



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**DESARROLLO DE LOS MEDIOS BÁSICOS PARA DISEÑAR SISTEMAS
ROBÓTICOS DE REHABILITACIÓN MOTORA FINA POR MOVIMIENTOS
FUNCIONALES**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN ROBÓTICA**

**PRESENTA
ING. WILEBALDO MARTÍNEZ VELAZCO**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. VITALIY RYBAK**

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, ABRIL 2013

**Tesis presentada en Abril de 2013 ante los
siguientes sinodales:**

Dr. Agustín Santiago Alvarado.

Dr. Aníbal Arias Aguilar.

Dr. Santiago Omar Caballero Morales.

Dr. Felipe de Jesús Trujillo Romero.

Director de tesis:

Dr. Vitaliy Rybak.

A mi mamá Bica y a mi papá Nago.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme cumplir esta meta.

A Abdenago y Brígida por su ejemplo de esfuerzo trabajo y amor. Sepan que este logro es también suyo.

A Yara por haberme inspirado a tomar este camino.

A Marco Antonio, Noé, Areli y David, los mejores hermanos que hubiera podido tener. Son un ejemplo para mí y es un orgullo poder decirlo.

A Dacia, Obdulia y Mirna.

A mis sobrinos les agradezco el amor que me brindan día a día, porque es motivo de alegría en mi corazón y una razón para ser mejor persona.

A los profesores Luis Manuel y Araceli por el apoyo y confianza mostrados hacia mi persona. A Luis Uriel y Wendy, gracias por su amistad.

A mi amigo Fox por su amistad incondicional.

Al Dr. Vitaliy por darme la oportunidad de colaborar con él.

A los sinodales agradezco el tiempo invertido en la revisión de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de trabajo, Dante, Omar, Emilio y Ulises por haberme apoyado en todo este tiempo.

A Carmen y Celes por las facilidades brindadas a lo largo de la maestría.

Al Dr. Anibal por su apoyo y sus consejos.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de los elementos básicos para el diseño de sistemas robóticos de rehabilitación motora fina enfocados a la tarea funcional de la escritura. Un sistema robótico para rehabilitación permite a los pacientes con daño cerebral en cualquier nivel de lesión repetir movimientos prácticos y tareas funcionales. De la literatura, los robots de rehabilitación se clasifican en pasivos donde el robot realiza la actividad, guiando al paciente, y activos donde los robots corrigen y asisten al paciente en la realización de tareas. Los medios básicos desarrollados pertenecen a la clasificación de los sistemas activos y además proveen un funcionamiento interactivo proporcionando información al paciente del cambio en la respuesta del sistema.

En este trabajo se describen cuatro medios básicos los cuales son: formación de la trayectoria, control de la trayectoria formada, retroalimentación visual y auditiva, además de la evaluación del estado del paciente. Los medios básicos incluyen métodos, algoritmos y programas. Se presentan dos métodos para la formación de los movimientos de un instrumento de escritura que describen el movimiento funcional a seguir por el paciente: un método se basa en el cálculo de la trayectoria y el segundo en la adquisición de la trayectoria por medio de una tableta digitalizadora de tecnología electromagnética. El control de la trayectoria formada presenta un método para encontrar las trayectorias articulares del robot, que permitan el movimiento del instrumento de escritura, además de un método para el control de la trayectoria por interacción con el paciente, el cual contempla el uso de retroalimentación visual y auditiva. Para evaluar el estado del paciente, se describe un método utilizando una tableta digitalizadora gráfica que permite obtener datos de posición, inclinación y tiempo de medición de los datos de un instrumento de escritura.

Finalmente, la aplicabilidad de los medios básicos desarrollados en este trabajo se confirmó por la simulación física del sistema robótico de rehabilitación interactiva,

utilizando el robot de 6 grados de libertad PowerCube. Además, todos los medios básicos desarrollados se implementaron en un sistema de rehabilitación que no hace uso de robots, utilizando una tableta digitalizadora. El sistema es aplicable para la rehabilitación de los pacientes con menor grado de lesión neuronal inicial o alcanzado como resultado de la terapia con aplicación del robot. El sistema es aplicable para el uso individual tanto en centros de rehabilitación como en el hogar de los pacientes, por medio de comunicación con el terapeuta a través de internet.

Índice

AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	ix
Índice	xi
Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xix
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Planteamiento del problema.....	7
1.3.1. Descripción de los medios básicos propuestos	9
1.4. Justificación	10
1.4.1. Impacto social de la discapacidad.....	10
1.4.2. Aumento de la esperanza de vida con discapacidad	12
1.4.3. Beneficios de la terapia asistida por robot	13
1.5. Objetivo general.....	14
1.5.1. Objetivos específicos	14
1.6. Metodología	15
1.7. Delimitaciones	16
1.8. Estructura del documento	16

1.9. Publicaciones.....	17
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Conceptos básicos sobre rehabilitación.....	19
2.1.1. Daño cerebral y plasticidad	19
2.1.2. Terapia de rehabilitación motora.....	21
2.2. Terapias de rehabilitación con robot.	22
Capítulo 3 FORMACIÓN DE LA TRAYECTORIA DE MOVIMIENTO.....	27
3.1. Especificaciones del subsistema de formación de la trayectoria.....	27
3.2. Variables que representan el movimiento del instrumento de escritura.....	29
3.3. Modelado de la trayectoria de movimiento automática	30
3.3.1. Establecimiento de la matriz de transformación de la rotación del instrumento de escritura	31
3.3.2. Definición de la correspondencia entre la posición de la punta del instrumento de escritura y la orientación del efector final del robot.....	35
3.4. Modelado de la trayectoria de movimiento adquirida.....	37
3.4.1. Método para obtener la orientación de un vector unitario a partir de la proyección de una recta en dos planos normales	38
3.4.2. Método de calibración del sistema de coordenadas del área para escritura por el robot	40
3.4.3. Método para obtener la matriz de transformación del sistema de coordenadas del efector final al sistema de coordenadas básico del robot	42
3.5. Método de corrección del ángulo de inclinación del instrumento de escritura.....	43
Capítulo 4 CONTROL DE LA TRAYECTORIA DE MOVIMIENTO DEL ROBOT	47
4.1. Especificaciones del subsistema de control de movimiento del robot.	47

4.2. Generación de las trayectorias articulares	49
4.2.1. Calculo de las trayectorias articulares por cinemática inversa	50
4.2.2. Selección de la configuración factible	52
4.2.3. Ajuste temporal de la trayectoria	56
4.3. Control por interacción con el paciente	57
4.3.1. Esquema de control adaptativo por resistencia.....	58
4.3.2. Interpolación de una sucesión de n puntos por la sucesión de n-1 splines cúbicos.	60
En el intervalo $[0, t_1]$, el sistema percibe la resistencia mayor al umbral U_1 y re calcula la trayectoria para después del intervalo Δt_r , con las condiciones de velocidad y aceleración iguales para el punto q_3	61
4.4. Retroalimentación visual de la trayectoria.....	62
4.4.1. Esquema de retroalimentación visual y auditiva	62
Capítulo 5 EVALUACIÓN DE LA MOTRICIDAD FINA	65
5.1. Introducción	65
5.1. Mediciones objetivas: precisión y suavidad del movimiento	67
5.2. Esquema general del subsistema propuesto	68
Capítulo 6 SIMULACIÓN FÍSICA Y RESULTADOS.....	71
6.1. Componentes del sistema.....	71
6.1.1. Hardware.....	71
6.1.2. Software	75
6.1.3. Flujo de datos	76
6.2. Simulación física.....	78
6.2.1. Programa de formación de la trayectoria	78
6.2.2. Programa de movimiento del robot	80

6.2.3. Programa de evaluación del estado y progreso del paciente	82
6.2.4. Programa de implementación del sistema completo sin robot	83
6.3. RESULTADOS	87
Capítulo 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO	93
7.1. Conclusiones	93
7.2. Trabajos a futuro	95
APENDICE.	97
Desarrollo del algoritmo de generación de una trayectoria por splines cúbicos	97
Bibliografía	107

Índice de figuras

Fig. 1. Robótica utilizada en pacientes con discapacidad: a) la prótesis robótica para rodilla powerknee, b) el robot asistencial Asibot y c) el sistema de rehabilitación Armin.....	2
Fig. 2. Incremento en la investigación de la rehabilitación con sistemas robóticos.....	4
Fig. 3. Incremento en ventas de la empresa HOCOMA™.....	5
Fig. 4. Medios básicos propuestos.....	8
Fig. 5. Flujo de los datos en el diagrama general del sistema.....	9
Fig. 6. Proceso de Rehabilitación de adultos con EVC.....	23
Fig. 7. Subsistema de formación de la trayectoria.....	28
Fig. 8. Variables que representan el movimiento del instrumento de escritura.....	29
Fig. 9. Diagrama de bloques de la formación de la trayectoria de movimiento automática.....	31
Fig.10. Estado espacial inicial del instrumento de escritura.....	32
Fig. 11. Estado espacial del instrumento de escritura con giro respecto del eje y_0	33
Fig. 12. Estado espacial del instrumento de escritura con giro respecto de los ejes y_0 y x_0 con ángulos φ y $-\psi$ respectivamente.....	34
Fig. 13. Área factible para escritura con sus características.....	36
Fig. 14. Diagrama de bloques de la formación de la trayectoria de movimiento adquirida.....	37
Fig. 15. Ubicación del vector unitario n_1	39
Fig. 16. Ubicación del vector unitario n_2	39
Fig. 17. Límite físico de la posición del último elemento del manipulador.....	44
Fig. 18. El instrumento de escritura se gira con respecto al sistema de coordenadas del efector final.....	44
Fig. 19. Cambio de espacios involucrados en el sistema propuesto.....	48

Fig. 20. Diagrama a bloques del subsistema de seguimiento de la trayectoria.	48
Fig. 21. Diagrama a bloques del módulo generador de las trayectorias articulares.	50
Fig. 22. Distintas configuraciones para la solución del problema cinemático inverso del robot de seis grados de libertad PowerCube.	51
Fig.23. Posición del área de escritura con respecto al sistema de coordenadas básico del manipulador.....	52
Fig. 24. Diagrama de flujo de la selección de la configuración factible.	55
Fig. 25. Cambio en el valor de las articulaciones cada Δt intervalo de tiempo.	56
Fig. 26. Esquema de control de la velocidad de las articulaciones.	57
Fig. 27. Esquema de control adaptativo por resistencia generalizado a n umbrales.	59
Fig. 28. Rangos de adaptación del sistema generalizados a n umbrales.	60
Fig. 29. Modificación de la velocidad de la trayectoria por splines cúbicos.	61
Fig. 30. Esquema de retroalimentación visual y auditiva aplicada al sistema de control. ..	64
Fig. 31. Medición objetiva de la precisión.	68
Fig. 32. Proceso de adquisición de datos para evaluación.	69
Fig. 33. Brazo robótico PowerCube.	73
Fig. 34. Tableta digitalizadora Wacom Intuos3.	74
Fig. 35. Tableta digitalizadora EasyPen de Genius.....	75
Fig. 36. Flujo de información del sistema propuesto.	77
Fig. 37. Implementación en el sistema robótico PowerCube.	81
Fig. 38. Interfaz del programa para la evaluación del estado y progreso del paciente.	82
Fig. 39. . Implementación del programa de evaluación del estado del paciente.	83
Fig. 40. Interfaz gráfica de usuario para el médico.	84
Fig. 41. Interfaz gráfica de usuario para el paciente.	85
Fig. 42. Trayectoria compuesta por diversos elementos.	87
Fig. 43. Trayectoria básica con la figura de círculo.	87
Fig. 44. Simulación en Matlab de la trayectoria adquirida.	88
Fig. 45. Implementación de la trayectoria adquirida en el robot virtual.	88
Fig. 46. Simulación en Maya de la trayectoria adquirida.....	89
Fig. 47. Grafica de la trayectoria generada por splines cúbicos para Teta 1.	90

Fig. 48. Gráfica que representa el el cambio de la velocidad en la articulación 1 del robot PowerCube.....91

Índice de tablas

Tabla 1. Publicaciones realizadas con esta investigación.....	17
Tabla 2. Actividades de la Vida Diaria (AVD).	20
Tabla 3. Variables que representan la trayectoria de movimiento del instrumento de escritura.....	30
Tabla 4. Matriz de transformación final para el robot de seis grados de libertad PowerCube.	51
Tabla 5. Configuraciones encontradas después de resolver el problema cinemático inverso.	51
Tabla 6. División de las escalas de valoración según funcionalidad y funcionamiento motor.	66
Tabla 7. Hardware utilizado en cada subsistema.	77
Tabla 8. Coordenadas de los puntos de interés para la figura del círculo.....	79
Tabla 9. Datos de entrada para el programa.	80
Tabla 10. Características de los ejercicios de formación automática.	84
Tabla 11. Parámetros adquiridos, en las tabletas digitalizadoras utilizadas.	85
Tabla 12. Valores de las articulaciones.	90
Tabla 13. Cambio en los valores de los intervalos para el re cálculo de la trayectoria.	91

Capítulo 1 | INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta un panorama general acerca de los sistemas robóticos de rehabilitación neuronal. También se presenta el estado del arte que muestra las necesidades de investigación en el área, las cuales dan pie a la realización de esta tesis. De acuerdo con ello se presenta también el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, la descripción del trabajo, las delimitaciones y la estructura del documento.

1.1. Introducción

A lo largo de la historia, el ser humano ha acumulado conocimientos que le han permitido desarrollar herramientas mediante las cuales ha modificado el medio ambiente para poder sobrevivir y mejorar sus condiciones de vida. Este conjunto de conocimientos ordenados científicamente se denominan tecnología, la cual en diferentes áreas le ha permitido al hombre satisfacer sus necesidades de alimentación, salud, vestido, casa, etc. ayudando a mejorar su calidad de vida. Una de estas áreas es la robótica, que por su naturaleza multidisciplinaria permite involucrar una gran cantidad de áreas del conocimiento tales como matemáticas, física, electrónica, computación, visión e inteligencia artificial entre otras.

En la actualidad existen muchas definiciones de robótica, una de ellas dice que “la robótica es una disciplina científica que aborda la investigación y desarrollo de una clase particular de sistemas mecánicos denominados robots manipuladores, diseñados para realizar una amplia variedad de aplicaciones industriales, científicas, domésticas y comerciales” [1].

Al ser un área que genera tecnología, la robótica se ha convertido en un área estratégica para el país ya que su impacto repercute en la vida cotidiana, educación cultura y en la sociedad en general. Dentro del área médica, la tecnología de la robótica puede

ayudar a personas que han sufrido un evento vascular cerebral (EVC) proporcionando ayuda de manera asistencial, en forma de prótesis o de manera terapéutica, esta última específicamente a través de terapias de neurorehabilitación (ver fig. 1).

Las terapias de neurorehabilitación se basan en una característica que posee el cerebro humano llamada plasticidad, la cual es capaz de modificar la corteza cerebral mediante procesos bioquímicos y eléctricos como resultado de estímulos generados por la actividad mental y la experiencia [2]. Un programa de neurorehabilitación motora consiste en la planificación de ciertos ejercicios (con un número muy elevado de repeticiones) que generan los estímulos mencionados. En la realidad, después de que los sobrevivientes de EVC completan su rehabilitación convencional, aún persisten deficiencias motoras en las extremidades superiores. De ahí la importancia de desarrollar métodos más efectivos para la restauración del movimiento de las extremidades superiores.

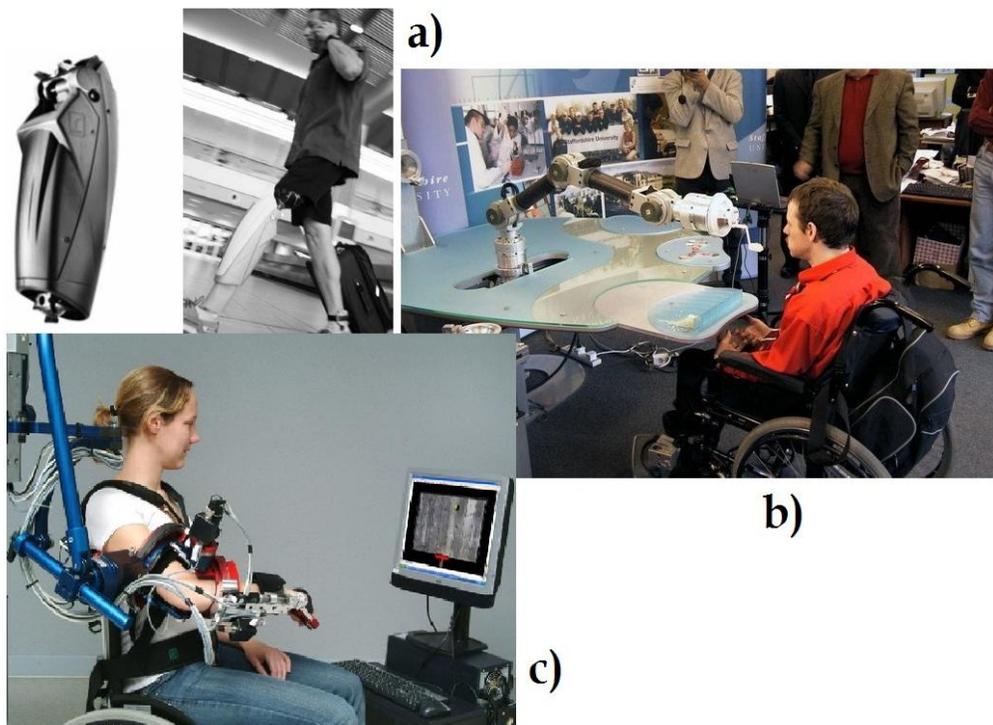


Fig. 1. Robótica utilizada en pacientes con discapacidad: a) la prótesis robótica para rodilla powerknee, b) el robot asistencial Asibot y c) el sistema de rehabilitación Armin.

