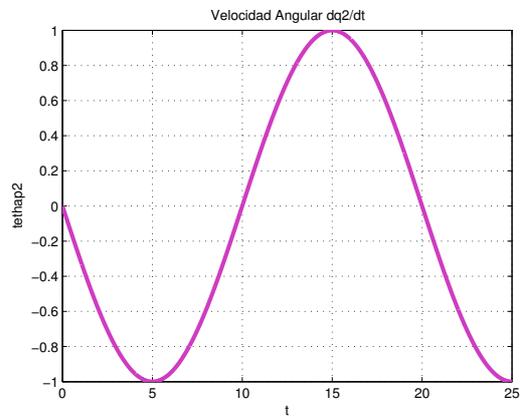


Figura 4.12: Resultado de la velocidad angular dos.

como se mencionó anteriormente, la formulación Lagrangiana describe el comportamiento de la dinámica de un robot y para este trabajo, la dinámica de la IH (R2SG), en términos de trabajo hecho por energía almacenada anteriormente por lo tanto, podemos observar que en la figura (4.13), el comportamiento de Lagrangiano ya que en el programa de simulación se metió una función seno y podemos ver con esta función, el comportamiento de la dinámica de la IH (R2SG) gracias al Lagrangiano.

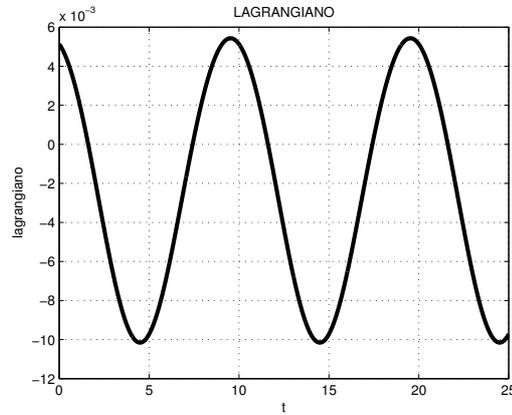


Figura 4.13: Resultado obtenido de la simulación del Lagrangiano.

Con respecto a la gráfica anterior (4.13), que muestra el comportamiento de la dinámica a través del Lagrangiano, en la realización del programa de simulación en matlab se obtuvieron dos gráficas.

La primera gráfica muestra el comportamiento de la IH (R2SG) durante 25 seg. dados en el programa, y se puede ver el desempeño de la IH (R2SG) en su espacio de trabajo (4.14).

En la segunda gráfica (4.15), tiene mucho de relación con la gráfica (4.14), pues muestra que tan manipulable es la IH (R2SG) y también se puede ver cuantas veces durante los 25 seg; esta toca el límite de su espacio de trabajo.

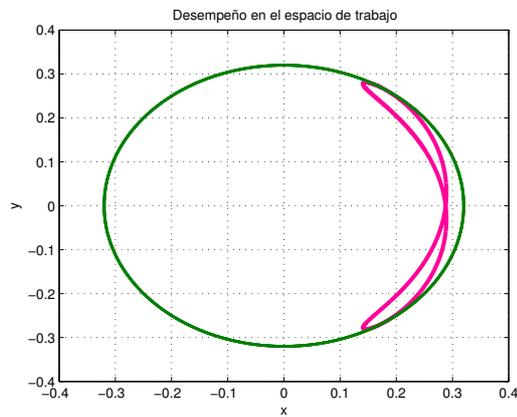


Figura 4.14: Espacio de trabajo en simulación de la dinámica.

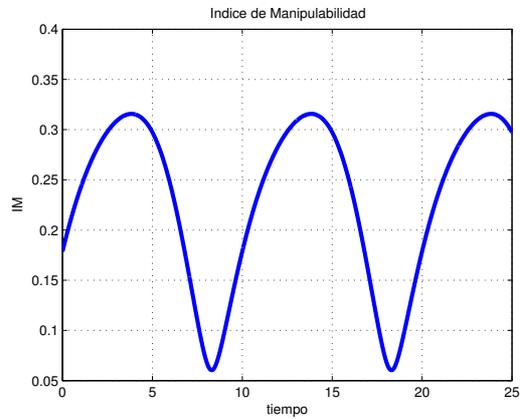


Figura 4.15: Índice de manipulabilidad.

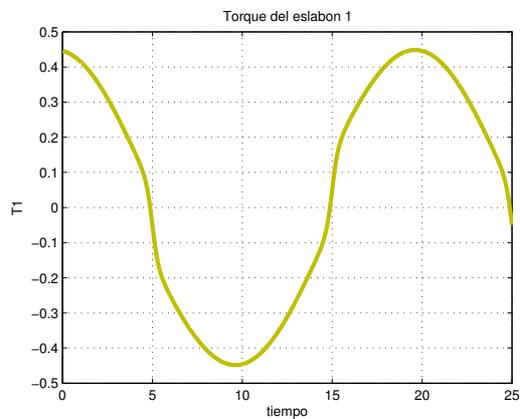


Figura 4.16: Par en simulación del eslabón uno.

Como se sabe, el motivo principal de la realización del programa de simulación en matlab, es comprobar que nuestros resultados matemáticos obtenidos son correctos. Hasta ahora todas las gráficas de simulación han sido satisfactorias.

En las gráficas (4.16) y (4.17), se puede mostrar el resultado de los pares uno y dos de los eslabones obtenidos al meter una entrada seno al programa.

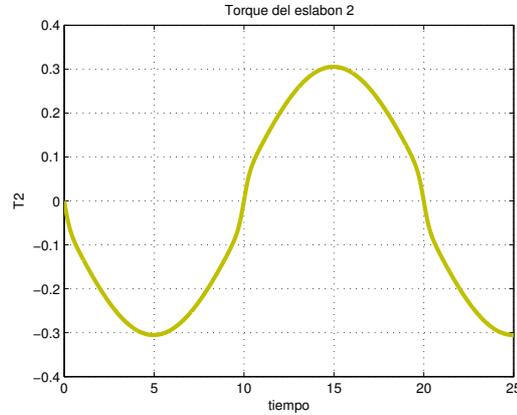


Figura 4.17: Par en simulación del eslabón dos.

Como se mencionó anteriormente, la realización de la simulación de la dinámica fue por varios motivos, otro de los cuales fue por la demostración de las propiedades físicas de la dinámica.

Se mencionó en el tema 4.2.3, que fue la explicación de las propiedades de la dinámica, que es importante saber que se tienen que cumplir las propiedades de la dinámica con el fin de saber su estabilidad o inestabilidad y su manipulabilidad de la IH (R2SG), se mencionó también, que se iba a comprobar no solo matemáticamente, si no también en simulación.

En la gráfica (4.18), se ve claramente la comprobación obtenida de la ecuacion (4.4):

$$H(\theta) = H(\theta)^T \quad (4.54)$$

y por lo tanto podemos dar cuenta de que es correcta y que cumple perfectamente la propiedad I llamada definida positiva.

En la gráfica (4.19), se puede observar lo mismo, ya que para la propiedad II ecuacion (4.5):

$$\forall x | x \in \mathfrak{R}^{n \times 1} \quad x^T \left\{ \dot{H}(\theta) - 2C(\theta, \dot{\theta}) \right\} x \equiv 0 \quad (4.55)$$

el resultado obtenido en simulación cumple perfectamente con la propiedad antisimétrica.

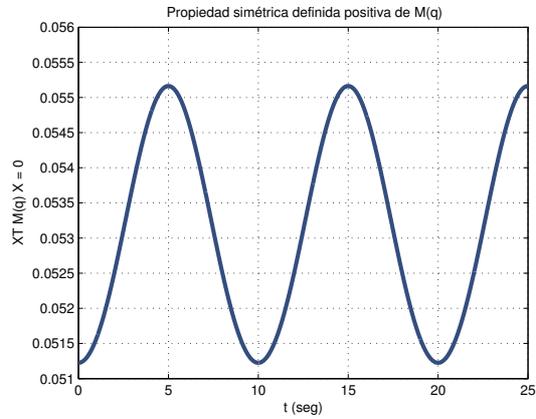


Figura 4.18: Propiedad simétrica definida positiva.

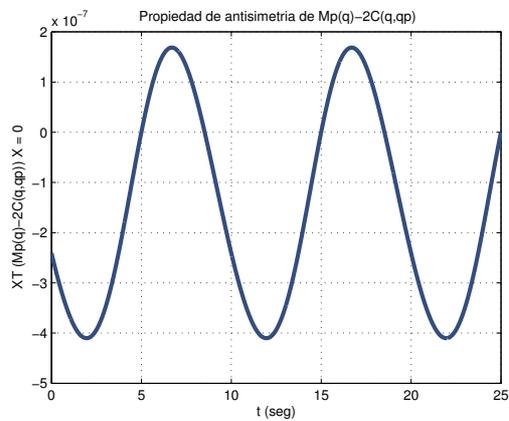


Figura 4.19: Propiedad antisimétrica.

4.4. Comprobación experimental de la dinámica de la interfaz háptica R2SG

Durante el análisis del modelo dinámico y de simulación, nos pudimos percatar que son correctos los resultados obtenidos por lo que se prosiguió a realizar experimentos de la dinámica en la plataforma planar, esto fue con el fin, de comprobar las propiedades de la dinámica. Ya que apartir de los valores de θ_{1} y θ_{2} , se obtienen los

resultados de los actuadores y se puede encontrar dichas propiedades.

Por lo tanto se aplicó la dinámica a la plataforma planar donde se obtuvieron las siguientes gráficas:

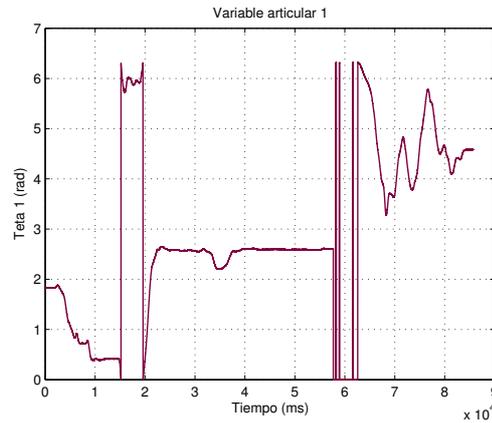


Figura 4.20: Coordenada generalizada uno.

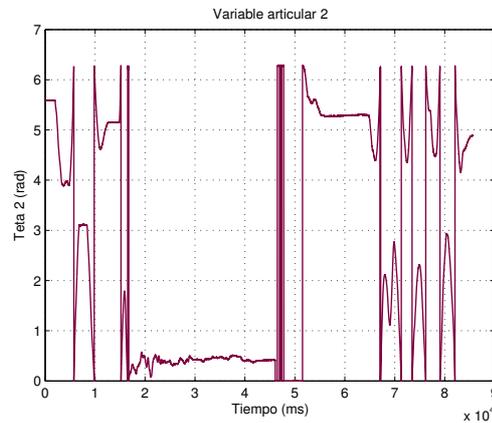


Figura 4.21: Coordenada generalizada dos.

Como se mencionó anteriormente, el programa se simuló con una función seno, ahora experimentalmente, se obtuvieron las gráficas con los datos guardados de la IH (R2SG) por lo que en la gráfica (4.20), se puede observar el comportamiento de la coordenada generalizada q_1 , lo mismo es para la gráfica (4.21), donde también podemos observar el comportamiento de la coordenada operacional q_2 .

También se mencionó que para la obtención de la energía cinemática, se tuvo primero que hacer un análisis de las coordenadas operacionales de la IH (R2SG) mencionadas en el capítulo anterior a lo que se llegó de conclusión que se tenía que obtener la derivada de dichas coordenadas, por lo tanto en las gráficas obtenidas (4.22) y (4.23) en el experimento hecho sobre la plataforma planar, podemos observar las derivadas de las coordenadas operacionales que demuestran las velocidades angulares para el eslabón uno y eslabón dos.

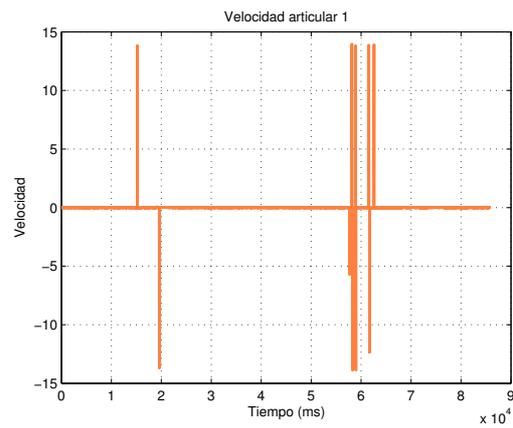


Figura 4.22: Velocidad angular uno.

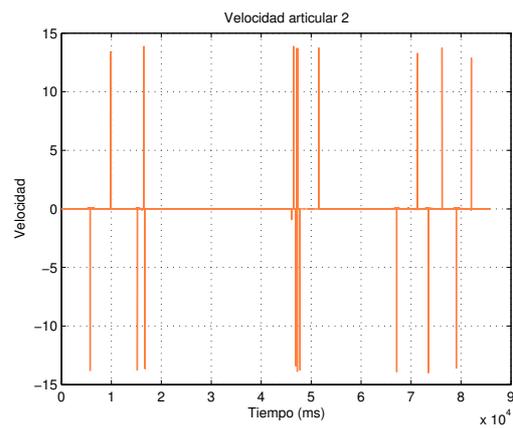


Figura 4.23: Velocidad angular dos.

Durante el experimento se presentó un fenómeno que fué interesante observar y, este fué el comportamiento de las coordenadas operacionales (x, y), durante realización del trabajo en la IH (R2SG), esto se puede observar claramente en las gráficas (4.24) y (4.25), donde se puede observar dicho comportamiento.

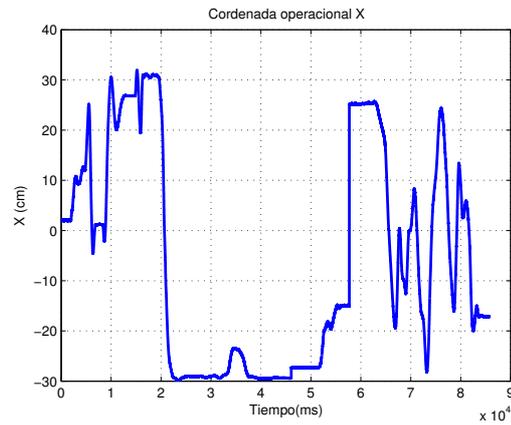


Figura 4.24: Coordenada operacional x.

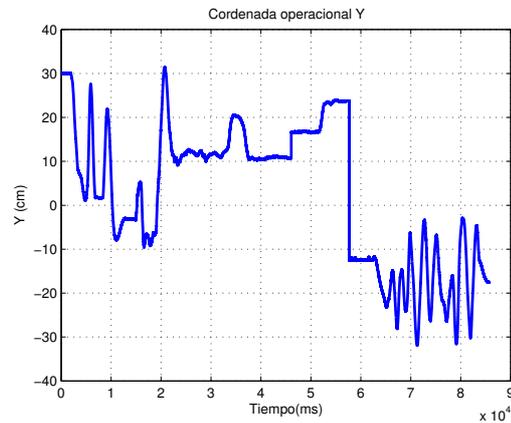


Figura 4.25: Coordenada operacional y.

En lo mencionado anteriormente, si fué interesante observar el comportamiento de las coordenadas operacionales, también durante el experimento fué de interés observar el comportamiento de las derivadas operacionales (x, y), durante la realización del trabajo en la IH (R2SG), donde en las siguientes gráficas (4.26) y (4.27), se puede observar dicho comportamiento al que se le llama velocidad operacional x y velocidad operacional y.

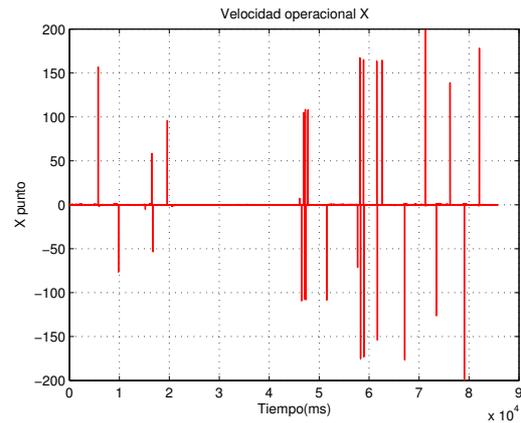


Figura 4.26: Velocidad operacional x.