Un sistema robótico, diseñado para neurorehabilitación motora, debe proporcionar la ayuda necesaria al paciente para realizar movimientos repetitivos, además de que debe ser capaz de adaptarse a las necesidades de cada paciente para llevar a cabo una terapia eficiente. Además, el sistema de rehabilitación también tiene que ser capaz de dar información al médico acerca de la evaluación del estado del paciente.

Para las extremidades superiores, la rehabilitación motora se divide en fina y gruesa según las articulaciones que se rehabilitan al realizar los ejercicios específicos. La rehabilitación motora gruesa involucra el hombro, el codo y la muñeca, mientras la fina involucra la mano y los dedos.

En este trabajo se han investigado los más recientes sistemas robóticos para rehabilitación de las extremidades superiores, con los que se trabaja en los principales centros de rehabilitación neurológica a nivel mundial. Paralelamente se ha realizado una investigación de las terapias y dispositivos utilizados en las clínicas y centros de rehabilitación del Estado de Oaxaca, principalmente el Centro de Rehabilitación y Educación Especial (CREE) de la ciudad de Oaxaca, y también el Centro de Evaluación y Rehabilitación Robótica (CEREBRO) de la ciudad de México.

1.2. Antecedentes.

Durante las pasadas dos décadas, han surgido numerosas investigaciones en el campo de la rehabilitación asistida por robot, la mayoría enfocadas a replicar la terapia convencional, buscando una mayor facilidad, eficiencia y menor tiempo en rehabilitación [3]. Un estudio realizado por [4], demuestra un rápido incremento en el número de investigaciones en robots de rehabilitación (ver fig. 2), motivadas principalmente por recientes avances científicos en plasticidad cerebral y recuperación funcional [5]. Un dato importante es que no todas las investigaciones han llegado a concretarse en dispositivos para un usuario final por cuestiones de costo en la implementación clínica, obligando a los investigadores a demostrar el costo-efectividad a largo plazo [6]. A pesar de ello todas las investigaciones han contribuido para aumentar el volumen de conocimientos de los que ahora trabajan en este campo, en beneficio de la investigación [7].

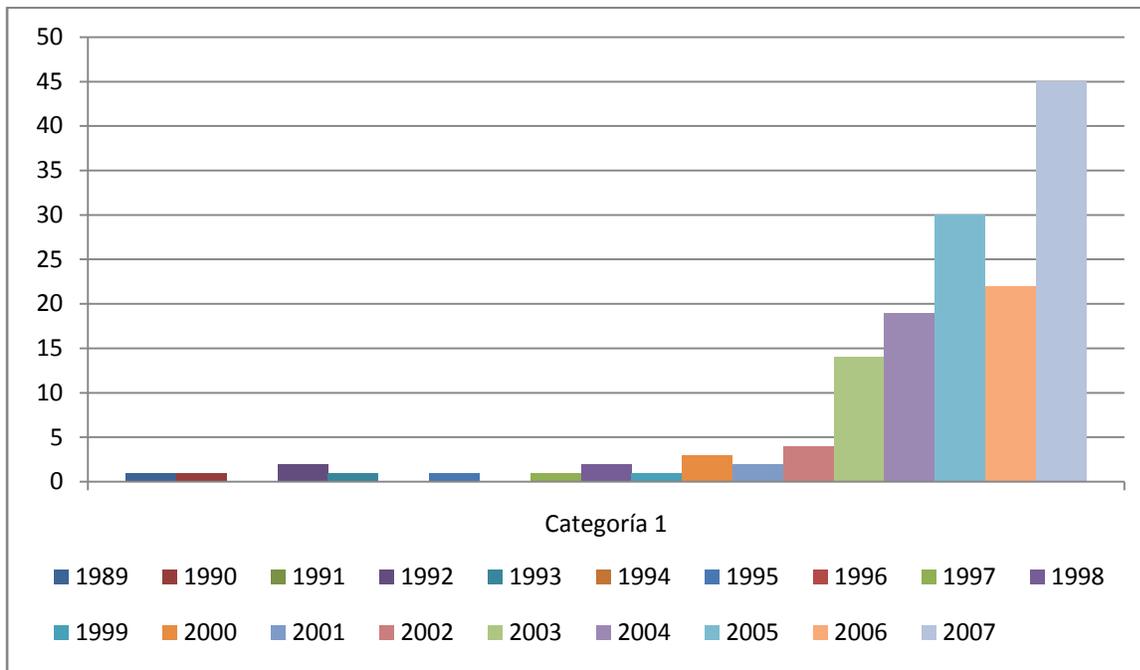


Fig. 2. Incremento en la investigación de la rehabilitación con sistemas robóticos.

Las investigaciones que si han llegado a concretarse han generado una nueva industria de sistemas robóticos para rehabilitación, cuyos productos están siendo utilizados por clínicas y hospitales a nivel mundial, inclusive con centros especializados en neurorehabilitación robótica. Prueba de ello es el estudio presentado por la empresa de mayores ventas en sistemas de rehabilitación robótica, HOCOMA™, en el cual se puede ver el incremento de ventas de diversos sistemas de rehabilitación (ver fig. 3) desde el año 2000 al año 2010. El sistema Lokomat™ está enfocado a terapias de marcha para rehabilitación de miembros inferiores, el sistema Erigo™ se utiliza para estimular a los pacientes en una fase temprana después del EVC, mientras que los sistemas Armeo™ se utilizan para la rehabilitación de los miembros superiores. De esta imagen también se puede observar cómo han pasado los sistemas del miembro inferior al miembro superior.

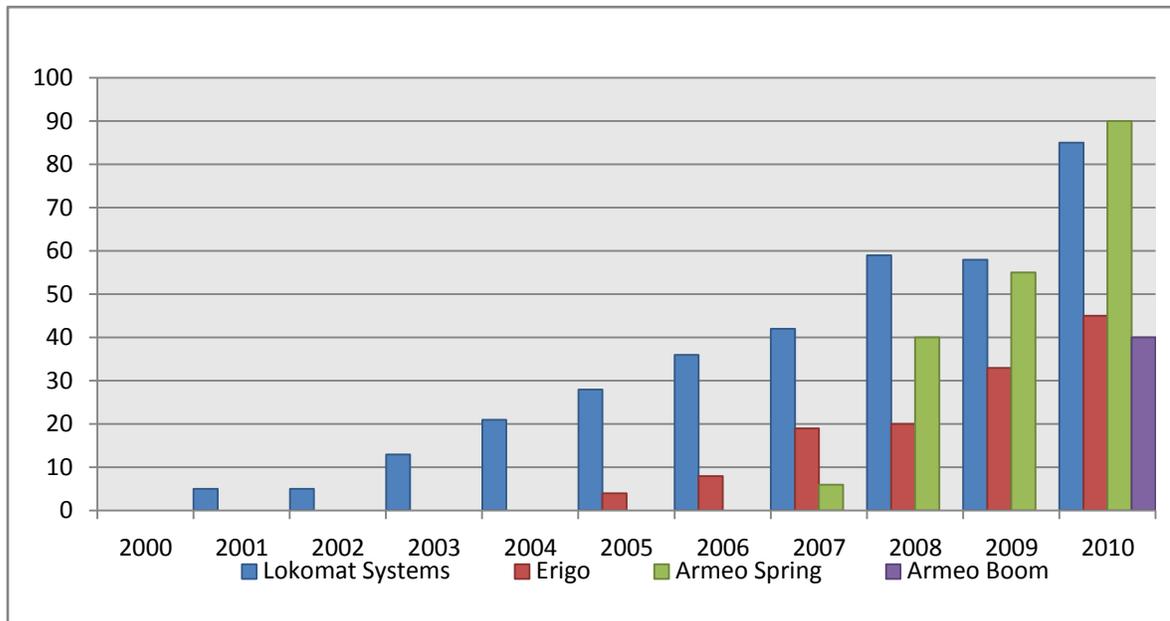


Fig. 3. Incremento en ventas de la empresa HOCOMA™.

A continuación se mencionan algunos de los proyectos más reconocidos y las características que los identifican.

Dentro de los sistemas de rehabilitación motora gruesa, está el primer diseño disponible en el mercado del *MIT-Manus*; este robot desarrollado por *InteractiveMotion Technologies* (Estados Unidos), está diseñado para aplicaciones clínicas neurológicas y utiliza una estrategia de asistencia activa (véase sección 2.3); este es un módulo planar de dos grados de libertad para rehabilitación del codo y el antebrazo [8]. El objetivo de este proyecto fue la aplicación de la robótica y la tecnología de automatización para mejorar, cuantificar y documentar la rehabilitación-neurológica mediante un protocolo de neuro-rehabilitación robótica desarrollado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y probado en el Hospital Burke de Rehabilitación en NY. Los autores comprueban que este tipo de terapia no tiene efectos adversos, que los pacientes aceptan de manera positiva el tratamiento y que la manipulación de la extremidad afectada influye en la recuperación cerebral.

Un sistema similar es el robot *ArMin*, comercializado por la empresa *Hocoma* (Suiza) en 2007, el cual está diseñado para terapias enfocadas a las Actividades de la Vida Diaria (AVD). Este sistema consta de un semi-exoesqueleto de seis grados de libertad,

equipado con sensores de fuerza y posición. Este sistema utiliza estrategias de control cooperativas (véase sección 2.3) con el paciente basadas en arquitectura de admitancia e impedancia [9].

En 2001 *Interactive Motion Technologies, Inc.* (Estados Unidos) extendió la terapia robótica a la rotación de la muñeca. Está basado en el uso de un dispositivo para terapia robótica de 3 grados de libertad, montado en el extremo del dispositivo planar *MIT-Manus*, el cual provee 3 grados de libertad para el movimiento de la muñeca usando el mismo principio de neurorehabilitación que el *Mit-Manus* [10].

El siguiente paso en la neurorehabilitación robótica está relacionado con la recuperación de las habilidades motoras finas. Este problema es más complejo en comparación con la recuperación de las habilidades motoras gruesas debido a la complejidad de la mano: contiene 29 articulaciones en un volumen muy pequeño localizado entre la muñeca y los dedos. La cantidad de corteza cerebral que controla los movimientos de la muñeca y los dedos es más grande que cualquier otra parte del cuerpo en particular [2].

Recientemente ha aparecido un sistema comercial para la terapia de la motricidad fina. En el año 2010 la empresa *Tyromotion* (Austria) lanzó al mercado el sistema *Amadeo*, un dispositivo mecatrónico cuya función es la rehabilitación de los dedos [11]. Este dispositivo permite el entrenamiento de los dedos, juntos o separados, mediante el entrenamiento únicamente de flexión y extensión. El rango de movimiento puede ser ajustado para cada dedo individualmente. Con él se realizan ejercicios con objetivos orientados para mejorar las funciones motoras de pacientes con restricción de movimientos de los dedos individuales o en toda la mano (variaciones pasivas, activas o de asistencia).

Cabe hacer mención de otras líneas de investigación que se basan en retroalimentación visual con un entorno virtual. En 2010 la empresa *YouRehab* (Suiza) presentó el proyecto *YouGrabber*, que está dirigido a la rehabilitación de todo el miembro superior incluyendo los dedos mediante terapias basadas en video juegos y Terapia de Movimiento Inducido por Restricción (TMIR) [12].

En los últimos dos ejemplos mencionados, los dedos solamente realizan los movimientos de flexión y extensión sin orientar la terapia a un movimiento en una tarea de

la vida diaria. En conclusión, los sistemas que se enfocan a movimientos motores finos solamente realizan la parte de entrenamiento repetitivo sin dirigir las terapias a actividades de la vida diaria, siendo que las actividades motoras finas ocupan mayor volumen de corteza cerebral.

1.3. Planteamiento del problema

A pesar de que las investigaciones para desarrollar sistemas robóticos para rehabilitación son un área que ha generado avances en la mejoría de lesiones neuronales, existe muy poca literatura que hable acerca de las mejoras funcionales (al realizar las AVD) después de las lesiones [13]. El estado del arte muestra pocas investigaciones para los sistemas robóticos de rehabilitación motora fina enfocados a una tarea funcional, y ninguna para la tarea de la escritura, siendo que diversas evaluaciones de habilidad motora funcional la incluyen como una prueba que relaciona el dominio de la mano, por ejemplo la prueba Jebsen-Taylor que la considera entre sus siete pruebas básicas [14]. Además es una de las cuatro actividades de la vida diaria (AVD) de comunicación reconocidas en [15] (ver tabla 2).

La propuesta de este trabajo es desarrollar los medios para atender la rehabilitación motora fina a través de la repetición de los movimientos normales que realiza una persona sana en la tarea funcional de la escritura, forzando la concentración del paciente (mediante retroalimentación visual y auditiva), utilizando sistemas robóticos y tecnologías de la información. Los medios proveen la adaptación del sistema a la capacidad del paciente, consolidando de esta manera un sistema activo (véase la sub sección 2.1.3).

Para dar solución al problema planteado se propone un esquema de cuatro medios básicos para diseñar un sistema de rehabilitación motora fina por movimientos funcionales, enfocados a la tarea de escritura. Los medios básicos pueden representarse por subsistemas que cumplen ciertos requerimientos dentro del sistema completo. Es por medio de la identificación y estudio de los fundamentos de cada uno de los medios básicos propuestos, como se pueden establecer las características necesarias para el diseño de cada uno de los subsistemas.

Los medios básicos son: un subsistema de formación de la trayectoria de un instrumento de escritura; un subsistema de control de la trayectoria de movimiento del instrumento de escritura por el robot; un subsistema para proveer una interfaz de retroalimentación visual y auditiva para el paciente; un subsistema para la evaluación del estado del paciente en rehabilitación (ver fig. 4). Estos siguen la siguiente secuencia.

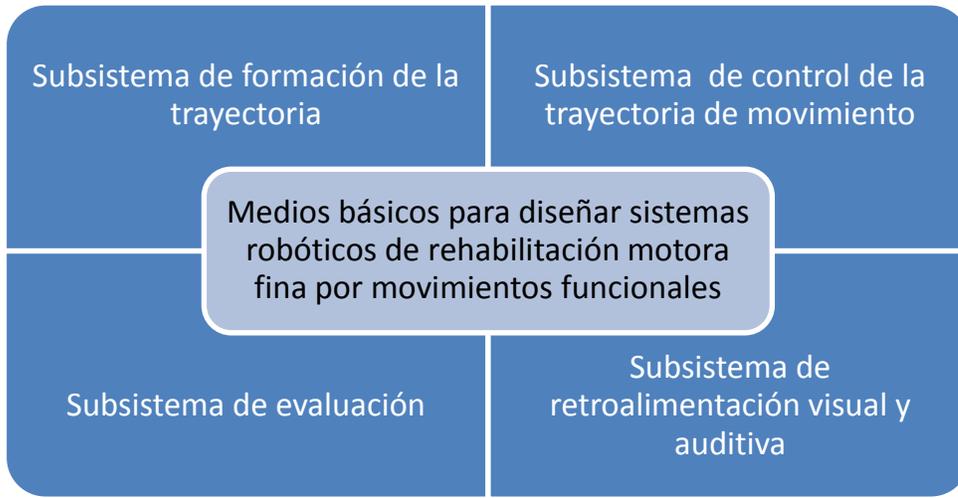


Fig. 4. Medios básicos propuestos

1. El médico propone un ejercicio de rehabilitación funcional (tarea de escritura) por medio del subsistema de formación de la trayectoria.
2. El subsistema de control de la trayectoria formada en conjunto con el subsistema de retroalimentación visual y auditiva interaccionan con el paciente para realizar la terapia de rehabilitación motora.
3. Por último el paciente es evaluado mediante el subsistema de evaluación del estado y progreso del paciente y los datos son presentados al médico, el cual puede reprogramar la terapia.

La figura 5 ilustra el flujo de datos a través de los cuatro subsistemas.

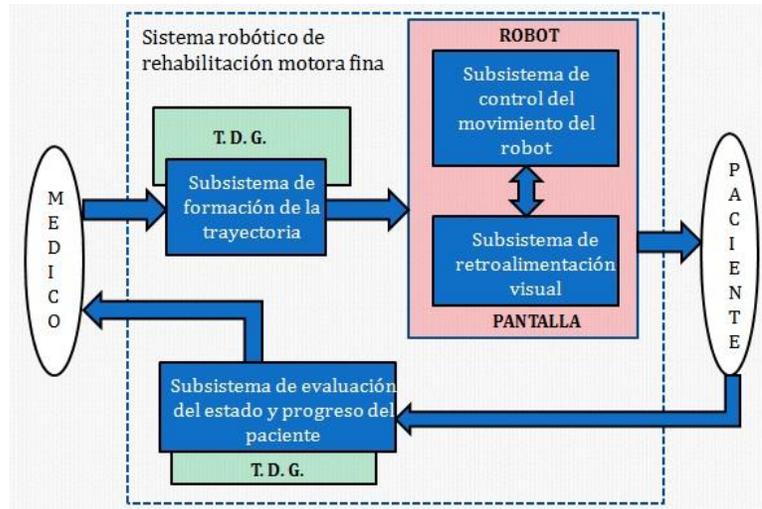


Fig. 5. Flujo de los datos en el diagrama general del sistema.

1.3.1. Descripción de los medios básicos propuestos

El subsistema de formación de la trayectoria de movimiento de un instrumento de escritura, está basado en la identificación de los parámetros que describen la trayectoria de éste respecto al tiempo. Estos parámetros deben relacionar la posición y orientación del instrumento de escritura con respecto al sistema de coordenadas del robot. Con los parámetros establecidos, la trayectoria se puede calcular o adquirir. La trayectoria calculada se obtendrá asignando el valor de los parámetros identificados para definir la posición y orientación del instrumento de escritura, según la posición del instrumento de escritura en un plano de escritura. La trayectoria adquirida (de una persona sana al realizar la tarea de escritura) se obtiene relacionando los parámetros identificados con los datos generados por el médico, utilizando una Tableta Digitalizadora (TD) de tecnología electromagnética.