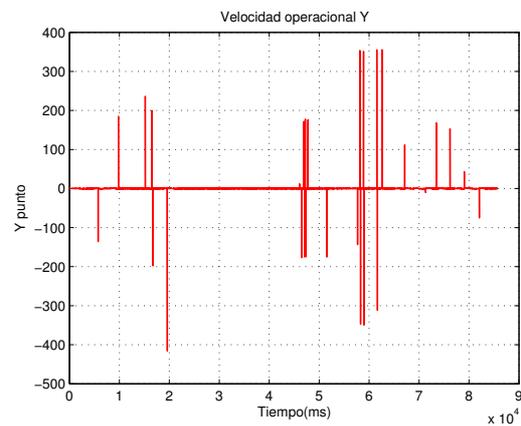


Figura 4.27: Velocidad operacional y.

Durante la realización de esta práctica, se movió al efector final durante 90 seg. por lo tanto en la siguiente gráfica (4.28), se muestra el comportamiento de la IH (R2SG) y se puede ver el desempeño de la plataforma planar en su espacio de trabajo.

En la gráfica (4.29), como se mencionó en el subtema de simulación, tiene mucho de relación con la gráfica (4.28), ya que muestra que tan manipulable es la IH (R2SG) y de igual manera se puede ver cuantas veces durante el tiempo en que se hizo la prueba, la plataforma planar toca el límite de su espacio de trabajo.

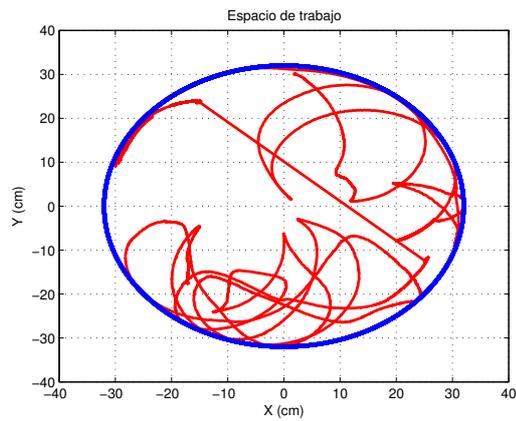


Figura 4.28: Espacio de trabajo de la IH (R2SG).

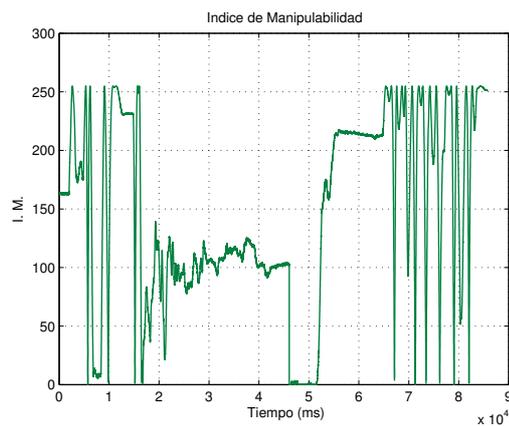


Figura 4.29: Índice de manipulabilidad de la IH (R2SG).

Como se mencionó en el tema 4.2.3, las propiedades de la dinámica son importantes obtenerlas ya que con estas se puede saber su manipulabilidad de la IH (R2SG) y se es estable o inestable.

En la figura (4.30), se ve claramente que la comprobación obtenida de:

$$H(\theta) = H(\theta)^T \quad (4.56)$$

y por lo tanto la propiedad I es correcta y que cumple perfectamente la simetría definida positiva.

En la figura (4.31), se puede observar lo mismo, ya que para la propiedad II:

$$\forall x | x \in \mathfrak{R}^{n \times 1} \quad x^T \left\{ \dot{H}(\theta) - 2C(\theta, \dot{\theta}) \right\} x \equiv 0 \quad (4.57)$$

el resultado obtenido en la práctica experimental cumple perfectamente con la propiedad antisimétrica.

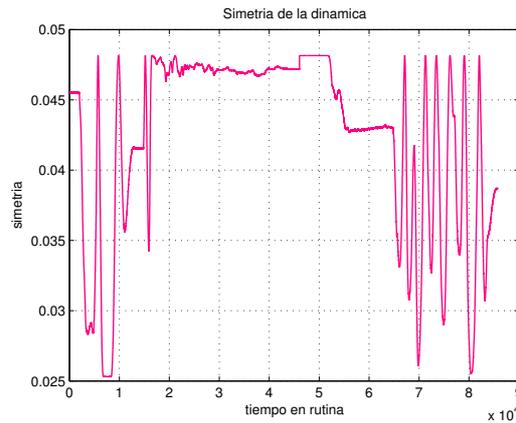


Figura 4.30: Propiedad simétrica definida positiva de la IH (R2SG).

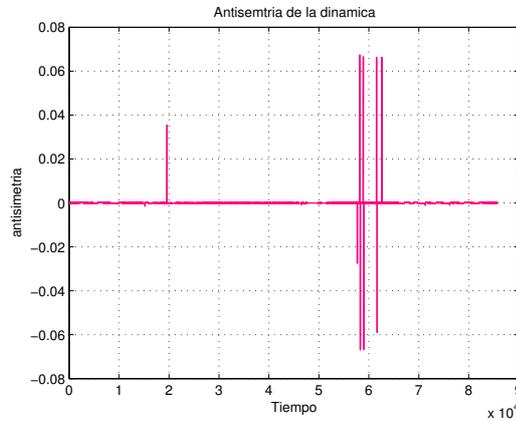


Figura 4.31: Propiedad antisimétrica de la IH (R2SG).

4.5. Conclusiones

En este capítulo se puede concluir que todos los resultados obtenidos del modelo dinámico son correctos desde los resultados del Lagrangiano hasta los pares o fuerzas obtenidos. Esto se pudo constatar mediante la comprobación experimental de las propiedades dinámicas de la IH definida como un robot manipulador, tal que las propiedades de la matriz de inercias y la propiedad de la matriz antisimétrica descrita en función de la derivada temporal de la matriz de inercias y la de fuerzas de Coriolis cumplieron con las condiciones de operación. La propiedad definida positiva de la matriz de inercia fue empleada para describir la manipulabilidad dinámica, situación que permite visualizar las regiones singulares cercanas a la base del robot y, que no pueden ser confirmadas con la manipulabilidad cinemática definida teórica y experimentalmente en el capítulo anterior.

La dinámica obtenida va a ser de gran importancia como se mencionó anteriormente pues, en ésta se van a aplicar los controles a utilizar para la trayectoria deseada que se quiera en el laberinto para la rehabilitación del paciente. En consecuencia el correcto resultado y su comprobación experimental es indispensable.

Capítulo 5

Control articular y cartesiano aplicado a la interfaz háptica R2SG

5.1. Introducción

En este tema se tratan las aplicaciones del control articular y cartesiano a la plataforma planar R2SG, en dos distintos casos de estudio, el seguimiento de una trayectoria denominada "rosa" definida por un sistema de ecuaciones y el seguimiento de una trayectoria denominada "laberinto" definida experimentalmente por la interfaz R2SG.

5.2. Generalidades del control de movimiento de robots manipuladores



Figura 5.1: Ejemplo de un robot manipulador [17].

Un robot manipulador multifuncional reprogramable, puede estar diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales mediante movimientos programados y variables que permiten realizar diversas tareas. Suele tener forma de brazo articulado, en cuyo extremo incorporan elementos de sujeción o herramientas. Realizan tareas repetitivas en industrias de automoción, fabricación mecánica o electrónica, en las que se emplean

para montar y mover piezas o componentes, ajustarlos, soldar, pintar, etcétera.

La estructura típica de un manipulador consiste en un brazo compuesto por elementos con articulaciones entre ellos. En el último enlace se coloca un órgano terminal o efector final tal como una pinza o un dispositivo especial para realizar operaciones. Se consideran, en primer lugar, las estructuras más utilizadas como brazo de un robot manipulador. Estas estructuras tienen diferentes propiedades en cuanto a espacio de trabajo y accesibilidad a posiciones determinadas.

El espacio de trabajo es el conjunto de puntos en los que puede situarse el efector final del manipulador. Corresponde al volumen encerrado por las superficies que determinan los puntos a los que accede el manipulador con su estructura totalmente extendida y totalmente plegada. Por otra parte, todos los puntos del espacio de trabajo no tienen la misma accesibilidad. Los puntos de accesibilidad mínima son los que las superficies que delimitan el espacio de trabajo ya que a ellos solo puede llegarse con una única orientación.

5.3. Antecedentes del control cartesiano

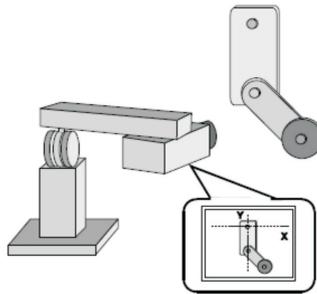


Figura 5.2: Configuración cámara fija [41].

Hoy en día, los robots operan en industrias en donde el ambiente de trabajo altamente estructurado contribuye a un buen desempeño de éstos. Por otro lado, los robots tienen un bajo impacto en aplicaciones donde el ambiente de trabajo y la colocación de objetos no puede ser completamente controlada, esto es debido a la capacidad limitada de los sensores utilizados para obtener información referente al entorno de trabajo. Los robots industriales actuales generalmente tienen la gran desventaja de no poder observar las tareas que realizan, además de requerirse tiempos de respuesta a puntos largos debido a la programación manual de las tareas a realizar. Es conocido que la capacidad de los sensores utilizados incrementan o disminuyen la versatilidad y el campo de aplicación de los robots. La visión es un sensor muy práctico ya que dentro de ciertos límites imita la visión humana y permite una medición del ambiente de trabajo sin un contacto directo con éste. Tradicionalmente, el uso de los sensores de visión y la manipulación del robot se combinan en un modelo de lazo abierto, esto es, la posición del objeto a manipular en el espacio de trabajo se obtiene a través del sistema de visión, posteriormente, una secuencia de movimientos es planeada y ejecutada. Este modelo es conocido como Look then Move (ver y después mover). Las desventajas de éste pueden resumirse en las desventajas de los esquemas en lazo abierto (sensibilidad a la incertidumbre paramétrica y a las perturbaciones). Una alternativa para mejorar el desempeño y exactitud de este tipo de subsistemas es utilizar retroalimentación visual [41].

Algunas de las ventajas de utilizar un control con retroalimentación visual, además de las que ofrece un esquema en lazo cerrado (son relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros

5.4. CONTROLADORES EMPLEADOS PARA GUIADO HÁPTICO LOCAL EN PLATAFORMA EXPERIMENTAL R2SG

del sistema) son que no se requiere un conocimiento a priori acerca de la posición del objeto a manipular en el espacio de trabajo del robot, no se necesita una rigurosa precisión en la manufactura de los mecanismos del robot debido a que se pueden compensar las deficiencias en éstos (tales como flexibilidades en las partes que lo componen) mediante la retroalimentación visual [12]. El uso de una o más cámaras en el sistema de visión para completar el lazo de retroalimentación es conocido como visual servoing. El término visual servoing fue introducido por Hill y Park [41] en 1979.

5.4. Controladores empleados para guiado háptico local en plataforma experimental R2SG

5.4.1. Control PID articular

Proposiciones:

donde (5.1) es la representación estandar del MCDV.

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (5.1)$$

por lo tanto haciendo un despeje de \dot{q} de la ecuación (5.1) se tiene

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{x} \quad (5.2)$$

Para estas proposiciones la ley de control es la siguiente:

$$\tau = kd(-\dot{q} + \dot{q}_r) \quad (5.3)$$

Donde las condiciones para que se cumpla esta ley de control son las que a continuación se mencionan

$$kd = k d^T ; x^T k dx > 0 : \text{ Simetrica y definida Positiva} \quad (5.4)$$

donde k_d es de $n \times n$ y es una matriz simétrica definida positiva.

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \alpha \Delta q - s(t_0) e^{-k(t-t_0)} - k_i \sigma : \text{ Referencia Nominal} \quad (5.5)$$

donde para encontrar el valor de \dot{q}_r , $\dot{\sigma}$ se define como

$$\dot{\sigma} = \text{sgn} \left(\Delta \dot{q} + \alpha \Delta q - s(t_0) e^{-k(t-t_0)} \right) \quad (5.6)$$

dado que

$$\Delta q = q - q_d \quad (5.7)$$

5.4.2. Control PID no lineal cartesiano

El control cartesiano emplea el sistema visual servoing ya que este hace uso de la información visual para controlar la posición del efector final de la interfaz, es decir para aplicar el control cartesiano se requiere la posición en x y y del órgano terminal de la interfaz.

El control PID no lineal cartesiano es empleado para guiado háptico en movimiento libre. Este control compensa la no linealidad de la dinámica en tiempo continuo con capacidad de seguimiento. Asume que las condiciones iniciales y el diseño de trayectorias se encuentran sin un espacio libre de singularidades.

Proposiciones:

$$x = Jq \quad (5.8)$$

Por lo tanto obteniendo la derivada de la ecuación (5.8), se tiene

$$\dot{x} = J^{-1}\dot{q} \quad (5.9)$$

donde:

$$J^{-1} = \frac{adj(J)}{\det(J)} \quad (5.10)$$

Ley de Control:

$$\tau = kd(-J^{-1}\dot{x} + \hat{J}^{-1}\dot{x}_r) \quad (5.11)$$

Condiciones:

$$kd = kd^T; x^T k dx > 0 : \text{SimetricaydefinidaPositiva} \quad (5.12)$$

donde \dot{x}_r , se define como

$$\dot{x}_r = \dot{x}_d - \alpha \Delta x + s(t_o)e^{-k(t-t_o)} - k_i \sigma \quad (5.13)$$

dado que

$$\dot{\sigma} = \text{sgn}(\Delta \dot{x} + \alpha \Delta x - s(t_o)e^{-k(t-t_o)}) \quad (5.14)$$

y

$$\Delta x = x - x_d \quad (5.15)$$

5.5. Resultados en simulación y experimentos

Las trayectorias "rosa" y "laberinto", ocupadas para aplicar el control PID articular y el control cartesiano, están definidas de la siguiente manera.

Rosa [45]:

La trayectoria de posición esta dada por:

$$x(t) = \rho(t) \cos(\varphi(t)) + h \quad (5.16)$$

$$y(t) = \rho(t) \sin(\varphi(t)) + k \quad (5.17)$$

$$\varphi(t) = \lambda(t) \quad (5.18)$$

$$\rho(t) = r \cos(n\varphi(t)) \quad (5.19)$$

donde:

$h=0.01$

$k=0.01$

$\lambda=1$

$r=.005;$

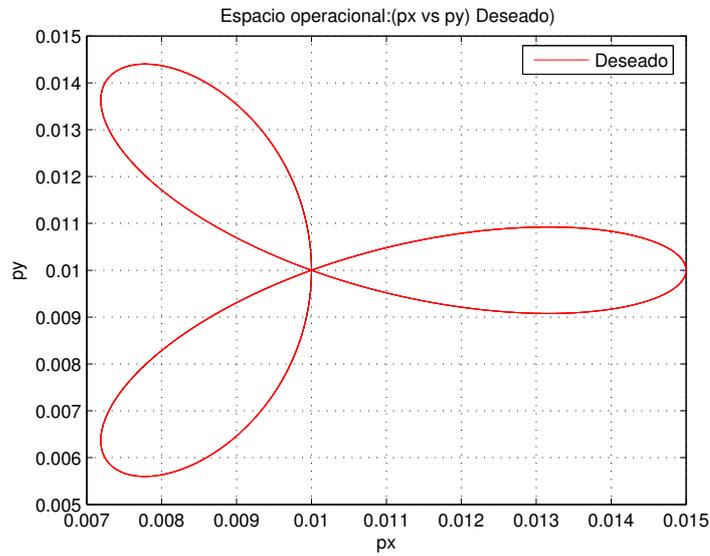


Figura 5.3: Trayectoria deseada: rosa.

El laberinto fue realizado en el programa de delphi como prueba de los tipos de laberintos que se pueden emplear para el objetivo final de este proyecto, aplicarlo en diagnósticos y rehabilitación de personas con enfermedades de tipo neurológico y neuropsicológico como se visualiza en la figura (5.4). Dentro de este laberinto se realizó una trayectoria con la plataforma de la interfaz háptica de tal forma que quedó como se ve en la figura (5.5), el cual nos genera un archivo *.mat donde se va guardando la información haciendo uso de la cinemática directa puesto que la interfaz nos proporciona los valores articulares, en este caso los datos utilizados son los valores o las posiciones de x y y para generar la trayectoria.

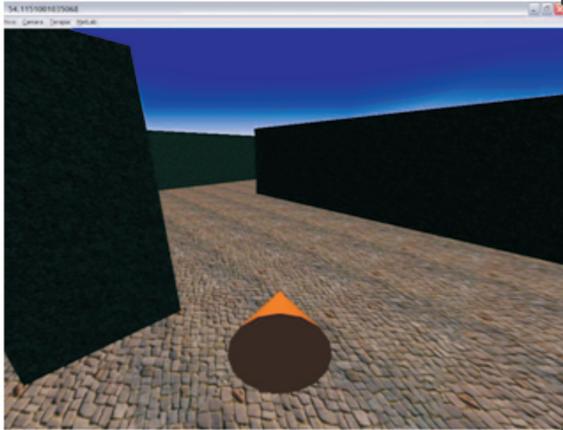


Figura 5.4: Visualización del laberinto en 3D.