En el subsistema de control de la trayectoria de movimiento del robot, se generan las trayectorias articulares que producen el movimiento del robot para el proceso de neurorehabilitación motora fina funcional propuesto. Este subsistema recibe como entrada la trayectoria del efector final del manipulador robótico (la posición y orientación del

efector final que moverá el instrumento de escritura), como un conjunto de matrices de transformación del sistema de coordenadas del efector final con respecto al sistema de coordenadas básico del robot. Dentro de este subsistema también se contempla el control del movimiento del robot, basado en un esquema de adaptación del movimiento del robot a una respuesta del paciente (midiendo el movimiento voluntario del paciente y el movimiento solicitado por el sistema), logrando con esto una interacción entre el paciente y el sistema de rehabilitación propuesto.

El Biofeedback en neurorehabilitación es el proceso mediante el cual un paciente recibe información acerca de procesos fisiológicos en forma de señales visuales o auditivas para controlar dichos procesos. El subsistema de retroalimentación visual y auditiva (biofeedback) tiene la función de captar la concentración del paciente al proceso de rehabilitación. Una adecuada representación de estas señales permite al paciente mejorar los mecanismos biológicos de control del movimiento, ayudando de esta manera a la recuperación de la función perdida. El subsistema de retroalimentación visual, en conjunto con el subsistema de seguimiento a la trayectoria de movimiento, va a proporcionar la estimulación sensorial necesaria para provocar la plasticidad cerebral (véase la sección 2.1) en la terapia de neurorehabilitación a través de la sincronización del movimiento del robot con los gráficos a mostrarse en una pantalla y señales auditivas.

La evaluación del estado del paciente debe estar basada en características clínicas que permitan evaluar la funcionalidad de la mano antes, durante y después de la terapia con el robot. La evaluación debe obtener parámetros objetivos que permitan mejorar el programa de rehabilitación. Los datos necesarios para medir estas características clínicas son obtenidos a través de la Tableta Digitalizadora.

1.4. Justificación

1.4.1. Impacto social de la discapacidad

Según datos de la *Organización Mundial de la Salud* (OMS), en todo el mundo las personas con discapacidad tienen peores resultados de salud, peores resultados académicos,

una menor participación económica y unas tasas de pobreza más altas que las personas sin discapacidad [16]. La misma OMS estima que más de mil millones de personas viven en todo el mundo con alguna forma de discapacidad; de ellas, casi 200 millones experimentan dificultades considerables al realizar sus actividades diarias.

Resultados de la Encuesta Mundial de Salud muestran que la prevalencia de la discapacidad es mayor en los países de ingresos más bajos que en los países de ingresos más altos. Las personas de condición económica más pobre, las mujeres y los ancianos también presentan una mayor prevalencia de la discapacidad. Las personas con pocos ingresos, sin trabajo o con poca formación académica tienen mayor riesgo de discapacidad [16]. Entre la población con alguna discapacidad, 75% es desempleado, y aquellos que cuentan con empleo perciben un salario menor al de las personas no discapacitadas; además, la mayoría no tiene acceso a servicios de salud [17]. Esto apoya la hipótesis de que hay una relación estrecha entre discapacidad y pobreza: la mayoría de las personas con discapacidad viven en la pobreza [18].

Desde una perspectiva social, se ha documentado que la discapacidad representa una gran carga económica para los sistemas de seguridad social y para las personas. Los costos de la discapacidad se clasifican como directos e indirectos, según si incluyen los costos derivados de la atención médica o representan la pérdida de ganancias por la condición de discapacidad (pérdida de ingresos laborales, disminución de ingresos, costos de traslado, etc.) [19].

En educación especial la importancia del nivel socioeconómico de la familia varía diferencialmente en su influencia, en cuanto a la provisión de oportunidades de aditamentos, rehabilitación, cuidado médico y acceso a nuevas tecnologías [20].

En México según el censo del *INEGI*, del año 2010, las personas que tienen algún tipo de discapacidad (Físicas, mentales, intelectuales o sensoriales) son 5 millones 739 mil 270, lo que representa 5.1% de la población total, de los cuales el 58.3% del total de discapacitados presenta limitaciones relacionadas con sus piernas o brazos [21]. Oaxaca ocupa el lugar número quince entre los estados que presentan mayor población con esta problemática, y de acuerdo con el número total de habitantes considerado se puede afirmar que casi 30 mil personas viven con algún tipo de discapacidad en alguna de sus

extremidades [22]. La región de la Mixteca es la que tiene el mayor porcentaje de población con discapacidad 7.63% [23].

Además, generalmente los centros especializados para el tratamiento de la rehabilitación motora se encuentran en la zona centro, lo cual hace difícil el que los pacientes que viven en lugares distantes de la capital acudan a recibir terapias, que generalmente se caracterizan por ser prolongadas. Por ello existe la necesidad de desarrollar los medios para buscar disminuir el costo de fabricación de sistemas para rehabilitación que puedan ser adquiridos por clínicas de rehabilitación tanto en el centro como en distintas partes del estado e inclusive por los mismos pacientes.

1.4.2. Aumento de la esperanza de vida con discapacidad

La esperanza de vida se refiere al número de años que en promedio se espera que viva una persona después de nacer. Una esperanza de vida alta indica un mejor desarrollo económico y social en la población, pues permite disminuir las tasas de mortalidad. No obstante, a menudo personas que en otras circunstancias habrían fallecido, sobreviven con secuelas físicas y/o mentales. Por tanto, cada vez un mayor número de personas en el mundo vive con algún tipo de discapacidad, con la consecuente carga económica para los sistemas de salud y para las familias directamente [18].

En México, la esperanza de vida en 1930 era cercana a los 34 años, en 1970 se alcanzó una esperanza de vida de 61.9 años [21]. En 2010, la esperanza de vida total al nacimiento es de 75.4 años [24]. Según [25] la esperanza de vida saludable en Oaxaca, es la quinta peor del país con 63.5 años. De 2000 a 2010 la población con discapacidad en Oaxaca aumentó en un 3.3%. De acuerdo con [16], es debido al envejecimiento de la población y al incremento global de los problemas crónicos de salud asociados a discapacidad, como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares y los trastornos mentales [23].

También se identificó la enfermedad cerebro vascular como la principal causa de pérdida de vida saludable en el adulto mayor, además de que ocupa también un lugar

importante en la población en edad productiva, lo que traslada la ocurrencia a edades más tempranas, haciendo necesaria la recuperación de las actividades funcionales.

En los años futuros, la discapacidad será un motivo de preocupación aún mayor, pues su prevalencia está aumentando.

1.4.3. Beneficios de la terapia asistida por robot

En muchos países, los medios terapéuticos al alcance de las personas con lesiones cerebrales siguen siendo poco eficaces a pesar del costo elevado que representan para la sociedad, los pacientes y sus familias, en especial cuando los enfermos no pueden reincorporarse a la vida activa [26]. La secretaría de Salud en México recomienda fortalecer la investigación y la enseñanza en salud para el desarrollo del conocimiento y los recursos humanos mediante la innovación tecnológica y la investigación para la salud hacia los padecimientos emergentes, las enfermedades no transmisibles y las lesiones [27]. Con respecto a la intensidad del tratamiento de rehabilitación, hay que garantizar que el paciente haga la máxima actividad terapéutica que pueda tolerar [28]. Por su parte, la OMS recomienda aumentar el acceso a medios tecnológicos auxiliares mejora la autonomía, fomenta la participación y puede reducir los costos de asistencia y apoyo [16]. Para que resulten apropiados, los dispositivos auxiliares deben estar adaptados tanto al entorno como al usuario e ir acompañados de un seguimiento adecuado.

Las terapias de rehabilitación neurológica asistidas manualmente tienen varias limitaciones importantes. La terapia de rehabilitación es un trabajo intensivo, por tanto la calidad de la terapia depende directamente de la fatiga del terapeuta. La consecuencia es que las sesiones de entrenamiento son más cortas de lo necesario para obtener una terapia de resultados óptimos. También, las terapias asistidas manualmente carecen de repetitividad y medidas objetivas del progreso del paciente [9] [29]. Otro punto importante es que los pacientes asistan a los centros de rehabilitación especializados, por lo que es necesario esquemas de rehabilitación a distancia.

Por el contrario, en la terapia asistida por robot, la duración y el número de sesiones de rehabilitación se pueden aumentar, mientras se compensa la ausencia de terapeutas

calificados. Las terapias automatizadas de larga duración parecen ser la única manera de hacer intensiva la rehabilitación. Además, el sistema puede ofrecer mediciones cuantitativas, de esta manera permite la evaluación objetiva de los progresos de rehabilitación, el cual también es un objetivo de este trabajo.

1.5. Objetivo general

El objetivo general de la tesis es el desarrollo de los medios básicos para construir sistemas robóticos para rehabilitación motora fina por movimientos funcionales, forzando la concentración del paciente (mediante retroalimentación visual y auditiva) en la tarea funcional de la escritura, adaptando la terapia a la capacidad del paciente, utilizando sistemas robóticos y tecnologías de la información.

1.5.1. Objetivos específicos

- Desarrollar una estructura de sistemas robóticos para rehabilitación motora fina, dividiendo el sistema en subsistemas llamados medios básicos.
- Establecer las especificaciones de cada uno de los medios básicos.
- Desarrollar el subsistema para formar la trayectoria del movimiento de un instrumento de escritura.
- Desarrollar el subsistema de control de la trayectoria de movimiento del robot el robot, por la interacción con el paciente.
- Desarrollar el subsistema de retroalimentación visual y auditiva.

- Desarrollar el subsistema de evaluación del estado del paciente, para la tarea funcional de escritura.
- Realizar la simulación del sistema de rehabilitación motora fina funcional basada en los medios básicos desarrollados.

1.6. Metodología

Para cumplir los objetivos de esta investigación se desarrollará la siguiente metodología, la cual consta de cuatro fases principales.

- Investigación del estado del arte: en esta fase se investigaran las características principales de los sistemas robóticos de rehabilitación motora fina utilizados a nivel mundial, así como las necesidades en rehabilitación en los centros especializados.
- Formulación de los objetivos y especificaciones del sistema de rehabilitación y sus subsistemas.
- Modelado matemático: en esta fase se modela matemáticamente el subsistema de formación de la trayectoria del movimiento del efector final de un manipulador robótico y del subsistema de control de la trayectoria.
- Desarrollo de los subsistemas: en esta fase se desarrollan los métodos, algoritmos y programas de los subsistemas.
- Simulación: en esta fase se hace la simulación física y virtual del sistema para la terapia de rehabilitación funcional motora fina basada en la tarea de escritura, con un robot de seis grados de libertad.

1.7. Delimitaciones

La investigación está enfocada al análisis y descripción de los elementos que componen un sistema robótico de rehabilitación motora fina funcional, desarrollando los subsistemas propuestos.

La simulación física del subsistema de seguimiento de la trayectoria de movimiento del robot está basada en la plataforma robótica PowerCube. El diseño de este robot industrial solo permite realizar un movimiento del efector final del estado reposo al estado reposo (tomar y poner) sin tener acceso a los controladores directamente. Esta restricción no permite programar el movimiento del efector final en el modo continuo, razón por la cual no permite realizar la interacción con el paciente. Aunado a esto también se carece de un sensor de fuerza par, para medir la interacción con el paciente. Por eso interpretamos la aplicación de este robot en el sistema desarrollado como la simulación física del sistema.

Debido a que el movimiento del lápiz mantiene una velocidad baja, la formación y control del movimiento del efector final se restringe al análisis cinemático, así como la aplicación de retroalimentación por fuerza.

1.8. Estructura del documento

El trabajo de tesis constará de siete capítulos los cuales se detallan a continuación.

El capítulo 1 presenta una breve introducción acerca de los sistemas robóticos de rehabilitación neuronal, los antecedentes, el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, la descripción del trabajo, la metodología, las delimitaciones y la estructura del documento.

En el capítulo 2 se mencionan brevemente algunos conceptos generales de neurorehabilitación. También se presentan aspectos matemáticos usados para representar la trayectoria de movimiento en términos de sistemas robóticos y por último se mencionan los distintos esquemas de control empleados por los principales sistemas robóticos de rehabilitación.

En el capítulo 3 se presenta la formación de la trayectoria de movimiento del instrumento de escritura mediante dos métodos; el primero es la formación de la trayectoria calculada y el segundo la formación de la trayectoria adquirida.

En el capítulo 4 se presenta el esquema general del subsistema de control de la trayectoria de movimiento del robot, el método para la selección de las configuraciones factibles, el método de generación de las trayectorias articulares y por último un esquema de control por interacción con el paciente. Así mismo, se presenta la visualización de las imágenes que presenten el movimiento de la punta del instrumento de escritura sobre la superficie de escritura para formar la retroalimentación visual del sistema.

El capítulo 5 presenta los métodos utilizados para la evaluación del paciente y la generación de los datos que pueden correlacionarse con las evaluaciones clínicas generales.

En el capítulo 6 se presenta la simulación física del sistema robótico de rehabilitación motora fina por el movimiento funcional de la escritura, basada en los medios básicos descritos en los capítulos anteriores. Se describe también el hardware, y el software, así como la plataforma de simulación utilizada. Finalmente se describen los resultados obtenidos en la simulación.

En el capítulo 7 se presentan las conclusiones así también se plantean los trabajos futuros y las líneas de investigación que se generan con este trabajo.

Por último se presentan los apéndices y la bibliografía que se utilizó en este trabajo de investigación.

1.9. Publicaciones

El trabajo de tesis generó las siguientes publicaciones mostradas en la tabla 1.

Tabla 1. Publicaciones realizadas con esta investigación

1	VitaliyRybak, A. Gustavo Rivera Morán, Dante Raúl Vásquez-Hernández, Ismael de Jesús Pérez-Velasco, Wilebaldo Martínez Velazco, Félix Emilio Luis Pérez, Omar Roberto Cruz Ortega. “Robótica Inteligente como una Innovación Tecnológica y su Aplicación en las Areas de Salud y Desarrollo Social y Educación”. Memorias del Foro
---	--

	de Investigación e Innovación Oaxaca 2011. 1-2 de diciembre de 2011. Oaxaca. México. ISBN en trámite.
2	VitaliyRybak, Wilebaldo Martínez Velazco. “Neurorehabilitación Motora Fina Funcional Asistida por Robot con la Formación Automática de la Trayectoria de Movimiento de un Instrumento de Escritura”. Congreso Nacional de Computación e Informática. CONACI 2012. Ciudad del Carmen, Campeche. México. Tomo IV. pp 133-140. ISBN: 978-607-7826-24-8.
3	VitaliyRybak, Wilebaldo Martínez Velazco. “Formación de los datos de control de un robot para neurorehabilitación funcional de la mano con ejercicios de escritura”. Revista Computación & Tecnología (versión electrónica). ISSN: 2007-2554. 2013. <i>Ha sido aceptado para formar parte de los contenidos que serán publicados en la revista CYT en su edición No. 4.</i>

Capítulo 2 | MARCO TEÓRICO

Para entender el tema de la robótica de rehabilitación, es necesario considerar ciertos aspectos neurológicos, nos dan la idea de la meta que se persigue en esta tesis. En este capítulo se mencionan brevemente algunos conceptos, sin revisar su evidencia neurofisiológica en detalle, enfocando en como las estrategias de control abordan los conceptos generales. También se presentan los distintos esquemas de control empleados en los sistemas de interacción humano robot.

2.1. Conceptos básicos sobre rehabilitación

2.1.1. Daño cerebral y plasticidad

El sistema nervioso central (SNC), es el encargado de controlar todas las funciones de los distintos aparatos del organismo por medio de conjuntos de células llamadas neuronas. Estas se agrupan en ciertas zonas del cerebro para controlar un órgano del cuerpo humano.

En la actualidad, se sabe que el daño cerebral es una expresión que alude a un conjunto de enfermedades y lesiones que afectan al SNC, entre las que destacan las patologías cardiovasculares (principal causa de discapacidad en adultos) y los traumatismos craneoencefálicos (que son la causa más frecuente de discapacidad en jóvenes). En menor medida, también se produce daño cerebral debido a tumores o infecciones [26]. Para los fines de esta investigación, las enfermedades y las lesiones en el SNC, responsables del daño neuronal, se denominarán **Evento Vascular Cerebral (EVC)**, según la definición de la OMS que engloba los dos casos [30]. Este daño cerebral causa que muchas de las capacidades que controla el cerebro se pierdan, entre estas las actividades de la vida diaria. En [15] se presenta una clasificación de las actividades por su finalidad principal, las cuales son movilidad, auto cuidado, comunicación y manejo de hardware ambiental. En esta

clasificación se ubica la tarea funcional de la escritura como una actividad de comunicación (ver Tabla 2), no obstante no se limita a esa clasificación. La capacidad de realizar acciones de motricidad fina con la mano recuperada por ejercicios de escritura involucra indirectamente todas las AVD [14].

Tabla 2. Actividades de la Vida Diaria (AVD).

Movilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Movilidad de cama • Movilidad de la silla de ruedas • Transferencias • Deambulaci3n • Subir escaleras
Auto cuidado	<ul style="list-style-type: none"> • Vestirse • Alimentarse a s3 mismo • Control de esf3nteres • Ba3arse • Peinarse
Comunicaci3n	<ul style="list-style-type: none"> • Escritura • Escribir/uso de la computadora • Llamadas telef3nicas • Utilizar dispositivos especiales de comunicaci3n
Hardware Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Llaves • Grifos • Los interruptores de las luces • Ventanas/puertas

Investigaciones recientes (casos cl3nicos y hechos experimentales) han demostrado que los seres humanos pueden eludir las deficiencias y los trastornos que son expresiones t3picas de lesiones cerebrales graves. Esta caracter3stica se conoce como Plasticidad Cerebral y es la base para las investigaciones en el 3rea de rehabilitaci3n neuronal. Una definici3n de plasticidad cerebral la proporciona Pascual-Castroviejo en [2] como “adaptaci3n funcional del sistema nervioso central para minimizar los efectos de las alteraciones estructurales o fisiol3gicas sea cual fuere la causa”.

2.1.2. Terapia de rehabilitación motora

Una vez ocurrido el EVC, el cuerpo se deshace de las células muertas (neuronas), las cuales no se regeneran nuevamente, y las funciones que controlaban posiblemente no se recuperen o se recuperen parcialmente. Aunado a esto, el EVC deteriora las funciones de otras células del cerebro que no resultaron dañadas. Después de algún tiempo es posible que regrese la funcionalidad en la zona dañada, cuando se “reencamina” la comunicación dentro del cerebro. Otra posibilidad es que otras áreas del cerebro que no se dañaron se hagan cargo de las tareas perdidas, esto en dependencia del grado de la lesión cerebral.

La terapia de rehabilitación motora, generalmente es una mezcla de enfoques entre los que destacan las técnicas de neurofacilitación, entrenamiento en tareas específicas y entrenamiento orientado a las tareas. Las técnicas de neurofacilitación engloban técnicas que ayudan al reentrenamiento motor normal o a inhibir el movimiento incorrecto. El entrenamiento de tareas específicas tiene como objetivo mejorar la habilidad en la realización de movimientos seleccionados o tareas funcionales. El entrenamiento orientado a las tareas se centra en la readaptación funcional de tareas, teniendo en cuenta la interacción de muchos sistemas, incluyendo los sistemas musculoesqueléticos, perceptivos, cognitivos y de los nervios [31].

La terapia de rehabilitación motora tradicional involucra terapia física y ocupacional, y esta varía en diferentes niveles del tratamiento, con sesiones que van desde los 30 a los 60 minutos en las fechas inmediatas al EVC, tendiendo a disminuir conforme pasa el tiempo. Según [31] el periodo de tiempo en el cual el paciente recibe terapia, varía dependiendo del grado de la lesión y del déficit funcional, y este generalmente dura 6 meses.

El objetivo de la terapia física es lograr que el paciente vuelva a aprender actividades motoras simples, tales como caminar, sentarse, ponerse de pie, acostarse, y el proceso de cambiar de un tipo de movimiento a otro. La terapia ocupacional incluye ejercicios y adiestramiento para ayudar a los pacientes a volver a aprender actividades cotidianas, tales como comer, beber y tragar, vestirse, bañarse, cocinar, leer y escribir, y el cuidado personal. El objetivo de la terapia ocupacional es ayudar al paciente a volverse independiente o alcanzar el nivel más alto posible de independencia. Este trabajo toma un

lugar importante entre las actividades de la terapia ocupacional, pues diversas pruebas de la funcionalidad toman la actividad de la escritura como una prueba de la eficacia de los tratamientos, por ejemplo [32], [33].

La Secretaría de Salud en México, publicó en 2009 una guía de referencia para la atención al paciente de EVC [34], en la cual se presenta un diagrama de flujo que resume los pasos a seguir desde que es diagnosticado el EVC en el paciente, hasta que es evaluado para ser dado de alta (ver fig. 6).

De esta guía ubicamos este trabajo en el área de las alteraciones motoras enfocadas a la recuperación de las alteraciones de las AVD, específicamente la actividad funcional de la escritura, y también en el área de evaluación de la funcionalidad del paciente.

2.2. Terapias de rehabilitación con robot.

En los últimos años, las terapias de rehabilitación motora con robots están siendo motivo de numerosas investigaciones. El paradigma general es usar un sistema robótico para interactuar físicamente con el paciente durante el entrenamiento motor, con el enfoque de entrenamiento orientado a tareas [4]. Sobre este punto, ha habido un progreso en el desarrollo de estrategias de control que especifican como el paciente interactúa con el sistema robótico de rehabilitación.

La meta de las estrategias de control es que los ejercicios seleccionados provoquen plasticidad motora y por lo tanto la recuperación motora. Según [5] actualmente existen tres principales estrategias de control para robots rehabilitadores:

- Pasiva: El paciente es inactivo y el robot mueve su brazo. Esta estrategia puede ser usada para prevenir contracturas musculares, pero es menos efectiva en estimulación motora.
- Activa asistida: El robot parcialmente asiste el movimiento del paciente. Este movimiento es usado cuando los pacientes están habilitados para iniciar un movimiento pero tiene dificultades en completar un movimiento dirigido a un objetivo.

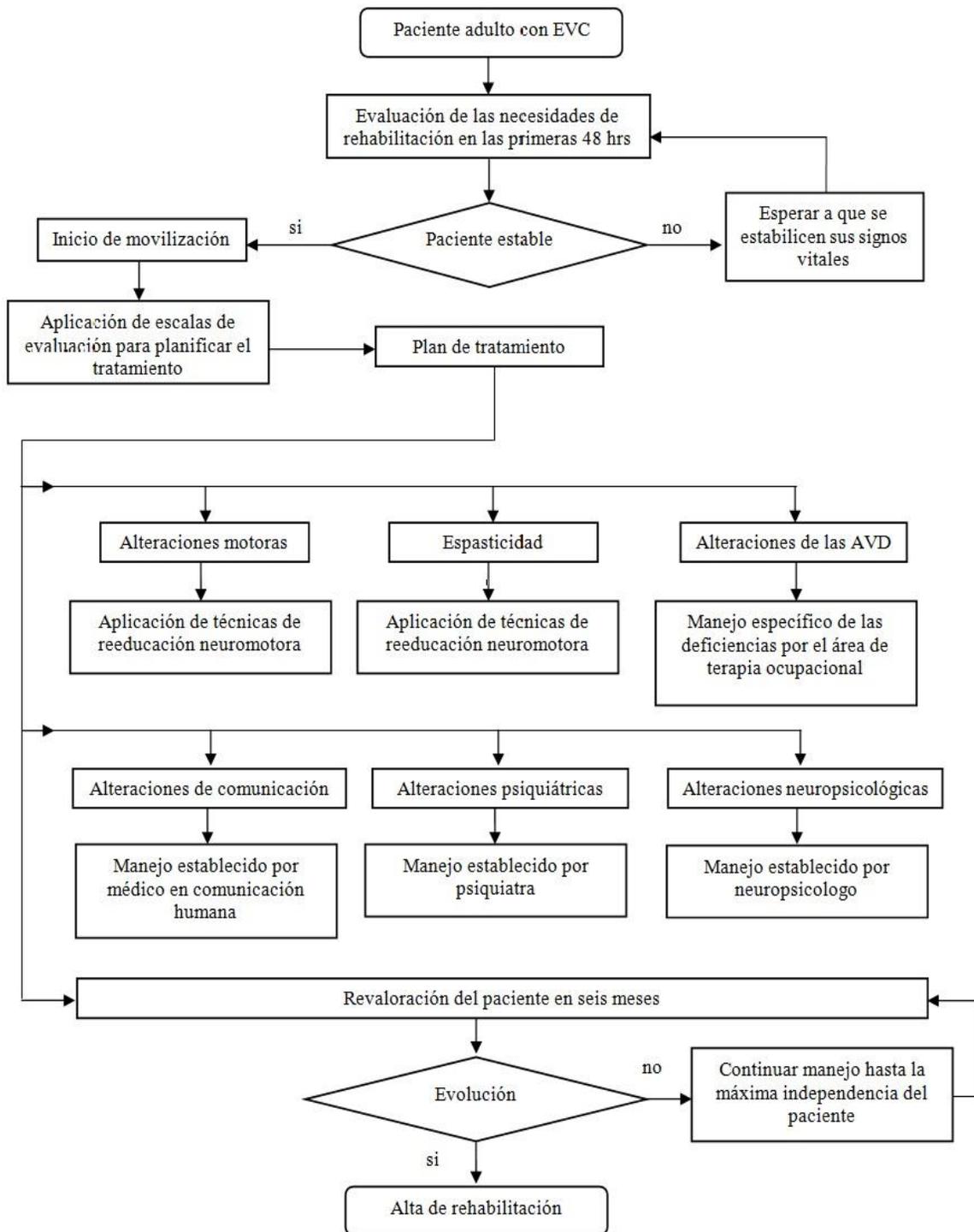


Fig. 6. Proceso de Rehabilitación de adultos con EVC.

- Activa restrictiva: Este modo fuerza la concentración, se enfoca particularmente a grupos de músculos y patrones de coordinación específicos.

Cabe hacer mención que la clasificación de [5] no es única, pues actualmente no existe una única clasificación acerca de este tema.

Se recomienda fuertemente por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos en su guía para el manejo de la rehabilitación [15] el uso de sistemas robóticos de rehabilitación para las extremidades superiores.

Los sistemas robóticos para rehabilitación ofrecen ventajas sobre la rehabilitación motora tradicional [5], algunas de estas son:

- ✓ Realizar movimientos repetitivos con la misma calidad (sin dependencia de la fatiga del terapeuta).
- ✓ Entrenamiento motivacional; los sistemas robóticos se pueden acoplar con sistemas de realidad virtual para proveer una terapia en forma de juegos o de tareas divertidas.
- ✓ Proveer entrenamiento activo y pasivo para pacientes con daño neuronal severo.
- ✓ Soportar el peso de la extremidad para pacientes con cierta capacidad de movimiento.
- ✓ Proveer la interacción física entre el robot y el paciente para una terapia activa.
- ✓ Recordar la información relacionada con el ejercicio (posición, velocidad, fuerza, etc.), para evaluación por el médico de los avances en la terapia de rehabilitación
- ✓ La duración y el número de sesiones de rehabilitación se pueden aumentar, mientras se compensa la ausencia de terapeutas calificados.

Para cumplir con los objetivos planteados, en este trabajo se desarrolla un esquema de control activo restrictivo con el enfoque de tareas funcionales.

Los sistemas activos restrictivos utilizados para rehabilitación, por su funcionamiento, deben de contar con un sistema de control interactivo, ya que involucran el contacto entre el robot y su entorno, en este caso, el paciente. Para abordar el problema de interacción se requiere de algoritmos de control con una estructura adecuada que combine el control de movimiento y el control de fuerza.

Los esquemas de control de bajo nivel, adecuados para los objetivos de rehabilitación son el control de impedancia, el control de fuerza y el control híbrido de fuerza posición. Estos esquemas de control necesitan recibir los datos del movimiento que realiza el paciente para ejecutar sus estrategias de movimiento. Generalmente son usados sensores de fuerza y momento. El control de impedancia representa una estrategia muy relevante en las tareas de interacción humano robots, obteniéndose excelentes resultados en tareas de fisioterapia asistida por robots [1]. El objetivo de este esquema de control consiste en ocasionar que el efector final del robot responda a fuerzas aplicadas externamente.

El control de velocidad (control de alto nivel) en el cual se enfoca esta tesis, también presupone el uso de sensores de fuerza que proporcionen información acerca del comportamiento del paciente para provocar la reacción del sistema.

Actualmente existen en el mercado diversos sensores de fuerza. Los rangos de medición de fuerza oscilan entre 50 y 500 N. La resolución típica es del orden del 0.1% de la fuerza máxima. En cuanto al procesamiento de las señales medidas y la generación de la salida, se tiene una frecuencia en muestreo del orden de 1 khz.

Capítulo 3 | FORMACIÓN DE LA TRAYECTORIA DE MOVIMIENTO

Uno de los retos más importantes de la rehabilitación robótica por movimientos funcionales es la formación de los movimientos específicos para realizar la tarea. Es por esa razón que en este capítulo se realiza un análisis detallado de la formación de la trayectoria de movimiento para la tarea funcional de la escritura por dos métodos. El método de formación de la trayectoria de movimiento calculada y el método de la formación de movimiento adquirida.

3.1. Especificaciones del subsistema de formación de la trayectoria

El movimiento funcional de escritura, involucra no solamente los dedos del paciente, sino también la muñeca y el antebrazo. En el enfoque de rehabilitación que se presenta en esta tesis, una correcta trayectoria de movimiento del instrumento de escritura (por el robot) induce al paciente en rehabilitación la sinergia necesaria para la tarea de la escritura, fundamental para generar plasticidad cerebral.

Como se mencionó en el planteamiento del problema (sección 1.3) se debe representar la trayectoria de movimiento tridimensional del instrumento de escritura en base al sistema de coordenadas del manipulador robótico, de tal manera que es necesario establecer los métodos que permitan alcanzar esta meta.

El subsistema recibe como entrada los valores de los datos (posición de la punta y orientación del instrumento de escritura) para cada punto del patrón de escritura, estos datos se presentan en el sistema de coordenadas del espacio de escritura. El subsistema calcula la

trayectoria de movimiento del instrumento de escritura respecto al sistema de coordenadas del robot. La salida del sistema es un conjunto de matrices de transformación del sistema de coordenadas del efector final del manipulador al sistema de coordenadas básico del robot. El diagrama de bloques del subsistema se presenta en la figura 7.

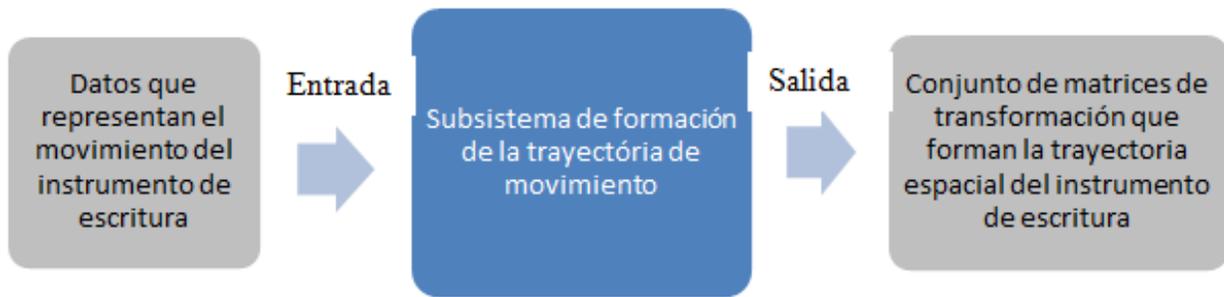


Fig. 7. Subsistema de formación de la trayectoria.

Se proponen dos métodos para formar la trayectoria de movimiento del instrumento de escritura:

- Formación de la trayectoria automática.
- Formación de la trayectoria adquirida.

En el método de formación de la trayectoria automática los datos generados son independientes del tiempo, mientras que para el método de formación de la trayectoria adquirida, los datos representan una trayectoria real de movimiento del instrumento de escritura (en función del tiempo).

Los parámetros necesarios para representar el movimiento del instrumento de escritura al realizar un dibujo, se explican en la sección 3.2. En las secciones 3.3 y 3.4 se presentan los detalles de los dos métodos propuestos.

Este subsistema solo presenta la posición y orientación del efector final del robot con respecto de su sistema de coordenadas básico, sin tomar en cuenta el tipo o la morfología del mismo. En el siguiente capítulo se considerarán aspectos de la cinemática del robot para la generación de las trayectorias articulares.

3.2. Variables que representan el movimiento del instrumento de escritura

Para representar la trayectoria de movimiento del instrumento de escritura, al realizar la tarea de escritura sobre un área específica, se requieren parámetros que asocien la posición de la punta del instrumento de escritura y su inclinación a un sistema de coordenadas del área mencionada. Para esto se asocia un sistema de coordenadas dextrógiro $o_e x_e y_e z_e$ al área de escritura, la posición de la punta O_p del instrumento de escritura quedará referenciada a este sistema de coordenadas como se muestra en la figura 8.

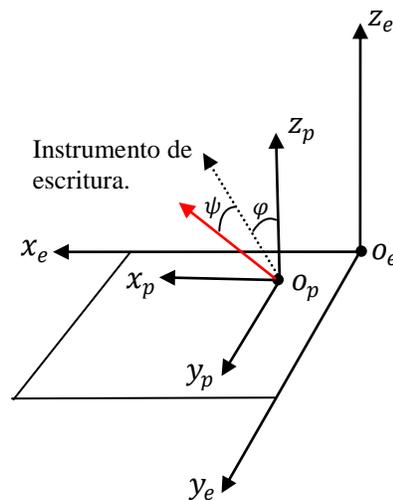


Fig. 8. Variables que representan el movimiento del instrumento de escritura.

A su vez, al instrumento de escritura se le asocia otro sistema de coordenadas dextrógiro $o_p x_p y_p z_p$ paralelo al sistema de coordenadas del área de escritura, cuyo origen es móvil y coincide con la punta del instrumento de escritura. Al escribir, la punta del instrumento de escritura se desplaza sobre la superficie de escritura en el plano $x_e y_e$ mientras que el cuerpo del instrumento de escritura se puede representar con una rotación con ángulo φ respecto al eje y_p en el plano $x_p z_p$ y una rotación con un ángulo $-\psi$ respecto al eje x_p en el plano $y_p z_p$, tal como se muestra en la figura 8. La trayectoria queda definida por las coordenadas de la punta del instrumento de escritura $p(x_e, y_e)$, los ángulos de

inclinación $(\varphi, -\psi)$ y el tiempo (t) en el que cambian estos valores. La tabla 3 muestra las variables para representar la trayectoria de movimiento del instrumento de escritura.

Tabla 3. Variables que representan la trayectoria de movimiento del instrumento de escritura.

Parámetros	Variable respecto a t
Posición de la punta	$(x(t), y(t))$
Inclinación	$(\varphi(t), \psi(t))$

Los dos métodos de formación de la trayectoria propuestos representan el movimiento del instrumento de escritura con los parámetros de formación de la trayectoria definidos en esta sección.

3.3. Modelado de la trayectoria de movimiento automática

El método de formación de la trayectoria de movimiento automática, obtiene el conjunto de matrices de transformación del sistema de coordenadas del efector final al sistema de coordenadas básico del manipulador robótico desde una secuencia de trazos (patrón de dibujo o escritura), relacionando la posición de la punta del instrumento de escritura $p(x_e, y_e)$, con valores definidos de los ángulos de inclinación $(\varphi, -\psi)$ del instrumento de escritura. El esquema de bloques modificado de la figura 7 se presenta en la figura 9.

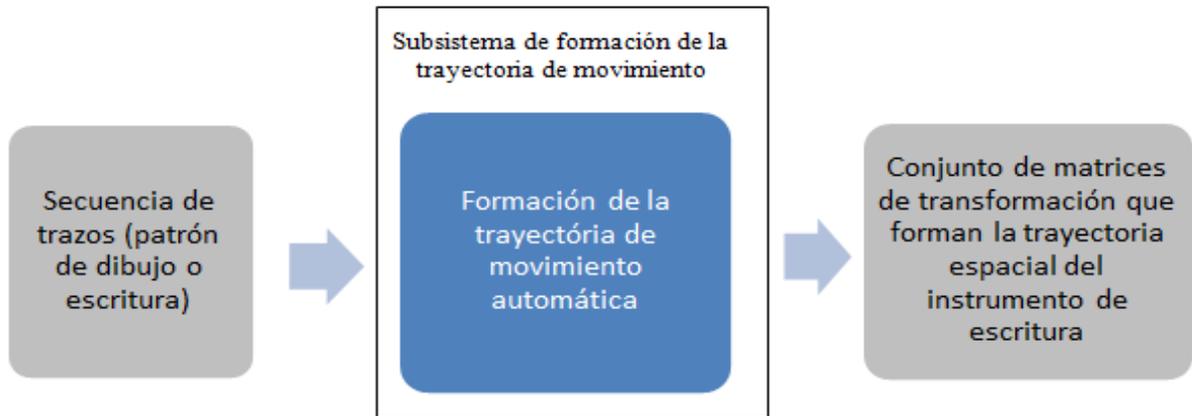


Fig. 9. Diagrama de bloques de la formación de la trayectoria de movimiento automática.

La formación de la trayectoria automática se realiza en dos fases, la primera es el establecimiento de la matriz de transformación de la rotación del instrumento de escritura que presenta el estado espacial del sistema de coordenadas del efector final con respecto al sistema de coordenadas básico del manipulador según la inclinación del instrumento de escritura; la segunda fase es la definición de la correspondencia entre la posición de la punta del instrumento de escritura y los ángulos de inclinación (φ y $-\psi$), los cuales determinan la orientación del efector final que va a mover el instrumento de escritura a lo largo de la trayectoria pre planeada.

3.3.1. Establecimiento de la matriz de transformación de la rotación del instrumento de escritura

Debido a que la trayectoria del instrumento se representa por la posición y orientación del efector final del manipulador robótico a utilizar, es necesario definir la matriz de transformación ${}^0T_{ef}$ que represente la posición y orientación del sistema de coordenadas del efector final del manipulador $o_{ef}x_{ef}y_{ef}z_{ef}$ con respecto al sistema de coordenadas básico del manipulador $o_0x_0y_0z_0$.

Para efectos de este análisis la matriz ${}^0T_{ef}$ se presenta por:

$${}^0T_{ef} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

donde L es la distancia desde la punta del instrumento de escritura hasta el origen del sistema de coordenadas del efector final o_{ef} . Se utiliza esta matriz de transformación pues esta corresponde con el sistema robótico en el cual se desarrollará la simulación física.

Se analiza el estado espacial del instrumento de escritura usado para explicar cómo se define la posición y orientación del efector final que provee la ubicación del instrumento de escritura en el estado espacial de escritura. La posición y orientación del eje del instrumento de escritura con respecto al sistema de coordenadas del efector final del manipulador $o_{ef} x_{ef} y_{ef} z_{ef}$ es tal que el origen del sistema de coordenadas o_{ef} coincide con el punto de agarre del instrumento de escritura y el eje del instrumento de escritura coincide con el eje x_{ef} . De esta manera se forma el vector $\overrightarrow{po_{ef}}$ donde p es la cola y o_{ef} es la cabeza del vector que define la posición del origen de sistema de coordenadas o_{ef} como se muestra en la Figura 10.

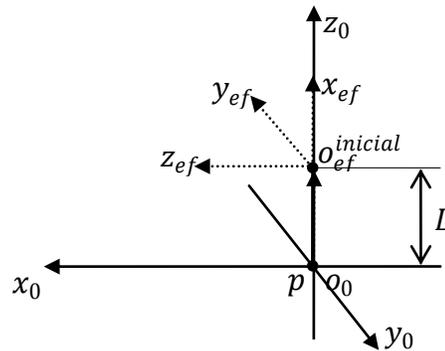


Fig.10. Estado espacial inicial del instrumento de escritura.

Inicialmente la cola del vector p coincide con el origen del sistema de coordenadas básico del manipulador y la cabeza del vector se ubica en el eje z_0 del sistema de coordenadas básico. Las direcciones de los ejes y_{ef} y z_{ef} coinciden con las direcciones de los ejes $-y_0$ y x_0 respectivamente.

Por la rotación del vector $\overrightarrow{pO_{ef}}$ con un ángulo φ respecto al eje y_0 se logra la inclinación del instrumento de escritura en el plano x_0z_0 como se muestra en la figura 11. El estado espacial correspondiente del sistema de coordenadas del efector final se define por la matriz de transformación:

$${}^0T_{ef}^{(\varphi)} = T_{Rot,y_0,\varphi} {}^0T_{ef}^{(inicial)} \quad (3.2)$$

donde:

$$T_{Rot,y_0,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

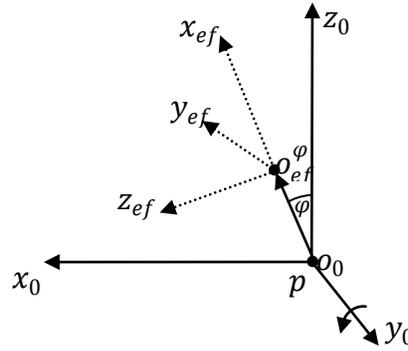


Fig. 11. Estado espacial del instrumento de escritura con giro respecto del eje y_0 .

Por la rotación del vector $\overrightarrow{pO_{ef}}$ con un ángulo $-\psi$ respecto al eje x_0 se logra la inclinación del instrumento de escritura fuera del plano x_0z_0 en la dirección del eje y_0 como se muestra en la figura 12. El estado espacial correspondiente del sistema de coordenadas del efector final se define por la matriz de transformación:

$${}^0T_{ef}^{(\varphi,\psi)} = T_{Rot,x_0,\psi} {}^0T_{ef}^{(\varphi)} \quad (3.4)$$

donde:

$$T_{Rot,x_0,\psi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.3.2. Definición de la correspondencia entre la posición de la punta del instrumento de escritura y la orientación del efector final del robot

Una vez que se tiene la matriz de transformación que relaciona la orientación del instrumento de escritura respecto del sistema de coordenadas básico del manipulador, se definen los ángulos correspondientes $\varphi^{(i)}$ y $\psi^{(i)}$ para que la punta del instrumento de escritura alcance la posición i -ésima $p_i(x_p^{(i)}, y_p^{(i)}, 0)$ sobre el área de escritura al realizar el trazo, limitada por los valores x_p^{max} y y_p^{max} . Para esto se establece un área factible para escritura por el robot, a la cual se le asigna un sistema de coordenadas dextrógiro $o_e x_e y_e z_e$ con su origen o_e en las coordenadas ${}^0x_{oe}, {}^0y_{oe}, {}^0z_{oe}$ respecto del sistema de coordenadas básico del manipulador y con sus ejes paralelos a los ejes del sistema de coordenadas básico del manipulador como se aprecia en la figura 13.

Inicialmente se define el rango de variación de los valores de los ángulos $\varphi^{(i)}$ y $\psi^{(i)}$, como:

$$\varphi_{min} \leq \varphi^{(i)} \leq \varphi_{max} \quad \psi_{min} \leq \psi^{(i)} \leq \psi_{max} \quad (3.7)$$

Se establece una rejilla de $M \times N$ sobre el área de escritura, la cual definirá la correspondencia entre las coordenadas del punto $p_i(x_p^{(i)}, y_p^{(i)}, 0)$ y los valores de los ángulos $\varphi^{(i)}$ y $\psi^{(i)}$. La graduación de la rejilla se define por los valores de m y n como:

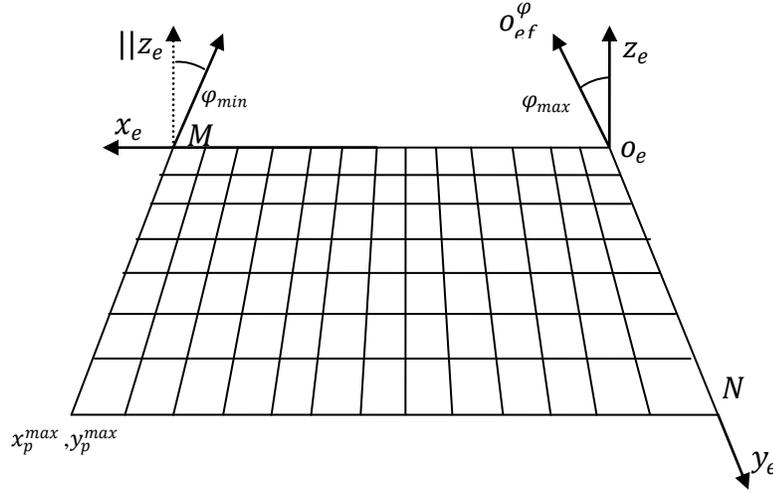


Fig. 13. Área factible para escritura con sus características.

$$m = \frac{x_p^{max}}{M} \quad n = \frac{y_p^{max}}{N} \quad (3.8)$$

La resolución de los ángulos φ y ψ se define como:

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{min}}{M} \quad \Delta\psi = \frac{\psi_{max} - \psi_{min}}{N} \quad (3.9)$$

Los valores máximos φ_{max} y ψ_{max} se hacen corresponder con el origen del sistema de coordenadas del área de escritura o_e . Los valores de los ángulos $\varphi^{(i)}$ y $\psi^{(i)}$ para la posición i -ésima $p_i(x_p^{(i)}, y_p^{(i)}, 0)$ se definen como:

$$\varphi^{(i)} = \varphi_{max} - \frac{x_p^i}{m} \Delta\varphi \quad \psi^{(i)} = \psi_{max} - \frac{y_p^i}{n} \Delta\psi \quad (3.10)$$

La posición y orientación resultantes del sistema de coordenadas del efector final del manipulador con respecto al sistema de coordenadas básico del manipulador queda definido por la matriz de transformación:

$${}^0T_{ef}^{(i)} = \begin{bmatrix} \sin \varphi^i & 0 & \cos \varphi^i & {}^0x_{oe} + x_p^i + L \sin \varphi^i \\ \cos \varphi^i \sin \psi^i & -\cos \psi^i & -\sin \varphi^i \sin \psi^i & {}^0y_{oe} + y_p^i + L \cos \varphi^i \sin \psi^i \\ \cos \varphi^i \cos \psi^i & \sin \psi^i & -\sin \varphi^i \cos \psi^i & {}^0z_{oe} + L \cos \varphi^i \cos \psi^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.4. Modelado de la trayectoria de movimiento adquirida

El método de formación de la trayectoria de movimiento adquirida, obtiene el conjunto de matrices de transformación (del sistema de coordenadas del efector final al sistema de coordenadas básico del manipulador robótico) que producen la trayectoria espacial del instrumento de escritura desde los datos recibidos de una Tableta Digitalizadora de tecnología electromagnética. El esquema de bloques modificado de la figura 7 se presenta en la figura 14.

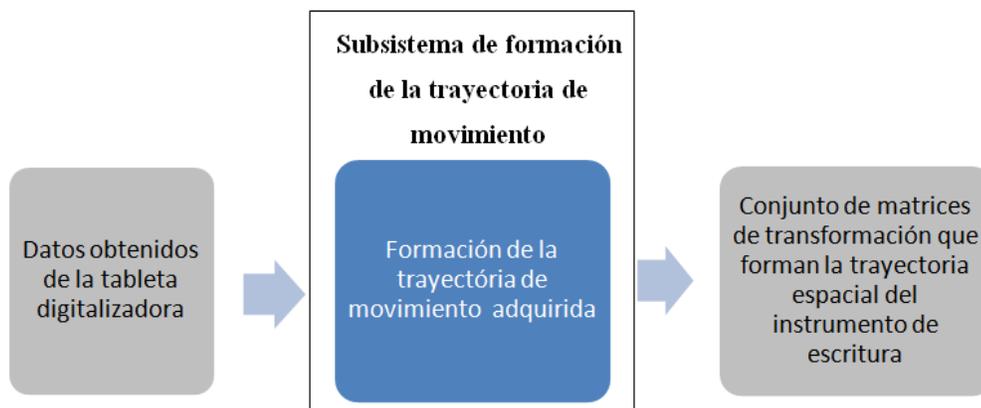


Fig. 14. Diagrama de bloques de la formación de la trayectoria de movimiento adquirida.

3.4.1. Método para obtener la orientación de un vector unitario a partir de la proyección de una recta en dos planos normales

La trayectoria de un instrumento de escritura se obtiene por medio de una Tableta Digitalizadora Grafica. Los datos obtenidos (posición y orientación) hacen referencia a un sistema de coordenadas (S.C.) propio que posee la tableta. Este S.C. es levógiro y se denomina $O_T X_T Y_T Z_T$.

La posición se recibe por las coordenadas (X_T, Y_T) , que corresponde con el pixel que es tocado por la punta del lápiz sobre el área de escritura de la tableta. La orientación del lápiz con respecto al S.C. propio de la tableta se recibe por los ángulos φ_1 y φ_2 . φ_1 es el ángulo entre el eje Z_T y la proyección del eje del lápiz contra el plano $O_T X_T Z_T$. φ_2 es el ángulo entre el eje Z_T y la proyección del eje del lápiz contra el plano $O_T Y_T Z_T$.

Con este método se obtiene un vector unitario que representa la orientación del lápiz con respecto al S.C. propio de la tableta.

1. Se asigna un S.C. dextrógiro al área de escritura de la tableta, denominado $OXYZ$. Se hace coincidir el origen del nuevo S.C. con el origen del S.C. propio de la tableta, el eje X con el eje Y_T y el eje Y con el eje X_T .
2. Se denominada L_1 a la recta sobre el plano OYZ , que pasa por el origen y tiene un ángulo φ_1 con respecto al eje Z . \hat{n}_1 es el vector normal unitario a L_1 ubicado en el plano OYZ , el cual coincide con el vector normal unitario al plano S_1 que pasa a través del eje del lápiz y L_1 (ver fig. 15).

$$\hat{n}_1 = (0, -\cos \varphi_1, \text{sen } \varphi_1)$$

3. Se denominada L_2 a la recta sobre el plano OXZ , que pasa por el origen y tiene un ángulo φ_2 con respecto al eje Z . \hat{n}_2 es el vector normal unitario a L_2 ubicado en el plano OXZ , el cual coincide con el vector normal unitario al plano S_2 que pasa a través del eje del lápiz y L_2 (ver fig. 16).

$$\hat{n}_2 = (\cos \varphi_2, 0, -\text{sen } \varphi_2) \quad (3.12)$$

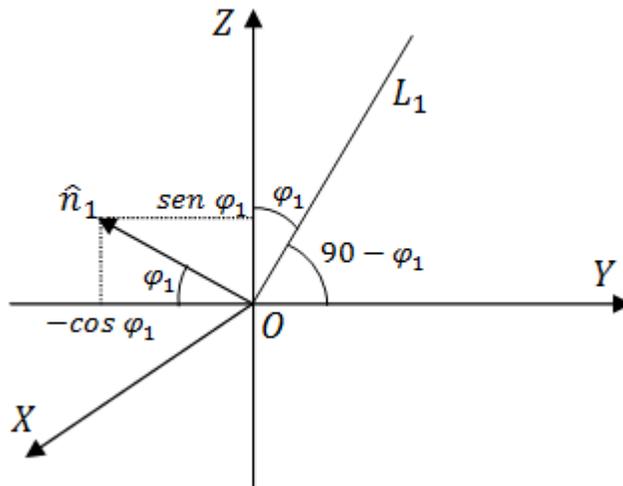


Fig. 15. Ubicación del vector unitario \hat{n}_1 .

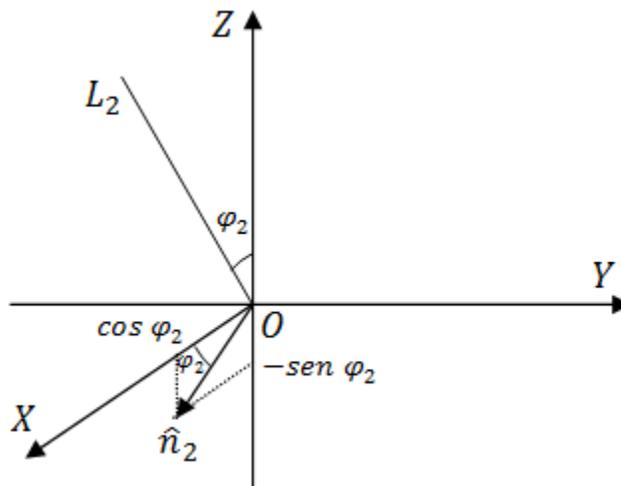


Fig. 16. Ubicación del vector unitario \hat{n}_2 .