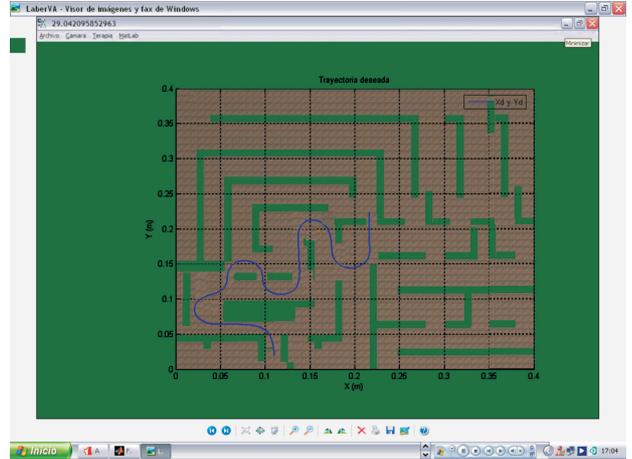


Figura 5.5: Trayectoria deseada generada dentro del laberinto realizado en delphi.

5.5.1. Control PID articular

De las curvas de respuesta del sistema R2SG sujeto a la trayectoria denominada "laberinto", específicamente se obtendrán gráficas de respuesta al control PID articular.

Observe que en las figuras (5.6) y (5.7), aparecen las coordenadas generalizadas o variables articulares (θ_1 y θ_2), que se generaron del laberinto realizado, además de la respuesta del sistema al control empleado.

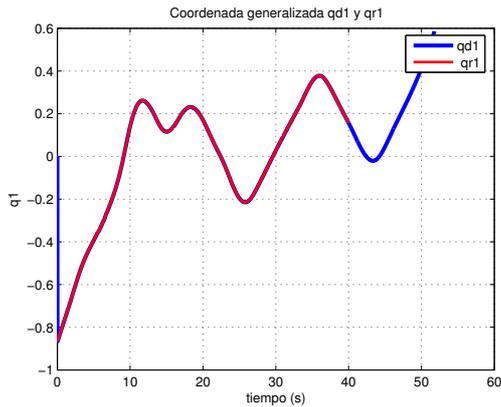


Figura 5.6: Coordenada generalizada real y deseada (θ_1) del laberinto.

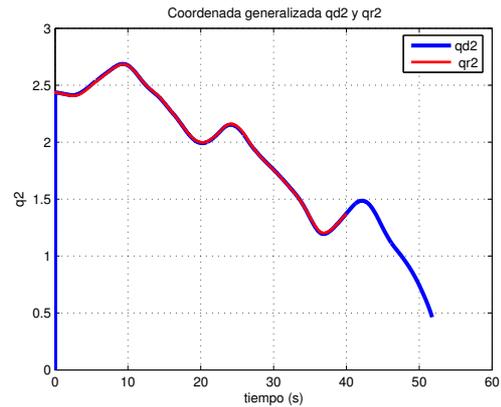


Figura 5.7: Coordenada generalizada real y deseada (θ_2) del laberinto.

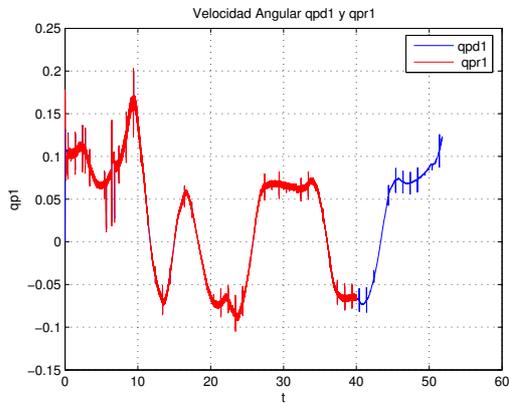


Figura 5.8: Velocidad angular deseada y real del eslabón 1 en el laberinto.

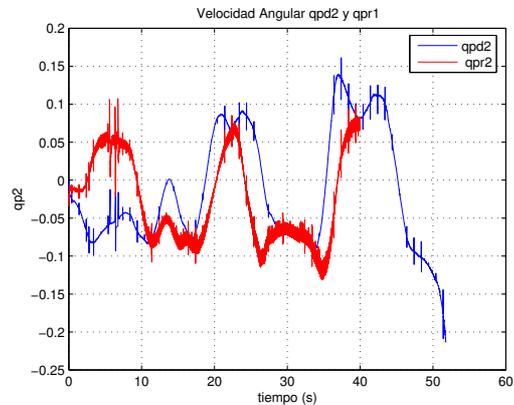


Figura 5.9: Velocidad angular deseada y real del eslabón 2 en el laberinto.

El desempeño en el plano x y y , se pueden ver en las imágenes (5.10) y (5.11), tanto de la trayectoria deseada como de la real.

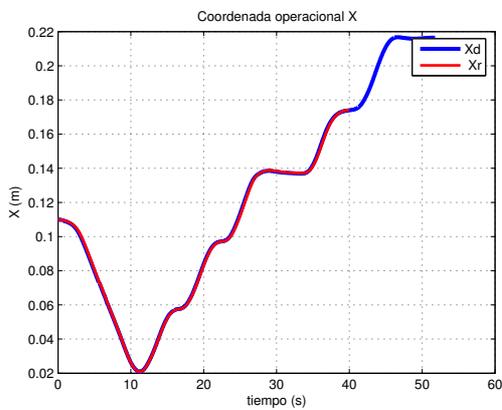


Figura 5.10: Coordenada operacional x deseada y real del efector final del laberinto.

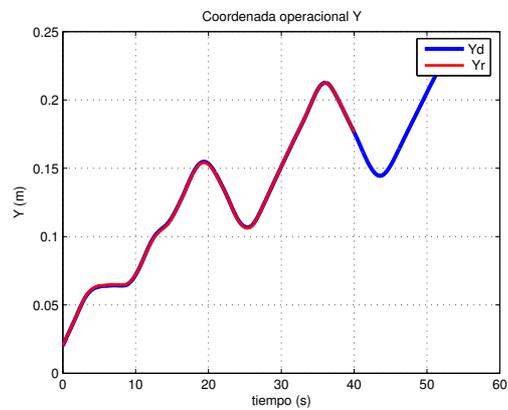


Figura 5.11: Coordenada operacional y deseada y real del efector final del laberinto.

Es importante resaltar que al aplicar el control PID articular, cada una de las variables como variables articulares, coordenadas operacionales, velocidades articulares y operacionales, hay un seguimiento en cada una de las trayectorias deseadas, el control permite que las respuestas sean las esperadas.

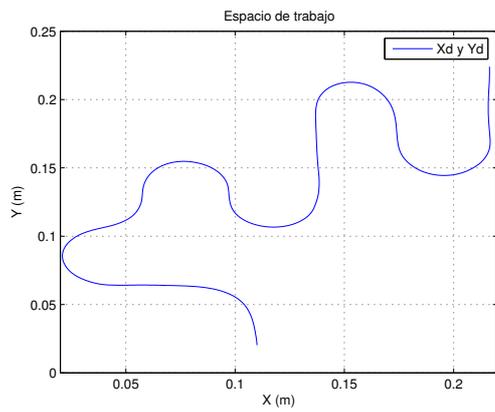


Figura 5.12: Prueba realizada en el laberinto.

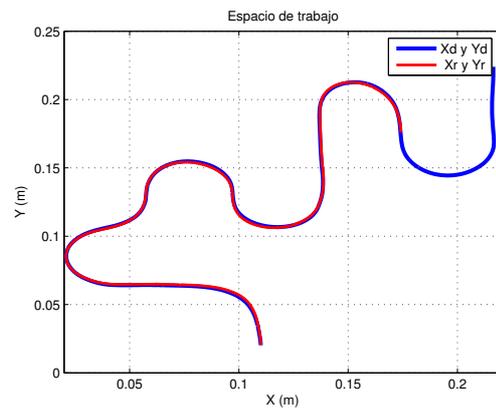


Figura 5.13: Curva obtenida aplicando el control.

5.5.2. Control PID no lineal cartesiano

Ahora examinemos el comportamiento del control PID no lineal cartesiano aplicado al sistema R2SG para una trayectoria denominada "rosa".

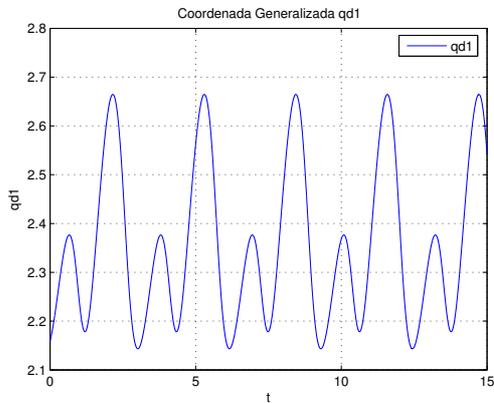


Figura 5.14: Coordenada generalizada q_1 deseada de la rosa

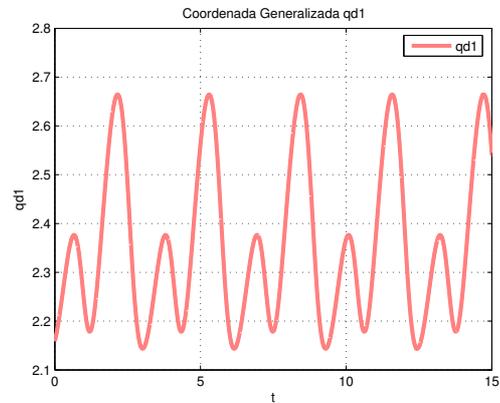


Figura 5.15: Coordenada Generalizada q_1 y q_{d1} real y deseada de la rosa

Considerando las figuras (5.14) y (5.15), se observa que las trayectorias deseadas y las señales obtenidas del sistema R2SG aplicándole el control cartesiano no convergen, al igual que en las curvas de respuesta de las gráficas (5.16) y (5.17). El error de estas se aprecia en la imagen (5.18) denotando que la señal de error es diferente de 0.

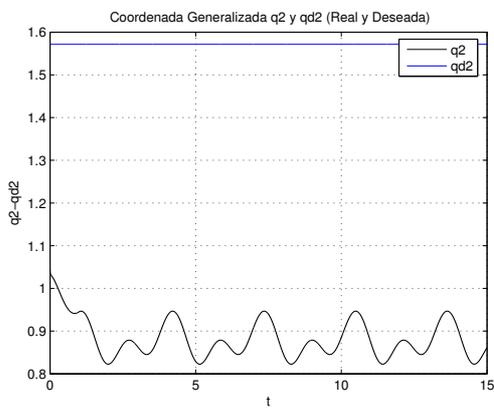


Figura 5.16: Coordenada Generalizada q_{d2} deseada de la rosa

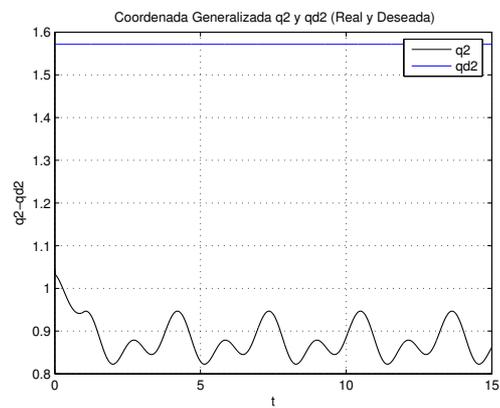


Figura 5.17: Coordenada Generalizada q_2 y q_{d2} (real y deseada) de la rosa

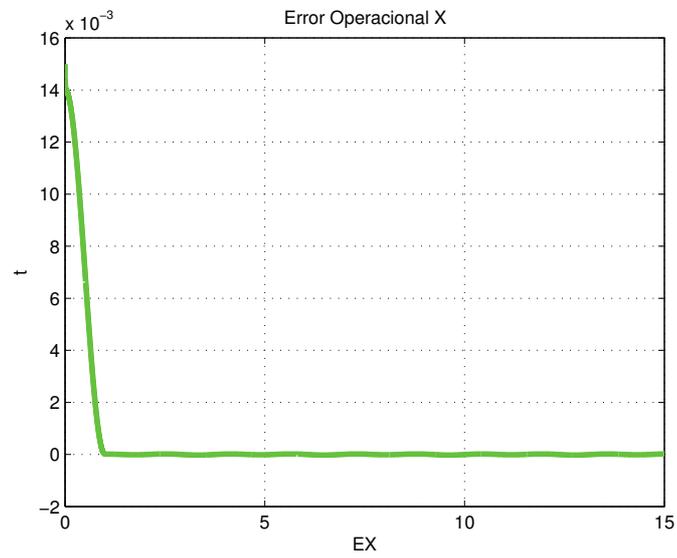


Figura 5.18: Errores articulares de la rosa.

Sin embargo si existe convergencia en las coordenadas operacionales de x y y como se puede analizar en las gráficas (5.19), (5.20), (5.21) y (5.22). Siendo el valor del error igual a 0 como se observa en la curva (5.23)

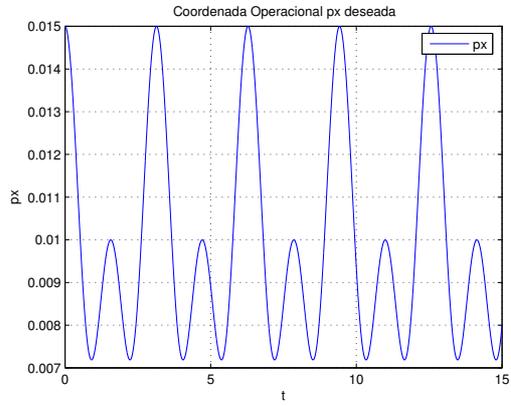


Figura 5.19: Coordenada Operacional px deseada de la rosa

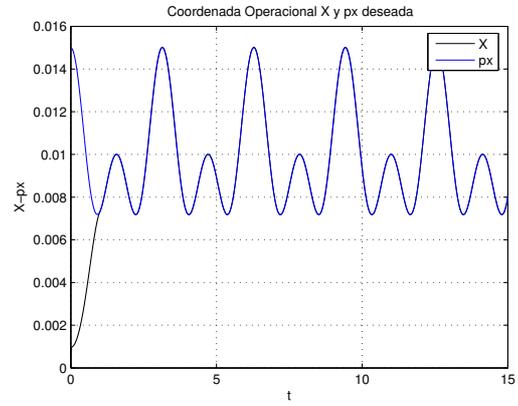


Figura 5.20: Coordenada Operacional X real y px deseada de la rosa

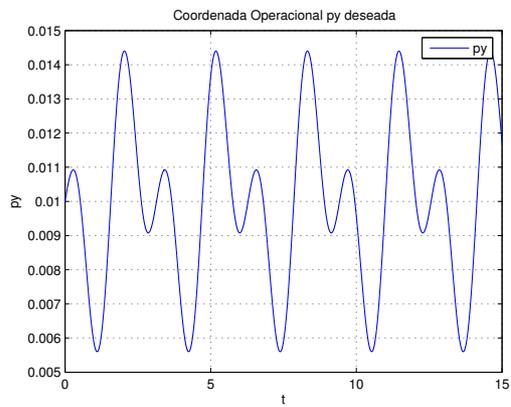


Figura 5.21: Coordenada Operacional py deseada de la rosa

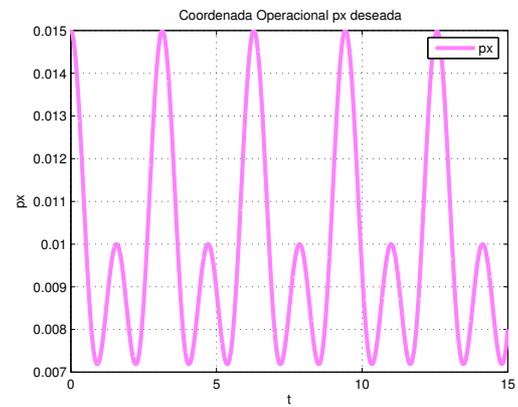


Figura 5.22: Coordenada Operacional Y real y py deseada de la rosa

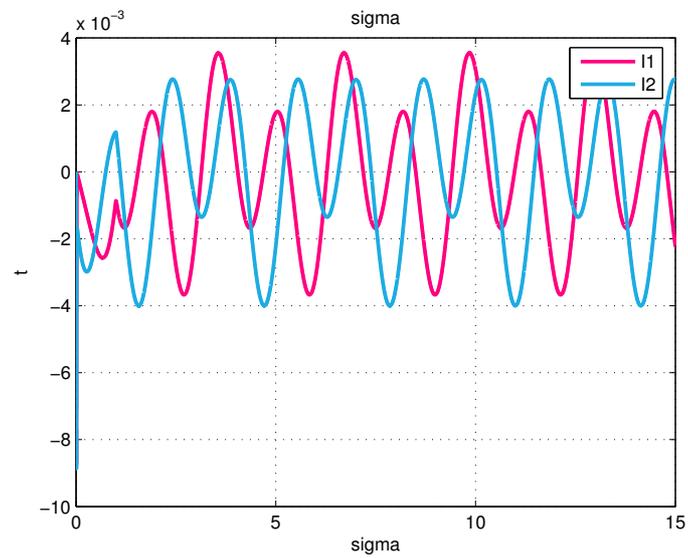


Figura 5.23: Errores Operacionales en X y Y de la rosa.