4. El eje del lápiz coincide con la recta que es la línea de intersección de los planos S1 y S2. El vector unitario que coincide con la línea de intersección se define por el producto vectorial de \hat{n}_1 y \hat{n}_2 .

$$\hat{n}_l = \hat{n}_1 \times \hat{n}_2 \quad (3.13)$$

$$\hat{n}_l = (\cos\phi_1 \text{sen}\phi_2, \text{sen}\phi_1 \cos\phi_2, \cos\phi_1 \cos\phi_2)^T \quad (3.14)$$

3.4.2. Método de calibración del sistema de coordenadas del área para escritura por el robot

La trayectoria de un lápiz al escribir se obtiene por medio de una tableta digitalizadora. Los datos obtenidos (posición e inclinación del lápiz) hacen referencia a un sistema de coordenadas (S.C.) propio que posee la tableta. Este S.C. es levógiro al cual denominamos $O_T X_T Y_T Z_T$.

Se requiere definir, dentro del espacio alcanzable para escritura por el robot, un área del mismo tamaño que el área de escritura de la tableta con S.C. coincidente. Sobre esta área, el robot reproducirá la trayectoria del lápiz adquirida con la tableta. Debido a que los S.C. del área de obtención y de reproducción de la trayectoria se han hecho coincidir, al área coincidente se le llamará “área de escritura”.

Para que el robot pueda reproducir la trayectoria obtenida con la tableta, es necesario relacionar el S.C. del área de escritura al S.C. básico del robot.

Con este método de calibración se recibe una matriz de transformación que relaciona el S.C. del área de escritura con el S.C. del robot.

1. Se asigna un S.C. dextrógiro al área de escritura, al cual denominamos $o_T x_T y_T z_T$. Se hace coincidir el origen del nuevo S.C. con el origen del S.C. propio de la tableta, el eje x_T con el eje Y_T y el eje y_T con el eje X_T .
2. Se identifican tres puntos específicos sobre el área de escritura; el punto P_{O_T} corresponde con el origen del S.C. $o_T x_T y_T z_T$, el punto P_x corresponde con un punto cercano a la máxima distancia sobre el eje x_T del área de escritura y el punto P_y corresponde con un punto cercano a la máxima distancia sobre el eje y_T del área de escritura.
3. Con el manipulador se toma una aguja que se representa por el vector ${}^n \vec{V}_{ag} = (0, 0, l)^T$ que define la posición del punto terminal de la aguja con respecto al sistema de coordenadas del efector final. El valor de l es conocido. Con la aguja se

tocan los tres puntos especificados y se obtiene el valor de los ángulos de las articulaciones del manipulador $(\theta_1, \dots, \theta_n)$ para cada uno de estos puntos, donde n es el número de articulaciones del manipulador

- Mediante la solución del problema de cinemática directa se obtiene la matriz de transformación 0T_n del S.C. del efector final al S.C. básico del manipulador. Los vectores de posición de los puntos especificados sobre el área de escritura, con respecto al S.C. básico del manipulador, se encuentra multiplicando la matriz 0T_n de cada uno de los puntos por el vector ${}^n\vec{V}_{ag}$.

$$\begin{aligned} {}^0\vec{P}_{Or} &= {}^0T_n {}^n\vec{V}_{ag} \\ {}^0\vec{P}_x &= {}^0T_n^x {}^n\vec{V}_{ag} \\ {}^0\vec{P}_y &= {}^0T_n^y {}^n\vec{V}_{ag} \end{aligned} \quad (3.15)$$

- Con los vectores de posición de los puntos se obtienen los vectores unitarios del eje x_T y del eje y_T con respecto al S.C. básico del manipulador.

$$\frac{{}^0\vec{P}_x - {}^0\vec{P}_{Or}}{|{}^0\vec{P}_x - {}^0\vec{P}_{Or}|} = {}^0\hat{x}_T = \begin{bmatrix} \cos \alpha_x \\ \cos \alpha_y \\ \cos \alpha_z \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\frac{{}^0\vec{P}_y - {}^0\vec{P}_{Or}}{|{}^0\vec{P}_y - {}^0\vec{P}_{Or}|} = {}^0\hat{y}_T = \begin{bmatrix} \cos \beta_x \\ \cos \beta_y \\ \cos \beta_z \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

- El vector unitario del eje z se obtiene por el producto cruz de los vectores unitarios del eje x y del eje y .

$${}^0\hat{z}_T = {}^0\hat{x}_T \times {}^0\hat{y}_T = \begin{bmatrix} \cos \gamma_x \\ \cos \gamma_y \\ \cos \gamma_z \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

7. Con los vectores unitarios se forma la matriz de transformación final 0T_T que relaciona al S.C. del área de escritura con el S.C. del robot.

$${}^0T_T = \begin{bmatrix} \cos \alpha_x & \cos \beta_x & \cos \gamma_x & {}^0x_{OT} \\ \cos \alpha_y & \cos \beta_y & \cos \gamma_y & {}^0y_{OT} \\ \cos \alpha_z & \cos \beta_z & \cos \gamma_z & {}^0z_{OT} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

donde ${}^0x_{OT}$, ${}^0y_{OT}$ y ${}^0z_{OT}$ son las coordenadas del origen del S.C. del área de escritura ${}^0\vec{P}_{Or}$ con respecto al S.C. básico del manipulador, definidas en el punto 4.

3.4.3. Método para obtener la matriz de transformación del sistema de coordenadas del efector final al sistema de coordenadas básico del robot

La trayectoria de un lápiz al escribir se obtiene por medio de una Tableta Digitalizadora Grafica. Los datos obtenidos (posición y orientación) hacen referencia a un sistema de coordenadas (S.C.) propio que posee la tableta.

Previamente en la sub sección 3.4.1 se han recibido los vectores \hat{n}_1 , \hat{n}_2 y \hat{n}_l que relacionan la orientación del lápiz de la tableta con respecto a su S.C propio. También se ha recibido la matriz de transformación 0T_T del S.C. del área de escritura con el S.C del robot en la sub sección 3.3.2.

1. Establecer la orientación de los ejes unitarios del S.C. del efector final con respecto al S.C. de la tableta.

$${}^T\hat{x}_n = \hat{n}_l \quad (3.20)$$

$${}^T\hat{y}_n = \hat{n}_1 \quad (3.21)$$

$${}^T\hat{z}_n = {}^T\hat{x}_n \times {}^T\hat{y}_n = \hat{n}_l \times \hat{n}_1 = \hat{n}_2 \quad (3.22)$$

2. En el S.C. de la tableta, las coordenadas del origen del S.C. del efector final O_n para la posición de la punta $P_l = (x_p, y_p, 0)$ del lápiz en el área de escritura de la tableta, define el vector ${}^T\vec{O}_n = ({}^T x_n, {}^T y_n, {}^T z_n)^T$.

donde:

$$\begin{aligned} {}^T x_n &= x_p + L n_l(x) \\ {}^T y_n &= y_p + L n_l(y) \\ {}^T z_n &= 0 + L n_l(z) \end{aligned} \quad (3.23)$$

3. Se define la matriz de transformación del S.C. del efector final al S.C. de la tableta para $n=6$.

$${}^T T_6 = \begin{bmatrix} {}^T \hat{x}_6 & {}^T \hat{y}_6 & {}^T \hat{z}_6 & {}^T \vec{O}_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

4. Finalmente se recibe la matriz de transformación del S.C. del efector final al S.C. básico del robot.

$${}^0 T_6 = {}^0 T_T {}^T T_6 \quad (3.25)$$

3.5. Método de corrección del ángulo de inclinación del instrumento de escritura

Los métodos de formación de la trayectoria por si solos no garantizan que se puedan alcanzar todos los ángulos de inclinación, pues está en dependencia de la configuración física del robot manipulador a utilizar. Para el caso hipotético mostrado en la figura 17, los puntos O_4 y O_6 corresponden a los extremos del último segmento del manipulador. La posición de O_4 depende de los valores de φ_1 y φ_2 (definidos en la sección 3.4), de tal manera que cuando sobrepasan un valor específico, O_4 corta con la superficie de escritura.

Para resolver parcialmente este problema, se considera aplicar un giro al S.C. del gripper $O_6 \hat{x}_6 \hat{y}_6 \hat{z}_6$ con un ángulo $-\alpha$ respecto al eje \hat{y}_6 . De esta forma la matriz de

transformación ${}^T T_6$, que relaciona el S.C. matriz de transformación del S.C. del efector final al S.C. de la tableta, se convierte en ${}^T T_{6,g}$ (ver fig. 18).

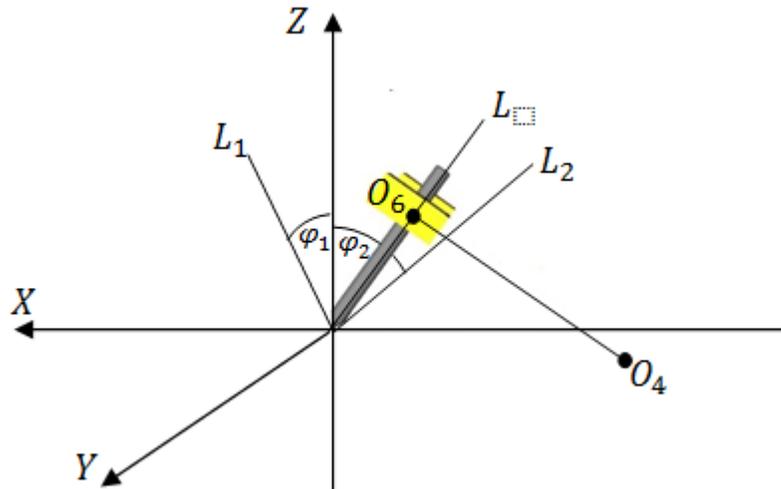


Fig. 17. Límite físico de la posición del último elemento del manipulador.

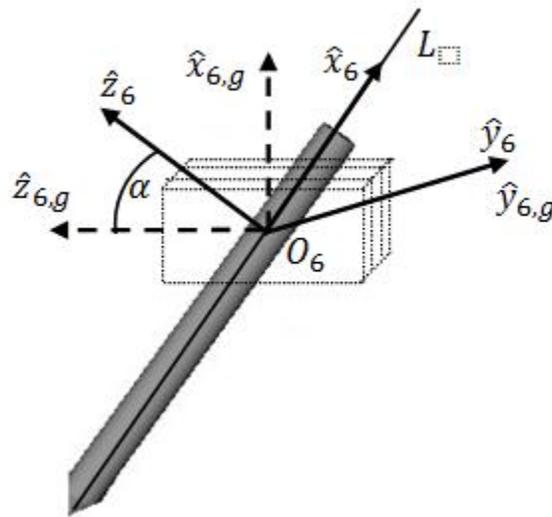


Fig. 18. El instrumento de escritura se gira con respecto al sistema de coordenadas del efector final.

1. Se establece la matriz de transformación ${}^T T_{giro}$ que define el giro del S.C del efector final con respecto del eje \hat{y}_6 .

$${}^T T_{giro} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

2. Se multiplica por la matriz de transformación ${}^T T_6$ y se obtiene la matriz de transformación ${}^T T_{6,g}$ del S.C del efector final ya girado respecto a \hat{y}_6 .

$${}^T T_{6,g} = {}^T T_6 {}^T T_{giro} \quad (3.27)$$

$${}^T T_{6,g} = \begin{bmatrix} \cos \alpha x_{\hat{n}_1} + \sin \alpha x_{\hat{n}_2} & x_{\hat{n}_1} - \sin \alpha x_{\hat{n}_1} + \cos \alpha x_{\hat{n}_2} & {}^T x_6 \\ \cos \alpha y_{\hat{n}_1} + \sin \alpha y_{\hat{n}_2} & y_{\hat{n}_1} - \sin \alpha y_{\hat{n}_1} + \cos \alpha y_{\hat{n}_2} & {}^T y_6 \\ \cos \alpha z_{\hat{n}_1} + \sin \alpha z_{\hat{n}_2} & z_{\hat{n}_1} - \sin \alpha z_{\hat{n}_1} + \cos \alpha z_{\hat{n}_2} & {}^T z_6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$${}^T T_{6,g} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \sin \alpha \cos \varphi_2 & 0 & -\sin \alpha \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \alpha \cos \varphi_2 & {}^T x_6 \\ \cos \alpha \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 & -\cos \varphi_1 & -\sin \alpha \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 & {}^T y_6 \\ \cos \alpha \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \alpha \sin \varphi_2 & \sin \varphi_1 & -\sin \alpha \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \alpha \sin \varphi_2 & {}^T z_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Finalmente se recibe la matriz de transformación del S.C. del efector final al S.C. básico del robot.

$${}^0 T_{6,g} = {}^0 T_T {}^T T_{6,g} \quad (3.29)$$

Capítulo 4 | CONTROL DE LA TRAYECTORIA DE MOVIMIENTO DEL ROBOT

En este capítulo se presenta el esquema general del subsistema de control de la trayectoria de movimiento del robot, el método para la generación de las trayectorias articulares, el esquema de control por interacción con el paciente, el cálculo del cambio en la velocidad de la trayectoria por splines cúbicos, y por último se detalla el subsistema de retroalimentación visual y auditiva.

4.1. Especificaciones del subsistema de control de movimiento del robot.

Hasta este punto, la trayectoria que debe seguir el instrumento de escritura para realizar la terapia, ha sido especificada en el espacio tridimensional como un conjunto de matrices de transformación que relacionan el sistema de coordenadas del efector final del manipulador robótico con respecto al sistema de coordenadas básico del manipulador. Sin embargo, para el control del movimiento del robot, la trayectoria del movimiento del efector final debe de especificarse en términos de las articulaciones del manipulador utilizado (espacio articular). En la figura 19 se ilustra el cambio de espacios que se realiza desde el patrón de escritura (figura en el plano de escritura), pasando por la trayectoria espacial del efector final del manipulador hasta los valores de las articulaciones del robot.

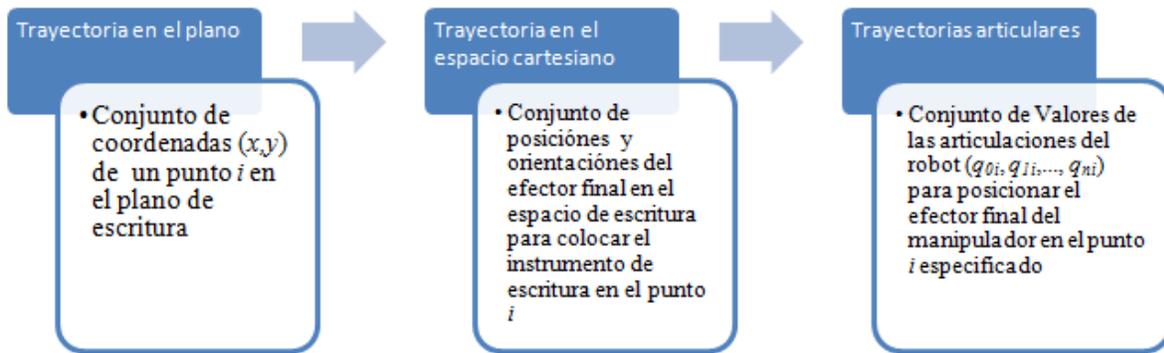


Fig. 19. Cambio de espacios involucrados en el sistema propuesto.

Una vez establecidas las trayectorias articulares del sistema robótico, el siguiente paso es aplicar un sistema de control que permita la interacción con el paciente a fin de generar en el paciente la plasticidad cerebral. Para ello se diseñó un algoritmo de control de alto nivel que mueva el sistema robótico de acuerdo con la resistencia que opone el paciente al realizar los ejercicios.

La figura 20 muestra el diagrama a bloques del subsistema, el cual se conforma por un módulo generador de las trayectorias articulares y un módulo de control de la velocidad por interacción con el paciente. El subsistema recibe como entrada las matrices de transformación generadas en el subsistema de formación de la trayectoria. Como salida se generan los valores del estado de las articulaciones del robot que provocan el movimiento del robot que guía el instrumento de escritura en los ejercicios de rehabilitación funcionales.

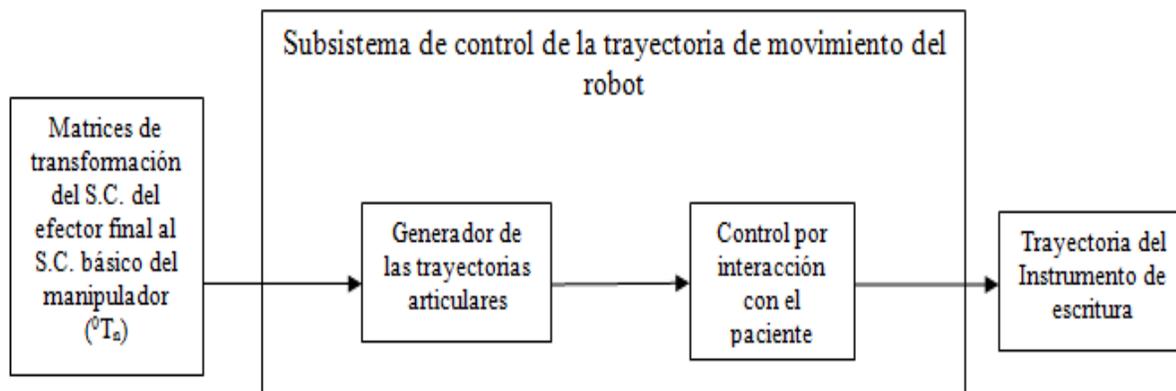


Fig. 20. Diagrama a bloques del subsistema de seguimiento de la trayectoria.