A pesar de la no convergencia en las variables articulares y la convergencia en las coordenadas operacionales, el control cartesiano es eficiente en el seguimiento de la curva deseada "rosa" siendo la referencia de esto, la figura (5.24), que analizando el desempeño del seguimiento se puede observar que la señal de error es 0.

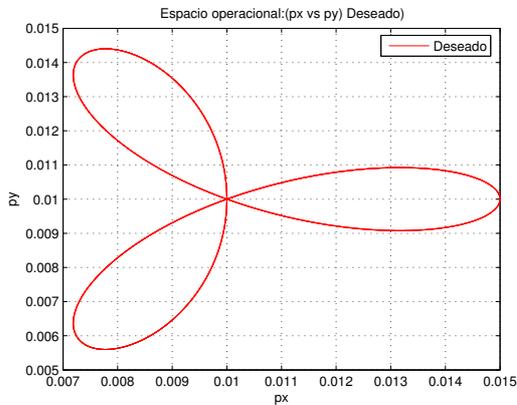


Figura 5.24: Espacio operacional px vs py deseado de la rosa

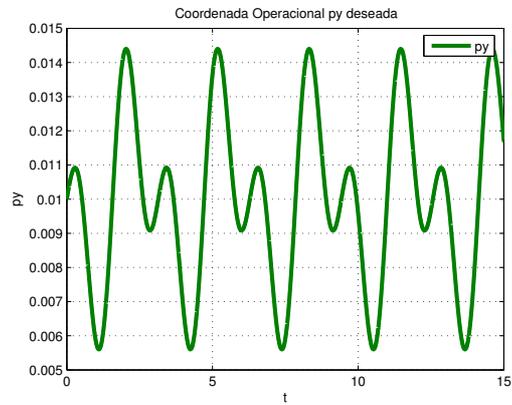


Figura 5.25: Espacio operacional: X vs Y real y px vs py deseado de la rosa

5.6. Conclusiones

De los resultados teórico-experimental obtenidos y presentados en este capítulo, podemos concluir que aún visto como un robot manipulador a una interfaz háptica es conveniente emplear un control cartesiano debido a que suprime el uso de la cinemática inversa para la planificación de las trayectorias en el espacio operacional y permite dicha planificación en tiempo real, y que para propósitos de la tarea definida por el médico, ésta queda descrita por la secuencia de coordenadas operacionales en el laberinto virtual, para que posteriormente el control pueda lograr el seguimiento perfecto con el paciente en el efector final del dispositivo háptico. Se propuso un control no lineal basado en modos deslizantes de segundo orden en el espacio operacional o del tipo cartesiano y se corroboró el resultado con el seguimiento de una trayectoria cerrada definida por las ecuaciones paramétricas de una rosa de tres pétalos.

Capítulo 6

Conclusiones, observaciones y perspectivas

En este trabajo de tesis se obtuvieron resultados significativos para resolver parcialmente el problema del proyecto de investigación "Diseño e Integración de una Intefaz Háptica con Propósitos de Diagnóstico y Rehabilitación Neurológica y Neuropsicológica" que se lleva acabo en el Centro de Investigación en Tecnologías de Información y Sistemas de esta casa de estudios. Los logros de este trabajo de investigación y desarrollo son la obtención y validación experimental de los modelos matemáticos del dispositivo háptico, la evaluación de una estrategia de control no lineal cartesiano con propósitos de guiado háptico local y cuyas perspectivas pueden ser en guiado háptico remoto, la conformación de una plataforma experimental para evaluar la posición y velocidad operacional de un paciente con discapacidades neuromotrices, y las bases para la tarea de rehabilitación mediante la acción de control propuesta. Este trabajo de investigación no fué tarea fácil, debido a que los conocimientos aquí descritos fueron relativamente nuevos al iniciar este proyecto, sin embargo los resultados permiten apreciar el avance significativo en las áreas de robótica, control clásico, control moderno, interfaces hápticas, realidad virtual y un campo aparentemente ajeno al nuestro, pero como área de aplicación de nuestras líneas profesionales, como lo son las neurociencias.

6.1. Perspectivas del trabajo

Este trabajo deja bases para el desarrollo de los siguientes trabajos dentro del proyecto mencionado en la sección anterior, y que son definidas a continuación,

- Implementación del guiado háptico local con el control cartesiano propuesto.
- Estudio comparativo con diferentes pacientes con discapacidades motrices.
- Implementación de un sistema experto con una base de conocimientos médica, con propósitos de diagnóstico.
- Estudio experimental de la interfaz háptica en correlación con la actividad eléctrica del cerebro, monitoreada mediante un electroencefalograma.

Capítulo 7

Acrónimos, glosario y apéndices

7.1. Lista de acrónimos

art articular.

c_1 coseno de θ_1 .

c_2 coseno de θ_2 .

EM Esclerosis múltiple.

exp experimento.

IH Interfaz háptica.

IM Índice de manipulabilidad.

L Lagrangeano.

l_1 Longitud del eslabón uno.

l_2 Longitud del eslabón dos.

LCG Longitud del centro de gravedad.

J Matriz Jacobiana.

MC Modelo cinemático .

MCDP Modelo cinemático directo de posición.

MCDV Modelo cinemático directo de velocidad.

MCDA Modelo cinemático directo de aceleración.

MCIP Modelo cinemático inverso de posición.

MCIV Modelo cinemático inverso de velocidad.

MCI A Modelo cinemático inverso de aceleración.

MD Modelo dinámico.

R2SG Robot de dos grados de libertad sin gravedad.

xp x punto.

xpp x dos puntos.

yp y punto.

ypp y dos puntos.

7.2. Glosario

- Aceleración angular:** cantidad que expresa el cambio de la velocidad angular con respecto al tiempo [30].
- Aceleración articular:** cantidad que expresa el cambio de la velocidad articular con respecto al tiempo [16].
- Aceleración operacional:** cantidad que expresa el cambio de la velocidad de cualquier coordenada x, y o z con respecto al tiempo.
- Actividad eléctrica cerebral:** una de las formas con que el cerebro expresa su función es mediante la actividad eléctrica. Esta actividad global se traduce por variaciones de potencial, unos rítmicos y constantes, otros transitorios [33]. -La actividad eléctrica espontánea, ritmo cerebral autónomo, que representa la pulsación sincrónica de millares de neuronas corticales. -La actividad eléctrica provocada por los mensajes sensitivos llegados de la periferia.
- Actuador:** es el dispositivo que proporciona la fuerza motriz real para las articulaciones de un robot. El actuador suele obtener su energía a partir de una de estas tres fuentes: aire comprimido, fluido por presión o electricidad; por lo que reciben el nombre de actuadores neumáticos, hidráulicos o eléctricos [24]. Los actuadores tales como los reles, solenoides, y motores, posibilitan que la computadora, controla la operación de los sistemas del vehículo.
- Articulación:** una articulación es la conexión que existe entre dos o más eslabones, la cual se encuentra en los nodos de los eslabones y permite algún movimiento o movimiento potencial, entre los eslabones conectados. Cada articulación provee al robot de al menos un "grado de libertad". En otras palabras, las articulaciones permiten al manipulador realizar movimientos .
- Ataxia:** trastorno caracterizado por la disminución de la capacidad de coordinar los movimientos.
- Cadena cinemática:** conjunto de elementos mecánicos que soportan la herramienta útil del robot (base, armadura, muñeca, etc).
- Centro de masa:** las fuerzas se distribuyen sobre una línea, un área o un volumen. Por lo común, no es muy difícil encontrar una resultante de estas fuerzas distribuidas. Para tener el mismo efecto esta resultante debe actuar sobre el centroide del cuerpo, el cual es un punto en el que se puede considerar que un sistema de fuerzas distribuidas está concentrado, con el mismo efecto que la fuerza distribuida [32].
- Cinemática:** parte de la mecánica, que estudia el movimiento prescindiendo de las fuerzas que lo producen.
- Codificador óptico:** aquel que cuenta el número de pulsos producido por un disco óptico giratorio y relaciona ese número con la cantidad de movimiento del eje [4].
- Cognición o Cognoscitivo:**(psicobiología); procesos más complejos del tratamiento de la información. Los procesos cognoscitivos se localizarían en las regiones corticales del sistema nervioso.
- Colisión:** choque o enfrentamiento de dos o más cuerpos [7].
- Control clásico:** hasta bien entrado el siglo XX, las únicas herramientas analíticas que poseía el especialista en control eran la utilización de ecuaciones diferenciales ordinarias junto con criterios algebraicos para determinar la posición de las raíces de la ecuación característica asociada. Aplicando el criterio de Routh y Hurwitz el ingeniero determinaba la estabilidad o no de los sistemas, pero para esto se debía obtener el modelo matemático operando mediante ecuaciones diferenciales. Esto suponía un arduo trabajo. Además hay que destacar que el criterio de Routh y Hurwitz, que no ofrece información de cómo mejorar la estabilidad del sistema. Desde el punto de vista teórico, la ingeniería de control se empieza a consolidar cuando se produce el traslado y aplicación de los conocimientos adquiridos en los problemas de amplificación de señales a los problemas de

control industrial. Estos estudios desembocan en la llamada teoría clásica de control, en la cual se utilizaban como herramientas matemáticas los métodos de transformación de Laplace y Fourier y la descripción externa de los sistemas [1].

Control moderno: a partir del año 1955, se desarrollan los métodos temporales, con el objetivo de solucionar los problemas planteados en aplicaciones aeroespaciales, estos métodos reciben un fuerte impulso con el desarrollo de las computadoras digitales, que constituían la plataforma tecnológica necesaria para su implantación, prueba y desarrollo [2]. Aparece un nuevo método de diseño de control, conocido a partir de entonces como teoría de control moderna. Se basaba en representar los sistemas en variables de estado o representación interna y trabajando casi exclusivamente en el dominio del tiempo.

Coordenada generalizada: por ejemplo una variable física, una variable de fase, una combinación de variables.

Coordenada operacional: es la ubicación o localización del efector final de un robot con respecto a una tarea especificada en el plano x-y-z.

Detección de contacto: cuando ocurre contacto (detección de colisiones), se sintetiza una fuerza de reacción que se manifiesta físicamente en el dispositivo háptico y que percibe kinestéticamente el paciente [15].

Dinámica: se denomina dinámica a la parte de la mecánica que estudia conjuntamente el movimiento y las fuerzas que lo originan [44].

Discapacidad motriz: cuando hablamos de trastornos o déficits motóricos nos referimos a personas que presentan problemas en la ejecución de sus movimientos, en su motricidad en general, independientemente de la causa desencadenante [23].

Discapacidad neurológica: es producida por enfermedades cerebrales, degenerativas y progresivas, que da como resultado la pérdida de la capacidad mental y el control físico en las personas [5].

Discapacidad neuropsicológica: afecta distintas regiones cerebrales y genera síndromes cognitivos (memoria (a corto o largo plazo), percepción (visual y/o auditiva), cálculo (operaciones matemáticas básicas y manejo numérico), atención (cambios en las respuestas de orientación, disminución en las formas dirigidas de atención y velocidad de respuesta), concentración (capacidad de mantenerse haciendo algo durante un periodo sostenido de tiempo) y conductuales diversos posterior daño cerebral) [34].

Efecto de coriolis: efecto debido al movimiento rotacional de la tierra, que se manifiesta en todo cuerpo en movimiento, de tal forma que lo desvía de su trayectoria recta. En el hemisferio norte la desviación ocurre hacia la derecha de la dirección del cuerpo y mientras que en el hemisferio sur la desviación es hacia la izquierda [22].

Energía cinética: es la energía que posee un cuerpo por razón de su movimiento [6].

Energía potencial: la que posee un cuerpo por el hecho de hallarse en un campo de fuerzas, se dice que esta en reposo [35].

Eslabón: el eslabón es un cuerpo rígido que posee por lo menos dos nodos, que son los puntos de unión con otros eslabones. Los eslabones se pueden nombrar de acuerdo al número de nodos que poseen, por ejemplo: Eslabón binario: Es el que contiene dos nodos. Eslabón ternario: Es el que contiene tres nodos. Eslabón cuaternario: Es el que contiene cuatro nodos.

Enfermedad de Parkinson: es una enfermedad neurológica que se asocia a rigidez muscular, dificultades para andar, temblor y alteraciones en la coordinación de movimientos.

Esclerosis múltiple: la esclerosis múltiple es una afección neurológica cuya causa no se conoce bien en la actualidad. Ataca la vaina de mielina que envuelve la fibra nerviosa que transmite los mensajes al cerebro y a la médula espinal. El paciente puede sufrir varios síntomas, a veces simultáneamente: fatiga, hormigueos, trastornos sensitivos, sordera, trastornos de equilibrio, neuritis óptica, nistagmus (movimientos rápidos e involuntarios de los ojos), trastornos en la voz, temblores no intencionados, rigideces o espaticidad, debilidad de los miembros y, en los casos más graves, parálisis de ellos o alteraciones en las funciones de la vejiga y de los intestinos.

Espacio de trabajo: es la zona donde el robot puede posicionarse sin causarle desgaste o esfuerzo al robot y esta limitada por las dimensiones físicas del manipulador.

Espacio singular: es la zona donde el robot no puede posicionarse por efecto de las dimensiones físicas del manipulador.

Fricción: la fricción aparece cuando dos superficies se frotan una en contra de la otra presentando desprendimiento de calor [20].

Fuerza centrífuga: es la fuerza que hace que un cuerpo sometido a un movimiento circular uniforme tiende a alejarse del centro de rotación es de igual fuerza y magnitud que la centrípeta pero de dirección contraria [36].

Fuerza centrípeta: es una fuerza hacia fuera para mantener el cuerpo en esa posición o en equilibrio.

Fuerza de coriolis: efecto debido al movimiento rotacional de la tierra, que se manifiesta en todo cuerpo en movimiento, de tal forma que lo desvía de su trayectoria recta.

Fuerza de fricción: fuerza aparente hacia el exterior experimentada por un cuerpo que gira alrededor de su eje.

Fuerza de gravedad: fuerza de atracción entre dos masas. La magnitud de esta fuerza es directamente proporcional al producto de ambas masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

Inercia: propiedad de un cuerpo que tiende a oponerse a toda variación en su estado de reposo o de movimiento.

Interfaz: conexión mecánica o eléctrica que permite el intercambio de información entre dos dispositivos o sistemas. Habitualmente se refiere al 'software' y 'hardware' necesarios para unir dos elementos de proceso en un sistema o bien para describir los estándares recomendados para realizar dichas interconexiones. También se conoce por su denominación inglesa: 'interface'.

Interfaz háptica: corresponde a un medio en el cual un humano interactúa con un ambiente de visualización virtual. El humano puede cambiar en cualquier momento al ambiente virtual y recibe señales como respuesta.

Jacobiano: es una matriz que se puede ver como la versión vectorial de la derivada de una función escalar. Es importante en el análisis y control de movimiento de un robot (planificación de trayectorias suaves, determinación de configuraciones singulares, ejecución de movimientos coordinados, derivación de ecuaciones dinámicas). Permite conocer las velocidades del extremo del robot a partir de los valores de las velocidades de cada articulación.

Kinestecia: sentido de orientación que te permite definir la orientación óptica, gustativa, táctil, olfativa y de coordinación.

Limite operacional: son las fronteras alrededor del espacio de trabajo del robot.

Longitud: dimensión que expresa el valor de una distancia.

Manipulabilidad: es la posibilidad de moverse libremente en todas las direcciones del espacio de trabajo.

- Manipulador:** es un mecanismo que usualmente consiste en una serie de eslabones articulados o desplazamiento relativo a otro eslabón, para agarrar y mover objetos, por lo regular tiene varios grados de libertad.
- Matriz:** conjunto de $m \times n$ números distribuidos en m filas y n columnas. Cada número se designa con dos índices: el primero señala el número de filas contadas de arriba a abajo, y el segundo de la columna contando de izquierda a derecha.
- Mecánica:** es la rama de la Física y de la ingeniería que se ocupa de las relaciones mutuas entre fuerza, materia y movimiento.
- Mecatrónica:** es la integración cinética de la ingeniería mecánica con la electrónica y con el control de computadores inteligentes para el diseño y la manufactura de productos y procesos.
- Modelo cinemático:** es el problema geométrico de calcular la posición y orientación del efector final de un robot, dados una serie de ángulos entre las articulaciones.
- Modelo dinámico:** estudio de la relación matemática entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo.
- Modelo matemático:** es simplemente una representación matemática de sistemas del mundo real. Este modelo se desarrolla a través de la aplicación, a los elementos de un sistema, de las reglas conocidas del comportamiento.
- Motilidad:** existe dos tipos de motilidad, la estática y la cinética. La primera corresponde al tono muscular, es decir la postura del todo o una de las partes del individuo y la segunda la que determina los movimientos propiamente dichos que origina los desplazamientos del cuerpo. Dentro de la motilidad cinética están la voluntaria y la involuntaria.
- Neurología:** rama de la medicina que estudia el sistema nervioso.
- Órgano terminal o efector final:** el efector final (griper) es un dispositivo que se une a la muñeca del brazo del robot con la finalidad de activarlo para la realización de una tarea específica. La razón por la que existen distintos tipos de efectores finales es precisamente, por las funciones que realizan. Los diversos tipos podemos dividirlos en dos grandes categorías: pinzas y herramientas.
- Par electromagnético:** es la fuerza aplicada para el movimiento del robot.
- Planificación de trayectorias:** es el diseño de tareas en un entorno sin intervención humana.
- Psicología:** parte de la filosofía, que trata del alma, sus facultades y operaciones. Ciencia de la vida mental.
- Robot:** es un dispositivo mecánico que realiza acciones basadas en movimientos. Sus acciones más comunes son moverse autonomicamente entre otras manipulaciones demasiado precisas, pesadas, repetitivas o riesgosas para el humano.
- Robot manipulador:** son esencialmente brazos articulados. De forma más precisa, un manipulador convencional es una cadena cinemática abierta formada por un conjunto de eslabones o elementos de la cadena interrelacionados mediante articulaciones o pares cinemáticos.
- Robot móvil:** estos están provistos de patas, ruedas u orugas que los capacitan para desplazarse de acuerdo a su programación. Elaboran la información que reciben a través de sus propios sistemas de sensores.
- Robot no redundante:** robot es no redundante cuando el número de columnas y de renglones, en la matriz Jacobiana, es igual. Es decir el número de grados de libertad corresponde al número de movimientos.

Robot redundante: un robot es redundante cuando el número de columnas es mayor que el de renglones en la matriz Jacobiana. Es decir, el número de grados de libertad es menor que el número de grados de movimiento.

Robótica: es uno de las tecnologías más cercanas a lo que es el núcleo de la bioingeniería del conocimiento. Se trata de una tecnología mecatrónica (mecánica más electrónica más cibernética) que diseña máquinas que realizan acciones que normalmente se hacen manualmente.

Servomotor: aparato mecánico gobernado por la rueda del timón y que a su vez acciona la caña del timón en los buques grandes.

Singularidad: puntos y zonas que no son admisibles dentro y fuera del espacio de trabajo respectivamente para el robot.

sistema de control: sistema diseñado para lograr que una o varias variables se comporten de una manera deseada. La variable puede mantenerse constante o cambiar de una manera determinada. Puede ser realimentado (feedback control) o prealimentado (feedforward control), digital (microprocesado) o analógico (por ejemplo, circuitos eléctricos, sistemas hidráulicos, sistemas mecánicos, etc.), manual o automático.

Tacto: uno de los sentidos mediante el cual el hombre y los animales aprecian sensaciones de contactolor, frío, aspereza, etc.

Tarea de un robot: es cualquier trayectoria que sigue el robot de forma repetitiva para realizar un objetivo. Es una rutina que ha sido programada con el fin de que el robot la realice cuando sea ejecutada.

Trayectoria óptima: es una trayectoria óptima, es decir, librando singularidades para que el robot no sufra de esfuerzos mecánicos.

Tribología: es el campo de la ciencia y tecnología que trata el problema del contacto entre superficies en movimiento relativo, es decir, fenómenos relacionados con la fricción y el desgaste.

Variable articular: conocida también como coordenada generalizada para robots cuyas articulaciones son de revolución y corresponde al ángulo entre los eslabones adyacentes.

Velocidad angular: razón del cambio del desplazamiento angular con el tiempo transcurrido [31].

Velocidad articular: es la relación entre las derivadas de las coordenadas articulares y el extremo final del robot.

Velocidad operacional: es la relación entre las derivadas de las coordenadas operacionales y el efector final del robot.

7.3. Apéndice A: programas de simulación en matlab

Programa de la cinemática en simulación de la interfaz háptica R2SG en matlab

```

clc
clear all
close all

t=0:0.1:10;

%Longitud de los eslabones
L1=17;
L2=15;

x=input('Introduzca el valor de x:');

y=input('Introduzca el valor de y:');

xpunto=input('Introduzca el valor de xpunto:');
ypunto=input('Introduzca el valor de ypunto:');
x2punto=input('Introduzca el valor de x2punto:');
y2punto=input('Introduzca el valor de y2punto:');

xvec=[x];
yvec=[y];
n=length(xvec)
for i=1:n
    Beta=atan2(yvec(i),xvec(i));

    Teta2=acos((xvec(i).^2+yvec(i).^2-(L1.^2+L2.^2))/(2*L1*L2));
    Phi=asin((L2*sin(Teta2))/(sqrt(xvec(i)^2+yvec(i)^2)));

    if
        Teta2<0
            Teta1=[Beta+Phi];
        else Teta2>0
            Teta1=[Beta-Phi];
        end

    J11=(-L1*sin(Teta1))-(L2*sin(Teta1+Teta2));
    J12=(-L2*sin(Teta1+Teta2));
    J21=(L1*cos(Teta1))+(L2*cos(Teta1+Teta2));
    J22=(L2*cos(Teta1+Teta2));

J=[J11 J12 ; J21 J22];

```

```

J_inversa=inv(J);

det=L1*L2*(sin(Teta1+Teta2)*cos(Teta1)-sin(Teta1)*cos(Teta1+Teta2));

Jr11=L2*cos(Teta1+Teta2)/det;
Jr12=L2*sin(Teta1+Teta2)/det;
Jr21=-((L1*cos(Teta1)+L2*cos(Teta1+Teta2)))/det;
Jr22=(-L1*sin(Teta1)-L2*sin(Teta1+Teta2))/det;

Jr_inversa=[Jr11 Jr12;Jr21 Jr22];

v=[x_punto(i);y_punto(i)];

%Velocidad

T_punto=Jr_inversa*v;

T1_punto=T_punto(1,1);
T2_punto=T_punto(2,1);

xy_punto=J*T_punto;

x_punto1(i)=xy_punto(1,1);
y_punto1(i)=xy_punto(2,1);

%Aceleración

Jp11=-L1*cos(Teta1)-L2*cos(Teta1+Teta2);
Jp12=-L2*cos(Teta1+Teta2);
Jp21=-L1*sin(Teta1)-L2*sin(Teta1+Teta2);
Jp22=-L2*sin(Teta1+Teta2);

Jp=[Jp11 Jp12;Jp21 Jp22];

v2=[x_2punto(i);y_2punto(i)];

T_2punto=Jr_inversa*(v2-(Jp*T_punto));

T1_2punto=T_2punto(1,1);
T2_2punto=T_2punto(2,1);

xy_2punto=(J*T_2punto)+(Jp*T_punto);

x_punto2(i)=xy_2punto(1,1);

```

```

y_punto2(i)=xy_2punto(2,1);

%Posición

Xmvec(i)=[L1*cos(Teta1)+L2*cos(Teta2+Teta1)];
Ymvec(i)=[L1*sin(Teta1)+L2*sin(Teta2+Teta1)];

```

```
end
```

Gráfica en el espacio de trabajo

```

figure(1)

plot(t,xvec)
title('Coordenada Operacional x');
xlabel('tiempo');
ylabel('x');
legend('x deseada','++ x obtenida');
hold on
plot(t,Xmvec,'r+')
grid on

figure(2)

plot(t,yvec)
title('Coordenada Operacional y');
xlabel('tiempo');
ylabel('y');
legend('y deseada','++ y obtenida');
hold on
plot(t,Ymvec,'r+')
grid on

figure(3)
plot(xvec,yvec)
title('Espacio de trabajo x vs y');
xlabel('x');
ylabel('y');
legend('x y deseada','++ x y obtenida');
hold on
plot(Xmvec,Ymvec,'r+')
grid on

figure(4)
plot(t,x_punto)
title('Velocidad de la componente x');
xlabel('tiempo');

```

```
ylabel('velocidad');
legend('Velocidad deseada','++ velocidad obtenida');
hold on
plot(t,real(x_punto1),'r+')
grid on
```

```
figure(5)
plot(t,y_punto)
title('Velocidad de la componente y');
xlabel('tiempo');
ylabel('Velocidad');
legend('Velocidad deseada','++ Velocidad obtenida');
hold on
plot(t,y_punto1,'r+')
grid on
```

```
figure(6)
plot(x_punto,y_punto)
title('Velocidad x vs y');
xlabel('Velocidad x');
ylabel('Velocidad y');
legend('Velocidad x vs y deseada','++ Velocidad x vs y obtenida');
hold on
plot(x_punto1,y_punto1,'r+')
grid on
```

```
figure(7)
plot(t,x_2punto)
title('Aceleracion de la componentex');
xlabel('tiempo');
ylabel('Aceleracion x');
legend('Aceleracion x deseada','++ Aceleracion x obtenida');
hold on
plot(t,real(x_punto2),'r+')
grid on
```

```
figure(8)
plot(t,y_2punto)
title('Aceleracion de la componente y');
xlabel('tiempo');
ylabel('Aceleracion de la componente y');
legend('Aceleracion y deseada','Aceleracion obtenida');
hold on
plot(t,y_punto2,'r+')
grid on
```

```
figure(9)
plot(x_2punto,y_2punto)
```

```

title('Aceleracion x vs y');
xlabel('Aceleracion x');
ylabel('Aceleracion y');
legend('Aceleracion x vs y deseada','Aceleracion obtenida');
hold on
plot(x_punto2,y_punto2,'r+')
grid on

```

Programa de dinámica en simulación de la interfaz háptica R2SG en matlab

Elaboro : Areli Saray Aviña Grimaldo
 Asesor : Omar Arturo Domínguez Ramírez

```

clear all
close all
clc
t=0:0.01:15;
m1=0.81; % masas de los eslabones
m2=0.112;
l1=0.17; % longitud de los eslabones
l2=0.15;
h1=0; % longitud al centro de masas
h2=0.01; % altura del centro de masas dos, debido al
desnivel del eslabón 2 con respecto al 1
g=9.81; % Coeficiente de gravitación

% Fricción Seca o Coulomb
k1=0.1;
k2=0.05;
beta=10; % k*tanh(beta*x')

% Fricción Viscosa
b1=0.35;
b2=0.25;

% Posición deseada

tet=0.1*pi*t;
x1=sin(tet);
x3=cos(tet);
x2=cos(tet);
x4=-sin(tet);
x5=-sin(tet);
x6=-cos(tet);

% Variables Articulares y Derivadas

```

```

q=[x1;x3];
qp=[x2;x4];

% Matriz de Inercia

H11=(m1+m2)*l1.^2+m2*(2*l1*l2*cos(x3)+l2);
H12=m2*(l1*l2*cos(x3)+l2.^2);
H21=m2*(l1*l2*cos(x3)+l2.^2);
H22=m2*l2.^2;

%Vector de Fuerzas de Coriolis y de Fuerzas Centripetas
C11=-2*m2*l1*l2*sin(x3).*x4;
C12=-m2*l1*l2*sin(x3).*x4;
C21=m2*l1*l2*sin(x3).*x2;
C22=0;

%Matriz de Gravedad
G1=0;
G2=0;

%Matriz de Fricción Viscosa y Seca
Fr1=b1x2+k1tanh(betax2);
Fr2=b2x4+k2tanh(betax4);

%Obtencion del Lagrangiano
L=((1/2)*m1*(l1^2*x2.^2))+((1/2)*m2*((l1^2+(2*l1*l2*cos(x3))+l2^2).*x2.^2+((2*l1*l2*cos(x3))
+(2*l2^2)).*x2.*x4+(l2^2*x4.^2)))-(m2*g*h2);

% Vector para comprobacion de propiedades
x11=1;
x21=0.5;

xv=[x11;x21];

% Propiedad de la matriz de inercia definida positiva
xthx=x11*(x11*H11+x21*H21)+x21*(x11*H12+x21*H22);

%Propiedad de la Matriz Antisimétrica P'*(DH-2C)*P=0

%Derivada de la Matriz de Inercia

DH11=-m2*(2*l1*l2*sin(x3).*x4);
DH12=-m2*(l1*l2*sin(x3).*x4);
DH21=-m2*(l1*l2*sin(x3).*x4);
DH22=0;

% MA=DH-2C

```

```

MA11=DH11-(2*C11);
MA12=DH12-(2*C12);
MA21=DH21-(2*C21);
MA22=DH22-(2*C22);

% Propiedad de la matriz antisimétrica
xtnx=x11*(x11*MA11+x21*MA21)+x21*(x11*MA12+x21*MA22);

% Modelo cinematico directo de posición
x=l1*cos(x1)+l2*cos(x1+x3);
y=l1*sin(x1)+l2*sin(x1+x3);

% Espacio de trabajo
Xws=(l1+l2)*cos(t);
Yws=(l1+l2)*sin(t);

% Jacobiano
J11=-l1*sin(x1)-l2*sin(x1+x3);
J12=-l2*sin(x1+x3);
J21=l1*cos(x1)-l2*cos(x1+x3);
J22=l2*cos(x1+x3);

%Índice de manipulabilidad
M11=J11.^2+J12.^2;
M12=J11.*J21+J12.*J22;
M21=M12;
M22=J21.^2+J22.^2;

n=length(M11)

JJt=[M11 M12;M21 M22];
for i=1:n
    JJT(i)=det(JJt(1,i));
    IM(i)=sqrt(JJT(1,i));
end

%Torque
T1=H11.*x5+H12.*x6+C11.*x2+C12.*x4+Fr1;
T2=H21.*x5+H22.*x6+C21.*x2+C22.*x4+Fr2;

figure(1)

plot(t,x1,'b');
title('Coordenada generalizada q1');
xlabel('t');
ylabel('tetha1');
grid

```

```
figure(2)
plot(t,x3,'b');
title('Coordenada Generalizada q2');
xlabel('t');
ylabel('tetha2');
grid
```

```
figure(3)
plot(t,x2,'b');
title('Velocidad Angular dq1/dt');
xlabel('t');
ylabel('tethap1');
grid
```

```
figure(4)
plot(t,x4,'b');
title('Velocidad Angular dq2/dt');
xlabel('t');
ylabel('tethap2');
grid
```

```
figure(5)
plot(t,L,'b');
title('LAGRANGIANO');
xlabel('t');
ylabel('lagrangiano');
grid
```

```
figure (6)
plot(t,xthx,'b')
title('Propiedad de positiva definida de M(q)');
xlabel('t(seg)');
ylabel('XT M(q) X = 0');
grid
```

```
figure (7)
plot(t,0.0001*xtnx,'b')
title('Propiedad de antisimetría de Mp(q)-2C(q,qp)');
xlabel('t(seg)');
ylabel('XT (Mp(q)-2C(q,qp)) X = 0');
grid
```

```
figure (8)
plot(x,y,'b',Xws,Yws,'r')
title('Desempeño en el espacio de trabajo');
xlabel('x');
ylabel('y');
grid
```

```

figure (9)
plot(t,IM,'b')
title('Índice de Manipulabilidad');
xlabel('tiempo');
ylabel('IM');
grid

```

```

figure (10)
plot(t,T1,'b')
title('Torque del eslabón 1');
xlabel('tiempo');
ylabel('T1');
grid

```

```

figure (11)
plot(t,T2,'b')
title('Torque del eslabón 2');
xlabel('tiempo');
ylabel('T2');
grid