Los valores articulares de la trayectoria espacial del instrumento de escritura dependen de la morfología del robot que se utilice, ya sea que se emplee algún tipo de robot industrial o se diseñe especialmente para esta aplicación. Los aspectos relevantes del sistema robótico a utilizar son el número de articulaciones, el esquema cinemático, el espacio de trabajo y el tipo de control de los servomotores.

4.2. Generación de las trayectorias articulares

Como se mencionó anteriormente, la finalidad del subsistema de control del movimiento del robot es encontrar las configuraciones del brazo robótico que permitan seguir la trayectoria del efector final, generadas en el subsistema de formación de la trayectoria. Esto se logra encontrando el conjunto de configuraciones del manipulador robótico (trayectorias articulares) que producen la trayectoria del instrumento de escritura según las matrices de transformación 0T_n , por medio de la solución del problema cinemático inverso y la selección de la configuración más adecuada posible, a la que se denomina configuración factible. Para escoger la configuración factible se utiliza una heurística de restricción espacial que depende del modelo geométrico del manipulador a utilizar y del espacio de trabajo permitido.

El diagrama de bloques del módulo generador de las trayectorias articulares se presenta en la figura 21. El módulo recibe como entrada la matriz de transformación 0T_n que relaciona el sistema de coordenadas del efector final del manipulador robótico al sistema de coordenadas básico del manipulador. A esta matriz se le aplica la solución del problema cinemático inverso y finalmente se escoge la mejor solución. Como salida se obtiene la configuración (conjunto de valores de los ángulos) del brazo robótico más óptima. Las configuraciones factibles para cada matriz 0T_n serán los datos que recibirá el sistema robótico a utilizar.

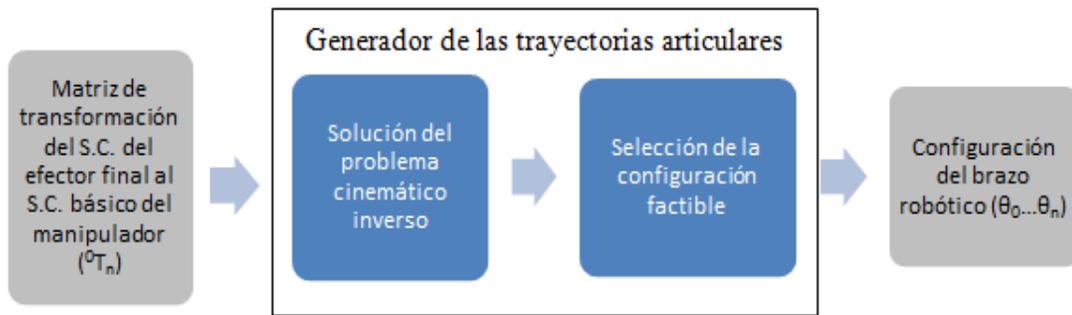


Fig. 21. Diagrama a bloques del módulo generador de las trayectorias articulares.

4.2.1. Cálculo de las trayectorias articulares por cinemática inversa

La matriz resultante en (3.11) y (3.19), para el caso de la trayectoria calculada y la trayectoria adquirida respectivamente, puede tener diversas soluciones, esto en dependencia directa del esquema cinemático del sistema robótico utilizado. El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las articulaciones del robot $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. Así como es posible abordar el problema cinemático directo de una manera sistemática a partir de la utilización de matrices de transformación homogéneas, no ocurre lo mismo con el problema cinemático inverso, siendo el procedimiento de obtención de las ecuaciones fuertemente dependiente del esquema cinemático del robot.

En este trabajo existe la restricción de que el espacio de trabajo del manipulador está sobre un área plana fija (superficie de escritura), razón por la cual es necesario encontrar todas las soluciones posibles del problema cinemático inverso. El conocer todas las configuraciones posibles permite la selección de la trayectoria más adecuada de acuerdo a las restricciones planteadas, en este caso, la restricción espacial. La implementación para un robot de seis grados de libertad (6 DOF) se muestra en el capítulo 6.

La tabla 4 muestra un ejemplo de la matriz de transformación del efector final del robot de seis grados de libertad PowerCube con respecto a su sistema de coordenadas básico y la tabla 5 muestra todas sus soluciones posibles.

Tabla 4. Matriz de transformación final para el robot de seis grados de libertad PowerCube.

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} 0.61541397 & 0.04669466 & 0.99701166 & 698.1435 \\ 0.01059369 & -0.99887931 & 0.0461288 & -38.78815460 \\ 0.99804825 & 0.00772321 & -0.06196711 & 31.866901398 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tabla 5. Configuraciones encontradas después de resolver el problema cinemático inverso.

Configuración	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
a	11.12	10.03	52.973	91.892	-81.279	49.362
b	11.12	10.30	-127.027	-91.892	81.279	-130.638
c	-17.1	-32	31.5	-93.2	53	020.825
d	-17.1	-32	-148.5	93.2	-53	-159.175

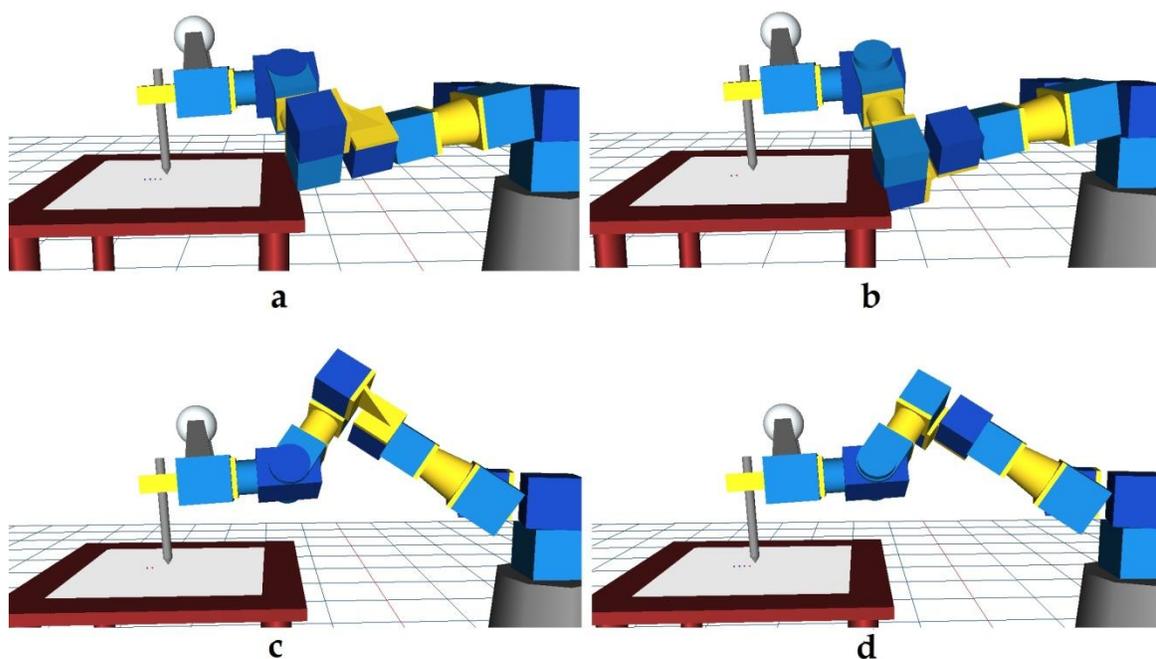


Fig. 22. Distintas configuraciones para la solución del problema cinemático inverso del robot de seis grados de libertad PowerCube.

En la figura 22 se aprecia la implementación de las configuraciones halladas por cinemática inversa mostradas en la tabla 5, con el simulador del sistema robótico PowerCube desarrollado en [35]. Las soluciones **a** y **b** presentan el inconveniente de que sus elementos invaden el espacio restringido por la colocación de la superficie de escritura, mientras que las soluciones **c** y **d** permiten el movimiento libre del instrumento de escritura. El sistema debe proveer la capacidad de detectar automáticamente la configuración factible, para tal objetivo se presenta un algoritmo en la siguiente sub sección.

4.2.2. Selección de la configuración factible

La selección de la configuración factible debe garantizar la continuidad en el movimiento del instrumento de escritura en una trayectoria libre de obstáculos. En este trabajo se considera el área de escritura como una restricción espacial en la que podrían colisionar los diferentes elementos del sistema robótico. Del capítulo 3 se conoce que el área de escritura tiene asignado un sistema de coordenadas dextrógiro $o_e x_e y_e z_e$ con su origen o_e en las coordenadas ${}^0x_{oe}, {}^0y_{oe}, {}^0z_{oe}$ respecto del sistema de coordenadas básico del manipulador y con sus ejes paralelos a los ejes del sistema de coordenadas básico del manipulador como se aprecia en la figura 23.

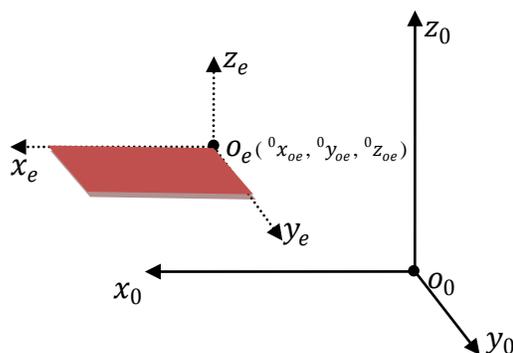


Fig.23. Posición del área de escritura con respecto al sistema de coordenadas básico del manipulador.

Para la selección de la configuración factible, es necesario determinar los valores de los ángulos del robot de tal manera que coloquen los elementos del manipulador por encima del valor de ${}^0z_{oe}$. Es sabido que cada elemento del sistema robótico tiene asociada una matriz homogénea 0A_n que representa la posición y orientación del elemento n con respecto al sistema de coordenadas básico del manipulador, de tal manera que se puede conocer si el elemento se encuentra en el espacio restringido.

Se propone seguir los siguientes pasos para seleccionar el conjunto de configuraciones factibles.

1. Establecer las restricciones espaciales del plano de escritura tomando como referencia el sistema de coordenadas básico del manipulador.
2. Encontrar la solución del problema cinemático inverso para la matriz ${}^0T_{ef}^{(1)}$ que corresponde con la primera posición del ejercicio de escritura para encontrar todas las posibles configuraciones del robot.
3. Comparar el valor de la coordenada 0z_n del origen del sistema de coordenadas del elemento n del manipulador robótico y la coordenada z del espacio de escritura. Si algún elemento se encuentra en el espacio restringido, esa solución se descarta automáticamente, en dependencia también de la estructura geométrica del elemento.
4. De las soluciones que no colisionen con el área de escritura se selecciona la configuración para la cual la suma de las distancias medidas entre los elementos sea la mayor.

Una vez que se tiene una configuración factible, se aplica una heurística de análisis para cada una de las soluciones de las siguientes matrices de transformación ${}^0T_{ef}^{(i)}$. Este análisis ahora se realiza en el espacio de las articulaciones.

1. Se crea una lista para guardar las i configuraciones que generaran las trayectorias articulares.
2. Se guarda como primer elemento la configuración óptima de ${}^0T_{ef}^{(1)}$.

3. Se aplica la solución del problema cinemático inverso para resolver la matriz ${}^0T_{ef}^{(i+1)}$ y se comparan con los valores de las n articulaciones de la posición i de la lista.
4. Se guarda en la posición $i + 1$ de la lista la configuración que presente menor diferencia con la configuración de la posición i de la lista.
5. Se aplica nuevamente el paso 3 hasta terminar con los elementos de la lista.

El diagrama de flujo del procedimiento para encontrar la configuración factible puede observarse en la figura 24.

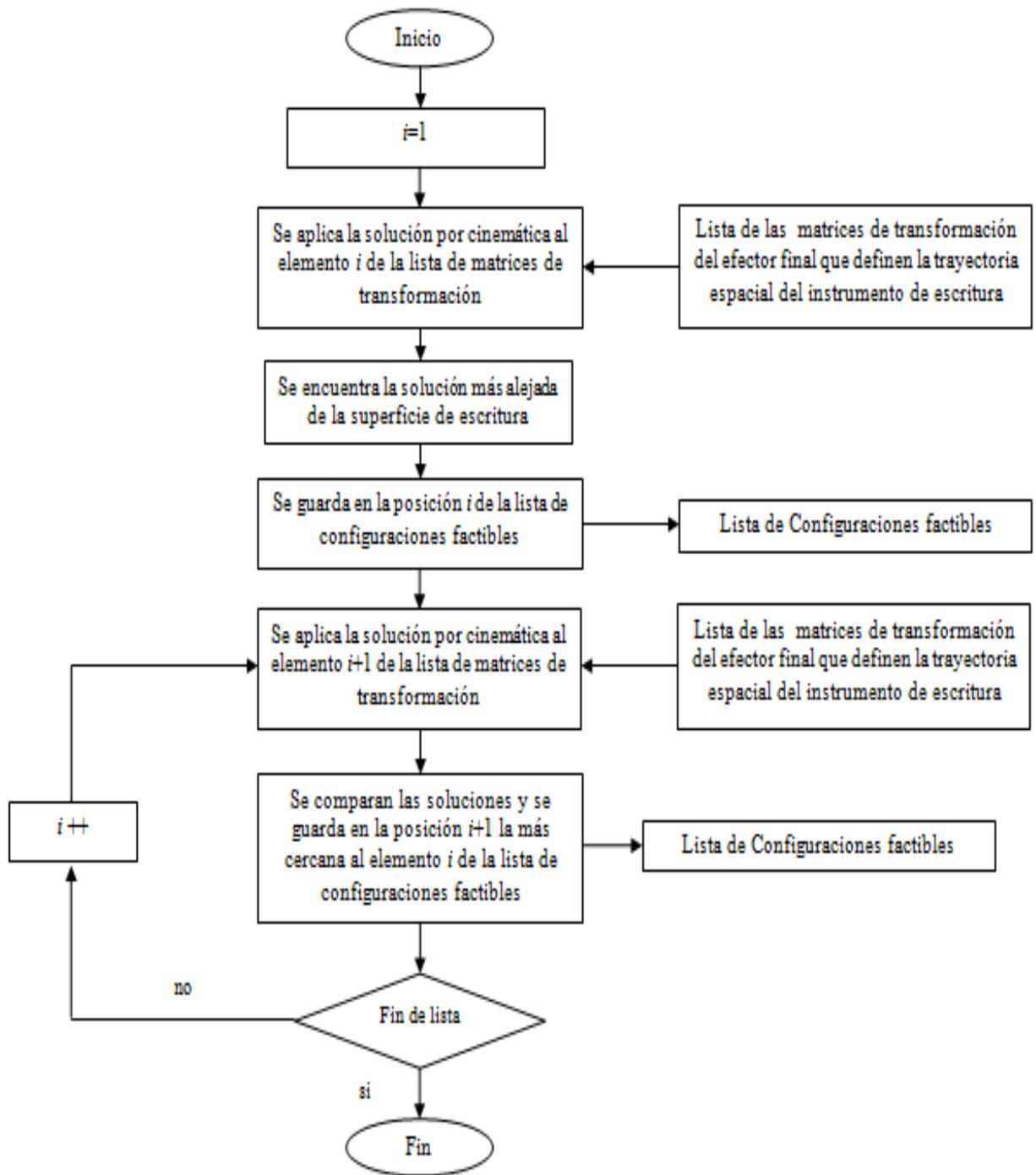


Fig. 24. Diagrama de flujo de la selección de la configuración factible.

4.2.3. Ajuste temporal de la trayectoria

Hasta este punto se ha definido la trayectoria del efector final en el espacio de trabajo, como resultado directo de la reproducción secuenciada de las configuraciones factibles. Sin embargo, estos datos solo representan el lugar geométrico que va ocupando el efector final en el espacio de trabajo del sistema robótico sin considerar el tiempo de cambio Δt entre la sucesión de las configuraciones factibles, el cual está determinado por la velocidad del movimiento que se realiza. Este punto es importante para relacionar las velocidades del efector final en el espacio cartesiano con las velocidades del movimiento de cada una de las articulaciones.

En el esquema propuesto en el capítulo 3, se tienen dos maneras de generar las trayectorias: la primera es mediante la formación automática de la trayectoria y la segunda es mediante la adquisición de la trayectoria.

En la formación automática de la trayectoria los datos obtenidos deben reproducirse con el sistema robótico estableciendo el tiempo de movimiento del robot, mediante la modificación del intervalo de reproducción Δt (ver fig. 28). Para la reproducción de los datos adquiridos, estos ya cuentan con intervalos de tiempo definidos, sin embargo, estos datos podrían modificarse para acelerar o alentar el movimiento del robot, tomando en cuenta las restricciones de velocidad y aceleración máxima del sistema de servo motores del robot.

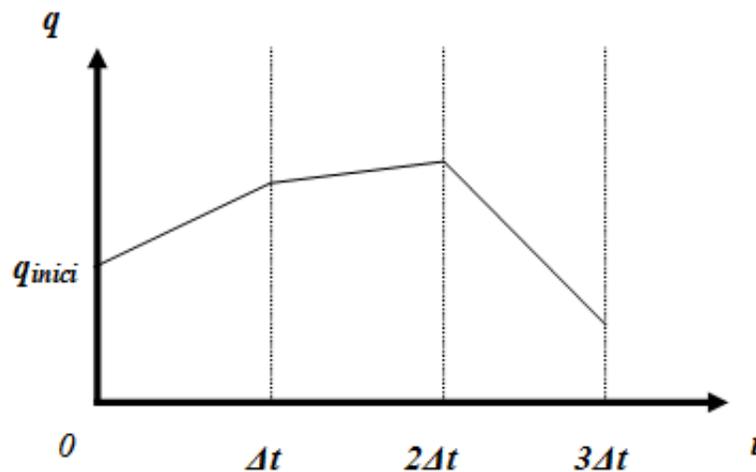


Fig. 25. Cambio en el valor de las articulaciones cada Δt intervalo de tiempo.