```

Programa para la comprobación experimental de la cinemática de la interfaz háptica R2SG utilizando el programa Delphi

```

//Cara Derecha
glColor3f(0,1,1); glVertex3f(ancho, 0, largo);
glColor3f(1,0,0); glVertex3f(ancho, alto, largo);
glColor3f(1,1,0); glVertex3f(ancho, alto, 0);
glColor3f(1,0,1); glVertex3f(ancho, 0, 0);

//Cara Abajo
glColor3f(0,1,1); glVertex3f(0, 0, largo);
glColor3f(1,0,0); glVertex3f(ancho, 0, largo);
glColor3f(1,1,0); glVertex3f(ancho, 0, 0);
glColor3f(1,0,1); glVertex3f(0, 0, 0);

//Cara Arriba
glColor3f(0,1,1); glVertex3f(0, alto, largo);
glColor3f(1,0,0); glVertex3f(ancho, alto, largo);
glColor3f(1,1,0); glVertex3f(ancho, alto, 0);
glColor3f(1,0,1); glVertex3f(0, alto, 0);

glEnd;
glTranslatef(ancho/2,0,CAncho/2);
end;

```

```

procedure TMainForm.Construir;

begin
  FNeedSetup := False;
  FList := glGenLists(1);
  glNewList(FList, GL_COMPILE);
  glEnable(GL_DEPTH_TEST);
  glFrontFace(GL_CCW);

  Eslabon2(-CAncho,-CAncho,-CAncho);

  glTranslatef(0,0,-CAncho);
  glRotatef(T1*180/pi,0,1,0);

  Eslabon2(CAncho,CAlto,largoEs11);

  glTranslatef(0,Calto,largoEs11-CAncho);
  glRotatef(T2*180/pi,0,1,0);

  Eslabon2(CAncho,CAlto,largoEs12);
  glEndList;
end;

//-----

procedure TMainForm.GLControlRender(Sender: TObject);

begin

  Construir;
  with Sender as TGLControl do
  begin

    gluLookAt(0, 0, 9, 0, 0, -10, 0, 1, 0);
    glTranslatef(SCFloatSpinEdit2.FloatValue,SCFloatSpinEdit3.
    FloatValue,SCFloatSpinEdit1.FloatValue);
    glRotatef(rotx, 1, 0, 0);
    glRotatef(roty, 0, 1, 0);
    glRotatef(rotz, 0, 0, 1);
    glCallList(FList);

    end;
  end;

//-----

procedure TMainForm.FormCreate(Sender: TObject);

```

```

begin
  Reiniciarvariables1.Click;
end;

procedure TMainForm.Salir1Click(Sender: TObject); begin close;
end;

procedure TMainForm.Reiniciarvariables1Click(Sender: TObject);
begin FNeedSetup := True; rotx:=10; roty:=90; rotz:=0;

teta1[0]:=0; teta2[0]:=0; SCIntSpinEdit1.IntValue:=rotx;
SCIntSpinEdit2.IntValue:=roty; SCIntSpinEdit3.IntValue:=rotz;
SCFloatSpinEdit4.FloatValue:=teta1[0];
SCFloatSpinEdit9.FloatValue:=teta2[0]; GLControl1.Invalidate; end;

procedure TMainForm.SCIntSpinEdit1Change(Sender: TObject); begin
if SCIntSpinEdit1.IntValue=-1 then SCIntSpinEdit1.IntValue:=359;
if SCIntSpinEdit1.IntValue=360 then SCIntSpinEdit1.IntValue:=0;
rotx:=SCIntSpinEdit1.IntValue; GLControl1.Invalidate; end;

procedure TMainForm.SCIntSpinEdit2Change(Sender: TObject); begin
if SCIntSpinEdit2.IntValue=-1 then SCIntSpinEdit2.IntValue:=359;
if SCIntSpinEdit2.IntValue=360 then SCIntSpinEdit2.IntValue:=0;
roty:=SCIntSpinEdit2.IntValue; GLControl1.Invalidate; end;

procedure TMainForm.SCIntSpinEdit3Change(Sender: TObject); begin
if SCIntSpinEdit3.IntValue=-1 then SCIntSpinEdit3.IntValue:=359;
if SCIntSpinEdit3.IntValue=360 then SCIntSpinEdit3.IntValue:=0;
rotz:=SCIntSpinEdit3.IntValue; GLControl1.Invalidate; end;

procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit1Change(Sender: TObject); begin
GLControl1.Invalidate; end;

procedure TMainForm.SCButton1Click(Sender: TObject); var
i:Integer; begin

  // Start counting events
  LED2.Lit:=true;
  SCButton1.Caption:='Stop';
  varN:=1;

  QueryPerformanceCounter(Start1);
  for i:=0 to 9999999 do
    begin
      Ciclo;
      Application.ProcessMessages;
      if GetKeyState(VK_ESCAPE)and 128=128 then break;
    end;

```

```

LED2.Lit:=False;
SCButton1.Caption:='Start';
end;

procedure TMainForm.Ciclo; var pos: OleVariant;
    freq, start, stop: TLargeInteger;
    L1,L2,C1,S1,C12,S12,J11,J12,J21,J22,M11,M12,M21,M22:Single;
begin

QueryPerformanceFrequency(freq);
QueryPerformanceCounter(Start);
QueryPerformanceCounter(Stop1);
tiempo[varN]:=(Stop1-Start1)/freq*1000;

// Calculo de Teta 1 y 2

CWAIPoint1.SingleRead(pos,1000);
teta1[varN]:= (pos*2*pi/4.673);
T1:=teta1[varN];
CWAIPoint2.SingleRead(pos,1000);
teta2[varN]:= (pos*2*pi/4.668);
T2:=teta2[varN];

//Label13.Caption:='TR1:'+FloatToStr(teta1[varN]);

//Label14.Caption:='TR2:'+FloatToStr(teta1[varN]);

// Calculo de TetaPunto 1 y 2

TP1[varN]:= (teta1[varN]-teta1[varN-1])/lapso[varN-1];
TP2[varN]:= (teta2[varN]-teta2[varN-1])/lapso[varN-1];

// Calculo de MCDP

L1:=(largoEs11-CAngo)*10;
L2:=(largoEs12-CAngo/2)*10;
c1:= cos(teta1[varN]);
c12:= cos(teta1[varN]+teta2[varN]);
s1:= sin(teta1[varN]);
s12:= sin(teta1[varN]+teta2[varN]);
x[varN]:= (L1*c1 + L2*c12);
y[varN]:= (L1*s1 + L2*s12);

// Calculo del MCDV

J11:=-L1*S1-L2*S12;
J12:=-L2*S12;

```

```

J21:=L1*C1+L2*C12;
J22:=L2*C12;

Xp[varN]:=J11*TP1[varN]+J12*TP2[varN];
Yp[varN]:=J21*TP1[varN]+J22*TP2[varN];

// Calculo del Indice de Manipulabilidad

M11:= J11*J11+J12*J12;
M12:= J11*J21+J12*J22;
M21:= M12;
M22:= J21*J21+J22*J22;

Det[varN]:= M11*M22-M12*M12;
IM[varN]:= sqrt(Det[varN]);
//
GLControl1.Invalidate;

QueryPerformanceCounter(Stop);
lapso[varN] := (Stop-Start)/freq*1000; //en milisegundos
inc(varN);
end;

procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit4Change(Sender: TObject);
begin
if SCFloatSpinEdit4.FloatValue=-1 then
SCFloatSpinEdit4.FloatValue:=359; if
SCFloatSpinEdit4.FloatValue=360 then
SCFloatSpinEdit4.FloatValue:=0;
teta1[varN]:=SCFloatSpinEdit4.FloatValue*PI/180;
GLControl1.Invalidate; end;
procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit5Change(Sender: TObject);
begin
CAngo:=SCFloatSpinEdit5.FloatValue; GLControl1.Invalidate;
end;
procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit6Change(Sender: TObject);
begin
CAlto:=SCFloatSpinEdit6.FloatValue; GLControl1.Invalidate;
end;
procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit7Change(Sender: TObject);
begin
largoEs11:=SCFloatSpinEdit7.FloatValue;
GLControl1.Invalidate;
end;
procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit8Change(Sender: TObject);
begin
largoEs12:=SCFloatSpinEdit8.FloatValue;
GLControl1.Invalidate;

```

```

end;

procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit9Change(Sender: TObject); begin
if SCFloatSpinEdit9.FloatValue=-1 then
SCFloatSpinEdit9.FloatValue:=359; if
SCFloatSpinEdit9.FloatValue=360 then
SCFloatSpinEdit9.FloatValue:=0;
teta2[varN]:=SCFloatSpinEdit9.FloatValue*PI/180;
GLControl1.Invalidate;
end;

procedure TMainForm.SCButton2Click(Sender: TObject); var
i: Integer;
  //dir:String;
begin
%
dir:=C:\TESISTAS\Liz\Tesis\; Memo1.Clear; for i:=1 to varN-1 do
  Memo1.Lines.Add(FloatToStr(tiempo[i])+ ' '+FloatToStr(lapso[i])+
  ' '+IntToStr(i)+' '+FloatToStr(tetal[i])+ ' '+FloatToStr(teta2[i])+
  ' '+FloatToStr(TP1[i])+ ' '+FloatToStr(TP2[i])+ ' '+FloatToStr(X[i])+
  ' '+FloatToStr(Y[i])+ ' '+FloatToStr(XP[i])+ ' '+FloatToStr(YP[i])+
  ' '+FloatToStr(IM[i])+ ' '+FloatToStr(Det[i]));

Memo1.Lines.SaveToFile('C:\Tesistas\Liz\Tesis\RobotManual\SinTimer\RM2GLALS\RM2GLALS.mat');
end; end.

```

Programa para la comprobación experimental de la cinemática de la interfaz háptica R2SG utilizando el programa Delphi

```

interface
uses

  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  GLControl, ExtCtrls, StdCtrls, ComCtrls, LED, Math, Menus,
  SCCControl, SCEdits, SCMaskEdit, SCAdvEdits, OleCtrls,
  $CWDAQControlsLib_TLB, SCStdControls, CWUIControlsLib_TLB$;
type

TMainForm = class(TForm)
  GLControl1: TGLControl;
  Panel1: TPanel;
  Label2: TLabel;
  Label3: TLabel;
  Label4: TLabel;
  Label11: TLabel;
  Label15: TLabel;
  Label16: TLabel;
  Label17: TLabel;

```

```
Label8: TLabel;  
MainMenu1: TMainMenu;  
Programa1: TMenuItem;  
Salir1: TMenuItem;  
Reiniciarvariables1: TMenuItem;  
Label9: TLabel;  
StaticText1: TStaticText;  
Label10: TLabel;  
StaticText2: TStaticText;  
StaticText3: TStaticText;  
StaticText4: TStaticText;  
StaticText5: TStaticText;  
StaticText6: TStaticText;  
StaticText7: TStaticText;  
SCIntSpinEdit1: TSCIntSpinEdit;  
SCIntSpinEdit2: TSCIntSpinEdit;  
SCIntSpinEdit3: TSCIntSpinEdit;  
SCFloatSpinEdit1: TSCFloatSpinEdit;  
SCFloatSpinEdit2: TSCFloatSpinEdit;  
SCFloatSpinEdit3: TSCFloatSpinEdit;  
SCButton1: TSCButton;  
LED2: TLED;  
SCFloatSpinEdit4: TSCFloatSpinEdit;  
CWDIO1: TCWDIO;  
SCFloatSpinEdit5: TSCFloatSpinEdit;  
SCFloatSpinEdit6: TSCFloatSpinEdit;  
SCFloatSpinEdit7: TSCFloatSpinEdit;  
SCFloatSpinEdit8: TSCFloatSpinEdit;  
SCFloatSpinEdit9: TSCFloatSpinEdit;  
Label11: TLabel;  
Label12: TLabel;  
Label13: TLabel;  
Label14: TLabel;  
StaticText8: TStaticText;  
Label15: TLabel;  
Label16: TLabel;  
te1: TLabel;  
te2: TLabel;  
StaticText9: TStaticText;  
StaticText10: TStaticText;  
EFX: TSCFloatSpinEdit;  
EFY: TSCFloatSpinEdit;  
CWAIPoint1: TCWAIPoint;  
CWAIPoint2: TCWAIPoint;  
SCButton2: TSCButton;  
Memo1: TMemo;  
procedure GLControlRender(Sender: TObject);  
procedure FormCreate(Sender: TObject);
```

```

procedure Salir1Click(Sender: TObject);
procedure Reiniciarvariables1Click(Sender: TObject);
procedure SCIntSpinEdit1Change(Sender: TObject);
procedure SCIntSpinEdit2Change(Sender: TObject);
procedure SCIntSpinEdit3Change(Sender: TObject);
procedure SCFloatSpinEdit1Change(Sender: TObject);
procedure SCButton1Click(Sender: TObject);
procedure SCFloatSpinEdit4Change(Sender: TObject);
procedure SCFloatSpinEdit5Change(Sender: TObject);
procedure SCFloatSpinEdit6Change(Sender: TObject);
procedure SCFloatSpinEdit7Change(Sender: TObject);
procedure SCFloatSpinEdit8Change(Sender: TObject);
procedure SCFloatSpinEdit9Change(Sender: TObject);
procedure SCButton2Click(Sender: TObject);
private

    FNeedSetup: Boolean;
    FList: Cardinal;
    procedure Ciclo;
    procedure Construir;
    procedure Eslabon2(ancho,alto,largo:Single);
end;

var
    MainForm: TMainForm;
    T1,T2:Single;
    rotx,roty,rotz:Integer;
    largoEsl1:Double=2.1;
    largoEsl2:Double=1.7;
    CAncho:Double=0.4;
    CAlto:Double=0.1;
    sim,antisim,IM,XP,YP,TP1,TP2,Teta1,Teta2,tiempo,lapso,X,Y:Array[0..20000] of Single;
    varN:Integer=1;
    start1,stop1:TLargeInteger;
//-----

implementation
uses
    OpenGL12;
    {R *.DFM}

procedure TMainForm.Eslabon2(ancho:Single; alto:Single;
largo:Single);
begin
    glTranslatef(-ancho/2,0,-CAncho/2);
    glBegin(GL_QUADS);

    //Cara chica frente

```

```

glColor3f(1,1,1); glVertex3f(0,    0,    0);
glColor3f(0,0,1); glVertex3f(0,    alto,  0);
glColor3f(1,1,0); glVertex3f(ancho, alto,  0);
glColor3f(0,1,0); glVertex3f(ancho, 0,    0);

//Cara chica Atras

glColor3f(0,1,1); glVertex3f(0,    0,    largo);
glColor3f(1,0,0); glVertex3f(0,    alto,  largo);
glColor3f(1,1,0); glVertex3f(ancho, alto,  largo);
glColor3f(1,0,1); glVertex3f(ancho, 0,    largo);

//Cara Izquierda
glColor3f(0,1,1); glVertex3f(0,    0,    largo);
glColor3f(1,0,0); glVertex3f(0,    alto,  largo);
glColor3f(1,1,0); glVertex3f(0,    alto,  0);
glColor3f(1,0,1); glVertex3f(0,    0,    0);

//Cara Derecha
glColor3f(0,1,1); glVertex3f(ancho, 0,    largo);
glColor3f(1,0,0); glVertex3f(ancho, alto,  largo);
glColor3f(1,1,0); glVertex3f(ancho, alto,  0);
glColor3f(1,0,1); glVertex3f(ancho, 0,    0);

//Cara Abajo
glColor3f(0,1,1); glVertex3f(0,    0,    largo);
glColor3f(1,0,0); glVertex3f(ancho, 0,    largo);
glColor3f(1,1,0); glVertex3f(ancho, 0,    0);
glColor3f(1,0,1); glVertex3f(0,    0,    0);

//Cara Arriba
glColor3f(0,1,1); glVertex3f(0,    alto,  largo);
glColor3f(1,0,0); glVertex3f(ancho, alto,  largo);
glColor3f(1,1,0); glVertex3f(ancho, alto,  0);
glColor3f(1,0,1); glVertex3f(0,    alto,  0);
glEnd;

glTranslatef(ancho/2,0,CAncho/2);

end;

procedure TMainForm.Construir;
begin
  FNeedSetup := False;
  FList := glGenLists(1);
  glNewList(FList, GL_COMPILE);
  glEnable(GL_DEPTH_TEST);
  glFrontFace(GL_CCW);

```

```

Eslabon2(-CAngo,-CAngo,-CAngo);
glTranslatef(0,0,-CAngo);
glRotatef(T1*180/pi,0,1,0);
Eslabon2(CAngo,CAlto,largoEs11);
glTranslatef(0,CAlto,largoEs11-CAngo);
glRotatef(T2*180/pi,0,1,0);

Eslabon2(CAngo,CAlto,largoEs12);
glEndList;
end;

//-----

procedure TMainForm.GLControlRender(Sender: TObject);

begin

  Construir;
  with Sender as TGLControl do
  begin
    gluLookAt(0, 0, 9, 0, 0, -10, 0, 1, 0);
    glTranslatef(SCFloatSpinEdit2.FloatValue,SCFloatSpinEdit3.
    FloatValue,SCFloatSpinEdit1.FloatValue);
    glRotatef(rotx, 1, 0, 0);
    glRotatef(roty, 0, 1, 0);
    glRotatef(rotz, 0, 0, 1);
    glCallList(FList);
  end;
end;

//-----

procedure TMainForm.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Reiniciarvariables1.Click;
end;
procedure TMainForm.Salir1Click(Sender: TObject); begin
close;
end;

procedure TMainForm.Reiniciarvariables1Click(Sender: TObject);
begin FNeedSetup := True; rotx:=10; roty:=90; rotz:=0;
teta1[0]:=0; teta2[0]:=0; SCIntSpinEdit1.IntValue:=rotx;
SCIntSpinEdit2.IntValue:=roty; SCIntSpinEdit3.IntValue:=rotz;
SCFloatSpinEdit4.FloatValue:=teta1[0];
SCFloatSpinEdit9.FloatValue:=teta2[0]; GLControl1.Invalidate;
end;

```

```

procedure TMainForm.SCIntSpinEdit1Change(Sender: TObject); begin
if SCIntSpinEdit1.IntValue=-1 then SCIntSpinEdit1.IntValue:=359;
if SCIntSpinEdit1.IntValue=360 then SCIntSpinEdit1.IntValue:=0;
rotx:=SCIntSpinEdit1.IntValue; GLControl1.Invalidate; end;

procedure TMainForm.SCIntSpinEdit2Change(Sender: TObject); begin
if SCIntSpinEdit2.IntValue=-1 then SCIntSpinEdit2.IntValue:=359;
if SCIntSpinEdit2.IntValue=360 then SCIntSpinEdit2.IntValue:=0;
roty:=SCIntSpinEdit2.IntValue; GLControl1.Invalidate; end;
procedure TMainForm.SCIntSpinEdit3Change(Sender: TObject); begin
if SCIntSpinEdit3.IntValue=-1 then SCIntSpinEdit3.IntValue:=359;
if SCIntSpinEdit3.IntValue=360 then SCIntSpinEdit3.IntValue:=0;
rotz:=SCIntSpinEdit3.IntValue; GLControl1.Invalidate; end;

procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit1Change(Sender: TObject); begin
GLControl1.Invalidate;
end;

procedure TMainForm.SCButton1Click(Sender: TObject); var
i:Integer; begin
// Start counting events
LED2.Lit:=true;
SCButton1.Caption:='Stop';
varN:=1;

    QueryPerformanceCounter(Start1);

    for i:=0 to 99999999 do
        begin
            Ciclo;
            Application.ProcessMessages;
            if GetKeyState(VK_ESCAPE)and 128=128 then break;
            end;
        LED2.Lit:=False;
        SCButton1.Caption:='Start';
    end;

procedure TMainForm.Ciclo; var pos: OleVariant;
    freq, start, stop: TLargeInteger;
    m1,m2,L1,L2,C1,C2,S1,S2,C12,S12,H11,H12,H21,H22,x1,x2,E11,EE:Single;
{ function Redondear(Valor: Extended; Redondeo: Integer):Extended;
begin

    Redondear := Trunc(Valor * Power(10, Redondeo)) / Power(10,Redondeo);
end;
}

```

```

begin
QueryPerformanceFrequency(freq);
QueryPerformanceCounter(Start);
QueryPerformanceCounter(Stop1);
tiempo[varN]:=(Stop1-Start1)/freq*1000;

// Calculo de Teta 1 y 2
CWAIPoint1.SingleRead(pos,1000);
teta1[varN]:= (pos*2*pi/4.673);
T1:=teta1[varN];
CWAIPoint2.SingleRead(pos,1000);
teta2[varN]:= (pos*2*pi/4.668);
T2:=teta2[varN];

//Label13.Caption:='TR1:'+FloatToStr(teta1[varN]);

//Label14.Caption:='TR2:'+FloatToStr(teta1[varN]);

// Calculo de TetaPunto 1 y 2
TP1[varN]:= (teta1[varN]-teta1[varN-1])/lapso[varN-1];
TP2[varN]:= (teta2[varN]-teta2[varN-1])/lapso[varN-1];

// Calculo de las Propiedades del modelo dinamico
m1:=0.81;
m2:=0.112;
L1:=(largoEs11-CAncho)*10;
L2:=(largoEs12-CAncho/2)*10;
c1:= cos(teta2[varN]);
c2:= cos(teta1[varN]);
c12:= cos(teta1[varN]+teta2[varN]);
s1:= sin(teta1[varN]);
s12:= sin(teta1[varN]+teta2[varN]);

x[varN]:= (L1*c1 + L2*c12);
y[varN]:= (L1*s1 + L2*s12);

// Elementos Inerciales, coriolis y centripetas
H11:=(m1+m2)*L1*L1+2*m2*L1*L2*C2+m2*L2*L2;
H12:=m2*L1*L2*C2+m2*L2*L2;
H21:=H12;
H22:=m2*L2*L2;

// valores de la matriz de prueba
x1:= 5;
x2:= 3;
// Calculo de la simetria
sim[varN]:=x1*x1*H11+2*x1*x2*H12+x2*x2*H22;

```

```

// Calculo de la antisimetria
E11:=2*m2*L1*L2*S2*TP2[varN];
EE:=-2*m2*L1*L2*S2*TP1[varN];

antisim[varN]:=x1*x1*E11+x1*x2*EE;

GLControl1.Invalidate;
QueryPerformanceCounter(Stop);
lapso[varN] := (Stop-Start)/freq*1000; //en milisegundos
inc(varN);
end;

procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit4Change(Sender: TObject); begin
if SCFloatSpinEdit4.FloatValue=-1 then
SCFloatSpinEdit4.FloatValue:=359; if
SCFloatSpinEdit4.FloatValue=360 then
SCFloatSpinEdit4.FloatValue:=0;
teta1[varN]:=SCFloatSpinEdit4.FloatValue*PI/180;
GLControl1.Invalidate; end;

procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit5Change(Sender: TObject); begin
CANcho:=SCFloatSpinEdit5.FloatValue; GLControl1.Invalidate; end;
procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit6Change(Sender: TObject); begin
CALto:=SCFloatSpinEdit6.FloatValue; GLControl1.Invalidate; end;
procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit7Change(Sender: TObject); begin
largoEsl1:=SCFloatSpinEdit7.FloatValue; GLControl1.Invalidate;
end;

procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit8Change(Sender: TObject); begin
largoEsl2:=SCFloatSpinEdit8.FloatValue; GLControl1.Invalidate;
end;

procedure TMainForm.SCFloatSpinEdit9Change(Sender: TObject); begin
if SCFloatSpinEdit9.FloatValue=-1 then
SCFloatSpinEdit9.FloatValue:=359; if
SCFloatSpinEdit9.FloatValue=360 then
SCFloatSpinEdit9.FloatValue:=0;
teta2[varN]:=SCFloatSpinEdit9.FloatValue*PI/180;
GLControl1.Invalidate; end; procedure

TMainForm.SCButton2Click(Sender: TObject);
var i:Integer;
//dir:String;
begin
//dir:='C:\TESISTAS\Liz\Tesis\';

Memo1.Clear; for i:=1 to varN-1 do

```



```
%           Gráficas           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
m1=0.81;   %en kg
m2=0.112;
L1=0.17;   % en m
L2=0.15;
```

```
x1=1; x2=1;
```

```
g=9.81; h2=0.01;
```

```
n=length(TP1);
```

```
%%Propiedad de simetria de la Dinamica
```

```
H11=(m1+m2)*L1^2+2*m2*L1*L2*cos(Teta2)+m2*L2^2;
H12=m2*L1*L2*cos(Teta2)+m2*L2^2; H22=m2*L2^2;
```

```
sim1=x1.^2.*H11+2*x1.*x2.*H12+x2.^2.*H22;
```

```
%%Propiedad de antisimetria de la Dinamica
```

```
E11=2*m2*L1*L2*sin(Teta2).*TP2; EE=-2*m2*L1*L2*sin(Teta2).*TP1;
```

```
antisim=(x1.^2*E11)+(x1.*x2.*EE);
```

```
%%Lagrangeano
```

```
%L=((1/2)*m1*(L1^2*TP1.^2))+((1/2)*m2*((L1^2+(2*L1*L2*cos(Teta2))+L2^2).*TP1.^2+((2*L1*L2*cos(Teta2))+L2^2)
```

```
figure(1)
```

```
plot( Muestras , Lapsos )
title('Comportamiento de retardos en el ciclo de trabajo');
xlabel('Muestras');
ylabel('Tiempo de rutina(ms)');
grid
```

```
figure(2)
```

```
plot( Tiempo , Teta1 )
title('Variable articular 1');
xlabel('Tiempo (ms)');
ylabel('Teta 1 (rad)');
grid
```

```
figure(3)
```

```
plot( Tiempo , Teta2 )
title('Variable articular 2');
xlabel('Tiempo (ms)');
ylabel('Teta 2 (rad)');
grid
```

```
figure(4)
```

```
plot( Tiempo , TP1 )
title('Velocidad articular 1');
xlabel('Tiempo (ms)');
ylabel('Velocidad');
grid
```

```
figure(5)
```

```
plot( Tiempo , TP2 )
title('Velocidad articular 2');
xlabel('Tiempo (ms)');
ylabel('Velocidad');
grid
```

```
figure(6)
```

```
plot( Tiempo , X )
title('Cordenada operacional X');
xlabel('Tiempo(ms)');
ylabel('X (cm)');
grid
```

```
figure(7)
```

```
plot( Tiempo , Y )
title('Cordenada operacional Y');
xlabel('Tiempo(ms)');
ylabel('Y (cm)');
grid
```

```
figure(8)
```

```
plot( Tiempo , XP )
title('Velocidad operacional X');
xlabel('Tiempo(ms)');
ylabel('X punto');
grid
```

```
figure(9)
```

```
plot( Tiempo , YP )
title('Velocidad operacional Y');
xlabel('Tiempo(ms)');
ylabel('Y punto');
grid
```

```
figure(10)
```

```
plot( Tiempo , Det )
title('Determinante');
xlabel('Tiempo (ms)');
ylabel('Det');
grid
```

```
figure(11)
```

```
plot( Tiempo , IM )
title('Indice de Manipulabilidad');
xlabel('Tiempo (ms)');
ylabel('I. M. ');
grid
```

```
figure(12)
```

```
plot( Tiempo,sim1,'b')
title('Simetria de la dinamica');
xlabel('tiempo en rutina');
ylabel('simetria');
grid
```

```
figure(13)
```

```
plot( Tiempo , antisim,'b')
title('Antisimetria de la dinamica');
xlabel('Tiempo');
ylabel('antisimetria');
grid
```

```
figure(14)
```

```
plot( X , Y , 'r', XC , YC, 'b')
title('Espacio de trabajo');
xlabel('X (cm)');
ylabel('Y (cm)');
grid
```

Programa de simulación para el seguimiento de trayectoria de un laberinto aplicando control PID de la interfaz háptica R2SG en matlab

Elaboro : Elizabeth Hernández Rojas
Asesor : Omar Arturo Domínguez Ramírez.

```
function dx = R2SG(t,x)

global dx

global tiempo global td1 global td2 global tdp1 global tdp2 global
inc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PARAMETROS DEL ROBOT
m1=0.81; % masas de los eslabones
m2=0.112;

l1=0.17; % longitud de los eslabones
l2=0.15;

lcg1=0.5*l1; % longitud al centro de masas
lcg2=0.5*l2;

g=9.81; % Coeficiente de gravitación

% Friccion Seca o Coulomb
k1=0.1; k2=0.05;
beta=10; % k*tanh(beta*x')

% Fricción Viscosa
b1=0.35;
b2=0.25;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MODELO MATEMATICO DEL ROBOT
% Matriz de Inercia
H11=(m1+m2)*l1.^2+m2*(2*l1*l2*cos(x(3))+l2);
H12=m2*(l1*l2*cos(x(3))+l2.^2);
H21=m2*(l1*l2*cos(x(3))+l2.^2);
H22=m2*l2.^2;

%Vector de Fuerzas de Coriolis y de Fuerzas Centrípetas

C11=-2*m2*l1*l2*sin(x(3))*x(4);
C12=-m2*l1*l2*sin(x(3))*x(4);
C21=m2*l1*l2*sin(x(3))*x(2);
C22=0;

%Matriz de Gravedad
```

```
G1=0;
G2=0;
```

```
%Matriz de Fricción Viscosa y Seca
Fr1=b1*x(2)+k1*tanh(beta*x(2));
Fr2=b2*x(4)+k2*tanh(beta*x(4));
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ESTADOS DEL SISTEMA
% Variables Articulares y Derivadas
q=[x(1);x(3)];
qp=[x(2);x(4)];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MODELO MATEMATICO MATRICIAL

% Matrices del robot
H=[H11,H12;H21,H22];
C=[C11,C12;C21,C22];
G=[G1;G2];
Fr=[Fr1;Fr2];
N=Fr+C*qp+G;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% REFERECNIAS DE MOVIMIENTO

% ENTRA=X Y Y, XP Y YP NADA MAS
% MCIP Y MCIV
% SALE=Q1, Q2,QP1 Y QP2 (ESTOS SON LOS DESEADOS)
```

```
% Posición y velocidad deseada
```

```
if t>=tiempo(inc)
    inc=inc+1;
end
```

```
qd1=td1(inc); qd2=td2(inc); qdp1=tdp1(inc); qdp2=tdp2(inc);
```

```
% Ecuaciones de error
qd=[qd1;qd2];
qdp=[qdp1;qdp2];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ECUACIONES DE ERROR Y DERIVADA DEL ERROR

E=qd-q;
DE=qdp-qp;
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CONTROL DE MOVIMIENTO

% Ecuación de control
Wn1=15;
Wn2=25;
kp1=Wn1^2;
kp2=Wn2^2;
kd1=2*Wn1;
kd2=2*Wn2;
ki1=kp1*kd1/1000;
ki2=kp2*kd2/1000;

kp=[kp1,0;0,kp2];
kd=[kd1,0;0,kd2];
ki=[ki1,0;0,ki2];

I=[x(5);x(6)];

T=kp*E+kd*DE+ki*I;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ECUACIONES DE ESTADO EN LAZO CERRADO

qpp=inv(H)*(T-N);

dx(1,1)=x(2);
dx(2,1)=qpp(1);
dx(3,1)=x(4);
dx(4,1)=qpp(2);
dx(5,1)=E(1);
dx(6,1)=E(2);

\begin{verbatim}

% Realizo:Elizabeth Hernández Rojas
% Asesor: Omar Arturo Domínguez Ramírez.

clear all close all clc

load Datos.mat -ascii

global tiempo global td1 global td2 global tdp1 global tdp2 global
inc

```

```

inc=2;

tiempo = Datos(:,1); muestras = Datos(:,2); px =
Datos(:,3); py = Datos(:,4);

n=length(px);

L1=0.17; % longitud de los eslabones
L2=0.15;

pxp(1)=px(1)/tiempo(1); pyp(1)=py(1)/tiempo(1);

for i=2:n
    % Velocidad X y Y
    pxp(i)=(px(i)-px(i-1))/(tiempo(i)-tiempo(i-1));
    pyp(i)=(py(i)-py(i-1))/(tiempo(i)-tiempo(i-1));
    % MCIP
    td2(i)=acos((px(i)^2+py(i)^2-(L1^2+L2^2))/(2*L1*L2));
    alfa=atan2(py(i),px(i));
    beta=acos((L1^2+L2^2-(px(i)^2+py(i)^2))/(2*L1*L2));
    gama=asin((L2*sin(beta))/sqrt(px(i)^2+py(i)^2));
    td1(i)=alfa-gama;
    % MCIV
    c1= cos(td1(i));
    c12= cos(td1(i)+td2(i));
    s1= sin(td1(i));
    s12= sin(td1(i)+td2(i));

    JI11= c12/(L1*(c1*s12-c12*s1));
    JI12= s12/(L1*(c1*s12-c12*s1));
    JI21= (L1*c1+L2*c12)/(L1*L2*(c12*s1-c1*s12));
    JI22= (L1*s1+L2*s12)/(L1*L2*(c12*s1-c1*s12));

    tdp1(i)= JI11*pxp(i) + JI12*pyp(i);
    tdp2(i)= JI22*pyp(i) - JI21*pxp(i);
end

global dx dx=zeros(6,1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% INTEGRADOR DE MATLAB PARA SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE ESTADO DE R2SG

options=odeset('MaxStep',1,'InitialStep',1);
[t,x]=ode45('R2SG',[0 40],[-0.8669 0.1327 2.4378 -0.017 0 0],options); %0.32626

q1 = x(:,1);
qp1 = x(:,2);
q2 = x(:,3);

```

```

qp2 = x(:,4);

m = length(q1);

% M C D P
for i=1:m
    c1= cos(q1(i));
    c12= cos(q1(i)+q2(i));
    s1= sin(q1(i));
    s12= sin(q1(i)+q2(i));
    xr(i) = L1*c1+L2*c12;
    yr(i) = L1*s1+L2*s12;
end

figure(1)

plot( tiempo , td1 , 'b', t , q1 , 'r');
title('Coordenada generalizada qd1 y qr1');
xlabel('tiempo (s)');
ylabel('q1'); grid
legend('qd1', 'qr1');

figure(2)

plot( tiempo , td2 , 'b', t , q2 , 'r');
title('Coordenada generalizada qd2 y qr2');
xlabel('tiempo (s)');
ylabel('q2');
grid
legend('qd2', 'qr2');

figure(3)

plot( tiempo , tdp1, 'b', t , qp1 , 'r');
title('Velocidad Angular qpd1 y qpr1');
xlabel('t');
ylabel('qp1');
grid
legend('qpd1', 'qpr1');

figure(4)

plot( tiempo , tdp2, 'b', t , qp2 , 'r');
title('Velocidad Angular qpd2 y qpr1');
xlabel('tiempo (s)');
ylabel('qp2');
grid
legend('qpd2', 'qpr2');

```

```
figure(5)

plot( tiempo , px , 'b', t , xr , 'r');
title('Coordenada operacional X');
xlabel('tiempo (s)');
ylabel('X (m)');
grid
legend('Xd', 'Xr');
```

```
figure(6)

plot( tiempo , py , 'b', t , yr , 'r');
title('Coordenada operacional Y');
xlabel('tiempo (s)');
ylabel('Y (m)');
grid
legend('Yd', 'Yr');
```

```
figure(7)

plot( px , py , 'b', xr , yr , 'r');
title('Espacio de trabajo');
xlabel('X (m)');
ylabel('Y (m)');
grid
legend('Xd y Yd', 'Xr y Yr');
```

Programa de simulación para el seguimiento de trayectoria de una rosa aplicando control cartesiano de la interfaz háptica R2SG en matlab

Elaboro : Elizabeth Hernández Rojas

%

Asesor : Omar Arturo Domínguez Ramírez.

```
function dx = pidnl_tbg_carte(t,x)
```

```
%Parámetros supuestos del Robot Phantom y Ganancias
```

```
global dx
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
m1=0.81; % masas de los eslabones
```

```
m2=0.112;
```

```
l1=0.17; % longitud de los eslabones
```

```
l2=0.15;
```

```
lcg1=0.5*l1; % longitud al centro de masas
```

```

lcg2=0.5*12;
g=9.81; % Coeficiente de gravitación

% Fricción Seca o Coulomb
k1=0.1;
k2=0.05;

beta=10; % k*tanh(beta*x')

% Fricción Viscosa
b1=0.35;
b2=0.25;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parámetros del Controlador
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

kp=[100,0;0,81];
kv=[20,0;0,18];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Referencia Deseada ( Seguimiento )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Referencia Deseada en el Plano Operacional: Rosa

h=0.01;
k=0.01;
lambda=1;
radio=.005;

fi=lambda*t;
ro=radio*cos(3*fi);

px=ro.*cos(fi)+h; py=ro.*sin(fi)+k;
dpx=-lambda.*ro.*sin(fi)-3*radio*lambda.*sin(3*fi).*cos(fi);
dpy=lambda.*ro.*cos(fi)-3*radio*lambda.*sin(3*fi).*sin(fi);

pd=[px;py];
dpd=[dpx;dpy];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Modelo Dinámico del Robot
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Matriz de Inercia

H11=(m1+m2).*l1.^2+m2.*(2.*l1.*l2.*cos(x(3))+l2);
H12=m2*(l1.*l2.*cos(x(3))+l2.^2);
H21=m2*(l1.*l2.*cos(x(3))+l2.^2);

```

```
H22=m2*l2.^2;
```

```
%Vector de Fuerzas de Coriolis y de Fuerzas Centrípetas
```

```
C11=-2.*m2.*l1.*l2.*sin(x(3)).*x(4);
```

```
C12=-m2.*l1.*l2.*sin(x(3)).*x(4);
```

```
C21=m2.*l1.*l2.*sin(x(3)).*x(2);
```

```
C22=0;
```

```
%Matriz de Gravedad
```

```
G1=0;
```

```
G2=0;
```

```
%Matriz de Fricción Viscosa y Seca
```

```
Fr1=b1.*x(2)+k1.*tanh(beta.*x(2));
```

```
Fr2=b2.*x(4)+k2.*tanh(beta.*x(4));
```

```
% Variables Articulares y Derivadas
```

```
q=[x(1);x(3)];
```

```
qp=[x(2);x(4)];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
                % Modelado Cinemático del Robot
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Matriz Jacobiana del Robot
```

```
% Matriz Jacobiana
```

```
J11=-l1.*sin(x(1))-l2.*sin(x(1)+x(3));
```

```
J12=-l2.*sin(x(1)+x(3));
```

```
J21=l1.*cos(x(1))+l2.*cos(x(1)+x(3));
```

```
J22=l2.*cos(x(1)+x(3));
```

```
J=[J11,J12;J21,J22];
```

```
Ji=inv(J);
```

```
% Modelo Cinemático Directo de Velocidad (MCDV)
```

```
Xp=J*qp;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
                % Ecuaciones del Modelo Dinámico del Robot
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Generador de Base de Tiempo
```

```
% función suave que va de 0 a 1 en tiempo tb
```

```
tb = 1; alfa_0 = 1.001; delta = 0.001;
```

```

    Si = 1/2+1/2*sin(pi/tb*(t-tb/2));
    dSi = 1/2*(pi/tb)*cos(pi/tb*(t-tb/2));
    ddSi = -1/2*(pi/tb)^2*sin(pi/tb*(t-tb/2));

if t >= tb
    Si = 1;
    dSi = 0;
    ddSi = 0;
end

%Ganancia del TBG
sigma = alfa_0*dSi/(1-Si+delta);
dsigma = alfa_0*((1-Si+delta)*ddSi+dSi^2)/(1-Si+delta)^2);
if t >= tb
    sigma = 4;
    dsigma = 0;
end
%

Ecuaciones de Errores
alfa=[4,0;0,4];
kd=[30,0;0,28];
ki=[35,0;0,35];

% Atractor
S_A1=3;
S_A2=3;
k=500;
A1=S_A1*exp(-k*t);
A2=S_A2*exp(-k*t);

A=[A1;A2];
X=[x(5);x(6)];
I=[x(7);x(8)];

delta_X=X-pd;
delta_Xp=Xp-dpd;
Sx=delta_Xp+sigma*delta_X;
Se=Sx-A;
Xrp=dpd-sigma*delta_X-ki*I+A;
Sq_gorro=Ji*Xp-.1*Ji*Xrp;

%Matrices del robot
H=[H11,H12;H21,H22];
C=[C11,C12;C21,C22];
G=[G1;G2];
Fr=[Fr1;Fr2];

```

```
N=Fr+C*qp+G;
```

```
%Ecuación de control
T=-kd*Sq_gorro;
```

```
% Ecuaciones de Estado
qpp=inv(H)*(T-N);
%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                          Integradores
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
dx(1,1)=x(2);
dx(2,1)=qpp(1);
dx(3,1)=x(4);
dx(4,1)=qpp(2);
dx(5,1)=Xp(1);
dx(6,1)=Xp(2);
dx(7,1)=tanh(100*Se(1));
dx(8,1)=tanh(100*Se(2));
```

```
Elaboro : Elizabeth Hernández Rojas
Asesor  : Omar Arturo Domínguez Ramírez
```

```
clear
close all
clc
```

```
global dx dx=zeros(8,1);
options=odeset('MaxStep',0.1,'InitialStep',0.1);
[t,x]=ode45('pidnl_tbg_carte',[0 15],[pi/4 0 1.0472 0 0 0 0
0],options);
```

```
% Referencia Deseada en el Plano Operacional: Rosa
```

```
h=0.01;
k=0.01;
lambda=1;
radio=.005;
fi=lambda*t;
ro=radio*cos(3*fi);
px=ro.*cos(fi)+h; py=ro.*sin(fi)+k;
dpx=-lambda.*ro.*sin(fi)-3*radio*lambda.*sin(3*fi).*cos(fi);
dpy=lambda.*ro.*cos(fi)-3*radio*lambda.*sin(3*fi).*sin(fi);
pd=[px;py];
dpd=[dpx;dpy];
```

```

% MCIP: Modelo Cinemático Inverso de Posición Deseado
l1=0.17; % longitud de los eslabones
l2=0.15;
qd2=acos((px.^2+py.^2-(l1.^2+l2.^2))./(2.*l1.*l2));
beta=atan2(py,px);
phi=asin((l2.*sin(qd2))./(sqrt(px.^2+py.^2)));
qd1=beta+phi;

% Errores Articulares
error1=qd1-x(:,1);
error2=qd2-x(:,3);

%Errores Operacionales
errorx=px-x(:,5);
errory=py-x(:,6);

figure(1)
plot(t,qd1,'b');
title('Coordenada Generalizada qd1');
xlabel('t');
ylabel('qd1');
grid
legend('qd1');

figure(2)

plot(t,qd2,'b');
title('Coordenada Generalizada qd2');
xlabel('t');
ylabel('qd2');
grid
legend('qd2');

figure(4)
plot(t,px,'b');
title('Coordenada Operacional px deseada');
xlabel('t');
ylabel('px');
grid
legend('px');

figure(5)
plot(t,py,'b');
title('Coordenada Operacional py deseada');
xlabel('t');
ylabel('py');
grid

```

```
legend('py');

figure(7)
plot(px,py,'r');
title('Espacio operacional:(px vs py) Deseado');
xlabel('px');
ylabel('py');
grid legend('Deseado')

figure(8)
plot(t,error1,'b');
title('Error Articular 1 (eq1)');
xlabel('eq1');
ylabel('t');
grid

figure(9)
plot(t,error2,'b');
title('Error Articular 2 (eq1)');
xlabel('eq2');
ylabel('t');
grid

figure(11)
plot(t,x(:,7),'b',t,x(:,8),'r');
title('sigma');
xlabel('sigma');
ylabel('t');
grid
legend('I1','I2')

figure(12)
plot(t,errorx,'b');
title('Error Operacional X');
xlabel('EX');
ylabel('t');
grid

figure(13)
plot(t,errorY,'b');
title('Error Operacional Y');
xlabel('EY');
ylabel('t');
grid

figure(15)
plot(t,errorx,'b',t,errorY,'r');
```

```
title('Errores Operacionales en X y Y');  
xlabel('Errores');  
ylabel('t');  
grid  
legend('EX', 'EY')
```

```
figure(16)  
plot(t,error1,'b',t,error2,'r');  
title('Errores Articulares');  
xlabel('Errores');  
ylabel('t');  
grid
```

7.4. Apéndice B: Documento publicado

Bibliografía

- [1] <http://automata.cps.unizar.es/historia/webs/controlclasico.htm>. Technical report.
- [2] <http://automata.cps.unizar.es/historia/webs/teoriamodernadecontrol.htm>. Technical report.
- [3] <http://bellota.ele.uva.es/imartin/libro/node9>. Technical report.
- [4] <http://ccc.inaoep.mx/fpgacentral/reconfig/2003/articulos/tcr11.pdf>. Technical report.
- [5] <http://contacto.med.puc.cl/actividadesacademicas/aprendizaje/aprendizaje.html>. Technical report.
- [6] <http://es.encarta.msn.com/encyclopedia761578953/energ> Technical report.
- [7] <http://es.wikipedia.org/wiki/colisi> Technical report.
- [8] <http://humano.ya.com/hispataxia/foll/02-sinto.htm>. Technical report.
- [9] <http://humano.ya.com/hispataxia/foll/03-enfer.htm>. Technical report.
- [10] <http://humano.ya.com/hispataxia/foll/05-diagn.htm>. Technical report.
- [11] <http://humano.ya.com/hispataxia/foll/05-diagn.htm>. Technical report.
- [12] <http://humano.ya.com/hispataxia/foll/08trata.htm>. Technical report.
- [13] <http://humano.ya.com/hispataxia/foll/09-cogni.htm>. Technical report.
- [14] <http://humano.ya.com/hispataxia/foll/13-fafa.htm>. Technical report.
- [15] <http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/>. Technical report.
- [16] <http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/r166/r93/r93.htm>. Technical report.
- [17] <http://voltio.ujaen.es/isa/webgrupo/images/robot> Technical report.
- [18] <http://webs.ono.com/usr031/interferon/esclerosis.htm>. Technical report.
- [19] <http://webs.ono.com/usr031/interferon/index-2.htm>. Technical report.
- [20] <http://www-old.rec.ri.cmu.edu/education/webpage/friction.htm>. Technical report.
- [21] <http://www.angelfire.com/ak/psicologia/parkinson.html>. Technical report.
- [22] <http://www.familia.cl/contenedortmp/coriolis/coriolis2.htm>. Technical report.

- [23] <http://www.lanacion.com.ar/coberturaespecial/porlosdemas/discapacidad/preguntasdisca.asp>. Technical report.
- [24] <http://www.monografias.com/trabajos15/actuadores/actuadores.shtml>. Technical report.
- [25] <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/000755.htm>. Technical report.
- [26] <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/espimagepages/17089.htm>. Technical report.
- [27] <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/espimagepages/19515.htm>. Technical report.
- [28] <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/espimagepages/8679.htm>. Technical report.
- [29] <http://www.ondasalud.com/edicion/indice/0,2457,642,00.html>. Technical report.
- [30] <http://www.saludmed.com/csejerci/cinesiol/cinemat.html>. Technical report.
- [31] <http://www.saludmed.com/csejerci/cinesiol/cinemat.html>. Technical report.
- [32] <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/conmlineal/dinamica/dinamica.htm>. Technical report.
- [33] <http://www.uv.es/metode/anuario2002/1612002.html>. Technical report.
- [34] <http://www.wordreference.com/definicion/discapacidad> Technical report.
- [35] <http://www.wordreference.com/definicion/energia> Technical report.
- [36] <http://www.wordreference.com/definicion/fuerza> Technical report.
- [37] N. Azouz and Payandeh. Fast finite element modelling tool for surgical simulation. *Proceedings of Eurohaptics 2001*, 2001.
- [38] M. Zupan A. Primožic A. Fac. of Electr. Eng. Ljubljana Univ. Slovenia; Bardorfer, A. Munih. Upper limb motion analysis using haptic interface. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 6(3):253–260, Sept 2001.
- [39] S. Booth and Schmidt-Tjarks. Psychological theory in haptic interface design: initial steps towards an interacting cognitive subsystems (ics) approach. *Proceedings of Eurohaptics 2001*, 2001.
- [40] Judith E. Deutsch, Grigore Burdea Jason Latonio, and Rares Boian. Rehabilitation of musculoskeletal injuries using the rutgers ankle haptic interface: Three case reports. *Proceedings of Eurohaptics 2001*, 2001.
- [41] Gerardo Loreto Gómez. *Visual Servoing con compensación utilizando Redes Neuronales*. PhD thesis, CENTRO de INVESTIGACIÓN y de ESTUDIOS AVANZADOS del IPN, Junio 2002.
- [42] ILADIBA. Avances en enfermedad de parkinson. *New England Journal of Medicine*, 2(4):38–39, 2004.
- [43] Roque Saltaren Jose Maria Sebastian Luis Angel Silva, Nicolas Raguenes. *RoboTenis Diseño, Simulación, Análisis Cinemático y Dinámico de un robot paralelo para Control Visual de altas prestaciones*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid,Escuela de Ingenieros Industriales, Mayo 2003.
- [44] Phillip John McKerrow. *Introduction to Robotics*. Addison Wesley, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [45] Herbert Lara-Ordaz Ramón Soto-de-la-Cruz Omar A. Domínguez-Ramírez and Virgilio López-Morales. Visualization and control of virtual robot manipulators.

- [46] R. Samperio-Llano Omar A. Domínguez-Ramírez, V. López-Morales. Resultados preliminares sobre interacción háptica en laberintos virtuales, con propósitos de diagnóstico en pacientes con discapacidades neuropsicológicas. pages 2–12.
- [47] Victor Santibañes Rafael Kelly. *Control de Movimiento de Robots Manipuladores*. Pearson Prentice Hall.
- [48] Omar A. Domínguez Ramirez. Modelo cinemático de un robot de 2 grados de libertad. Laboratorio de Electrónica y Control.
- [49] Omar Arturo Domínguez Ramírez. Introducción a las interfaces hápticas. pages 1–30.
- [50] Susan Coote-Emma Stokes Rui Loureiro, Farshid Amirabdollahian and William Harwin. Using haptics technology to deliver motivational therapies in stroke patients: Concepts and initial pilot studies. *Proceedings of Eurohaptics 2001*, 2001.