4.3. Control por interacción con el paciente

Hasta este punto se han mostrado los métodos para que un manipulador robótico replique la tarea funcional de escritura, especificando la formación de la trayectoria y el seguimiento por el manipulador robótico. Sin embargo, como se mencionó en la sección 2.1, se requiere la participación activa del paciente para la generación de la plasticidad cerebral. Un esquema de control que proporciona la interacción entre el paciente y el sistema robótico para rehabilitación es el control activo restringido, donde el movimiento del robot, depende del comportamiento y esfuerzo del paciente, restringiendo el movimiento a la extremidad afectada.

Para ello se propone un esquema de control (alto nivel) por interacción con el paciente, que mediante la medición de la resistencia que opone el paciente a los movimientos del robot y un control adaptativo, se cambie la velocidad del movimiento y se acople a la capacidad de seguimiento de la trayectoria por el paciente.

Para cumplir esta meta se propone el esquema de control adaptativo de la velocidad de movimiento de las articulaciones por resistencia presentado en la figura 26.

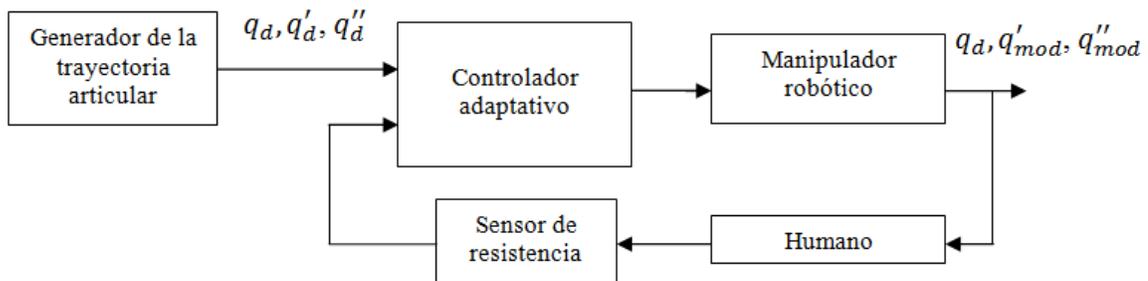


Fig. 26. Esquema de control de la velocidad de las articulaciones.

El generador de la trayectoria articular genera la posición articulación deseada q_d , la velocidad q'_d y la aceleración q''_d . El control adaptativo recibe estos datos y los datos de la resistencia al movimiento del paciente. Según el valor de la resistencia, el control modifica la velocidad y la aceleración de las articulaciones a un valor q'_{mod} y q''_{mod} respectivamente, para continuar con la trayectoria, en una velocidad más baja si el paciente aumenta la

resistencia o a una velocidad más alta si el paciente disminuye la resistencia. El control adaptativo modifica la velocidad de las articulaciones por medio de la programación del algoritmo de generación de la trayectoria por splines cúbicos detallado en la sub sección 4.3.2.

En este esquema el paciente debe seguir el movimiento del instrumento de escritura (movido por el robot y planificado en el generador de las trayectorias articulares) aplicando un esfuerzo voluntario para obtener el movimiento del robot.

4.3.1. Esquema de control adaptativo por resistencia

El control adaptativo permite al sistema robótico seguir una trayectoria definida en cooperación con el paciente, ya que la velocidad y aceleración del sistema depende del comportamiento y esfuerzo del paciente. La figura 27 presenta el diagrama de flujo del control propuesto.

Las velocidades y aceleraciones para cada punto de las trayectorias articulares se definen en el módulo de formación de las trayectorias articulares. Sin embargo, estas velocidades y aceleraciones pueden cambiar dependiendo de la resistencia medida por el sistema.

Este esquema utiliza n rangos de medición (ver fig. 28), el primero de ellos ajusta la velocidad del movimiento a una velocidad más lenta cuando se sobrepasa el rango de resistencia definido como U_1 . Si la medición baja del umbral U_1 , la velocidad se incrementa, de lo contrario, si se sobrepasa el umbral de resistencia definido como U_2 , el sistema vuelve a bajar la velocidad. Así sucesivamente hasta que se sobrepasa el umbral n y el sistema detiene el movimiento mandando a los servomotores una velocidad igual a cero.

Si el sistema detecta el movimiento del paciente hacia la trayectoria, este inicia el movimiento, con las condiciones de velocidad y aceleración definidas en el intervalo $[U_{n-1}, U_n]$, de lo contrario permanece con las condiciones de velocidad igual a cero. Una vez en movimiento el sistema puede incrementar la velocidad de las articulaciones hasta la velocidad predefinida si la resistencia se coloca por debajo del umbral U_1 .

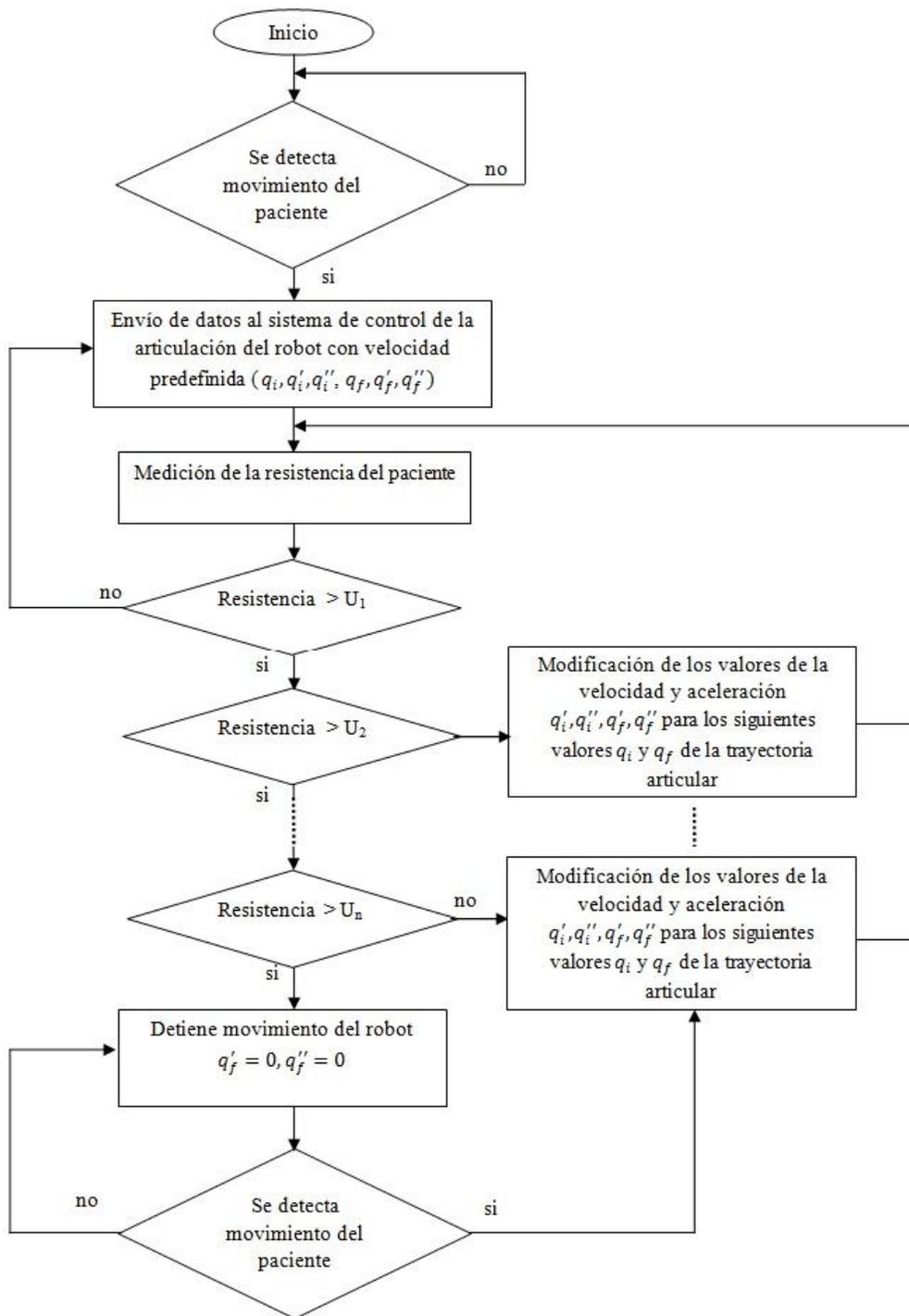


Fig. 27. Esquema de control adaptativo por resistencia generalizado a n umbrales.

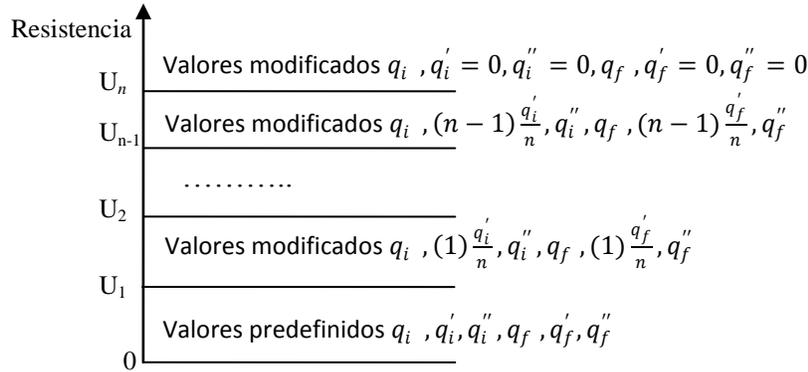


Fig. 28. Rangos de adaptación del sistema generalizados a n umbrales.

4.3.2. Interpolación de una sucesión de n puntos por la sucesión de $n-1$ splines cúbicos.

Para el caso de un sistema de rehabilitación activo asistido, se requiere la generación de trayectorias de articulación en tiempo real, que garanticen un movimiento suave y continuo

Para la planificación de la trayectoria se consideran dos etapas: la primera consiste en obtener un conjunto discreto de configuraciones, las cuales están formadas por los caminos libres de colisiones, mientras que la segunda etapa se ajusta la trayectoria continua a la secuencia de configuraciones obtenidas durante la primera etapa.

Para esto se propone utilizar un método de interpolación de una sucesión de n puntos por la sucesión de $(n-1)$ Splines Cúbicos, como una herramienta para mover el manipulador a lo largo de una trayectoria polinomial uniforme que satisfaga las condiciones de posición y orientación en los puntos inicial, intermedio y final de dicha trayectoria.

Este método ha sido usado con anterioridad en [36] para planificar la trayectoria en un sistema de rehabilitación de las extremidades inferiores y en [37] para planificar la trayectoria en un sistema de rehabilitación para el hombro. Como en el caso de este trabajo, los trabajos antes citados obtuvieron la trayectoria de movimientos normales de personas sanas. El método para el cálculo de la interpolación por splines cúbicos se presenta en el apéndice A. La manera en que se aplica para re calcular la trayectoria es la siguiente.

Según el diagrama de flujo mostrado en la figura 28, al sobrepasar un umbral, los valores de la trayectoria se ajustan a una velocidad menor. Para realizar este cambio en la velocidad del movimiento se requiere de un tiempo determinado Δt_r para realizar los cálculos de la trayectoria, por lo que es necesario re calcular la trayectoria para después de este espacio temporal (ver fig. 29).

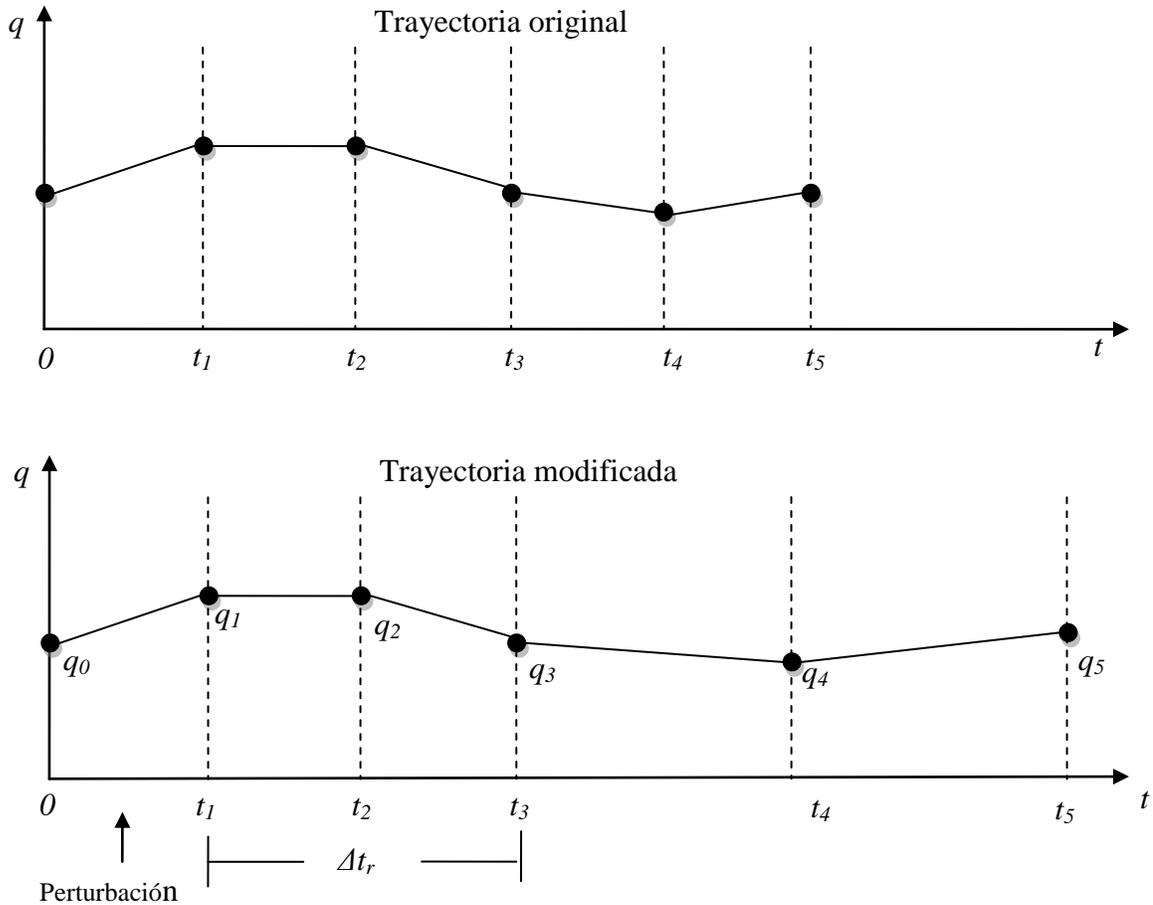


Fig. 29. Modificación de la velocidad de la trayectoria por splines cúbicos.

En el intervalo $[0, t_1]$, el sistema percibe la resistencia mayor al umbral U_1 y re calcula la trayectoria para después del intervalo Δt_r , con las condiciones de velocidad y aceleración iguales para el punto q_3 .

4.4. Retroalimentación visual de la trayectoria

El Biofeedback en neurorehabilitación es el proceso mediante el cual un paciente recibe información acerca de procesos fisiológicos en forma de señales visuales o auditivas para controlar dichos procesos. La técnica suministra una retroalimentación que liga la percepción con los procesos cognitivos. Una adecuada representación de estas señales permite al paciente mejorar los mecanismos biológicos de control del movimiento, ayudando de esta manera a la recuperación de la función perdida.

En la actualidad existen muchas investigaciones en el campo de la rehabilitación neurológica asistida por robot. Muchos grupos de investigación en el área de la robótica han enfocado sus esfuerzos en desarrollar sistemas que permitan una mayor eficiencia en el proceso de neurorehabilitación, llegando a generar productos que incluso se han empezado a comercializar en los países más desarrollados. Estos sistemas robóticos de neurorehabilitación están diseñados para interactuar con el paciente de una forma asistencial o resistiva en el momento adecuado. Para ello se requiere de la medición de parámetros que el sistema pueda captar como movimientos voluntarios del paciente una interfaz de biofeedback que les permite proveer información importante acerca de cuándo se debe de iniciar la interacción con el paciente.

El estado en que se encuentra la computación actual ha demandado que los sistemas más avanzados presenten interfaces de biofeedback cada vez más inmersivas, con mejores gráficos y de respuesta en tiempo real.

Sin embargo, la implementación de estas características tiene restricciones de construcción de los sistemas:

4.4.1. Esquema de retroalimentación visual y auditiva

Los esquemas de optimización de sistemas naturales o artificiales, requieren la detección de ciertas cantidades para optimizar su funcionamiento. En el cuerpo humano estas cantidades funcionales son detectadas por procesos retroalimentación de movimientos, fuerzas,

impresiones visuales, sonido etcétera. En rehabilitación la percepción de ciertas cantidades de alguna funcionalidad, proporcionadas por sistemas artificiales, toman el nombre de bio-retroalimentación. Para hacer las señales perceptivas para el paciente y permitir su reacción se requieren de ciertos elementos como monitores gráficos, bocinas, o sistemas vibratorios, todos ellos dependiendo del nivel de daño de la lesión.

El esquema de retroalimentación visual considera la representación del movimiento del instrumento de escritura en una pantalla, y sonidos en una bocina, por la sincronización en conjunto con la detección de la resistencia del paciente. La figura 30 presenta el esquema de retroalimentación visual y auditiva en relación con el diagrama de flujo presentado en la figura 27.

El subsistema de formación de la trayectoria permite guardar los datos del patrón de escritura en dos dimensiones, más la secuencia que generará el patrón de movimiento.

El subsistema de seguimiento de la trayectoria, establece los requerimientos temporales de la trayectoria. Estos datos temporales también servirán para la representación visual de la trayectoria. Se requiere que el programa que mande los datos al robot, también los mande al programa de representación visual del movimiento del robot.

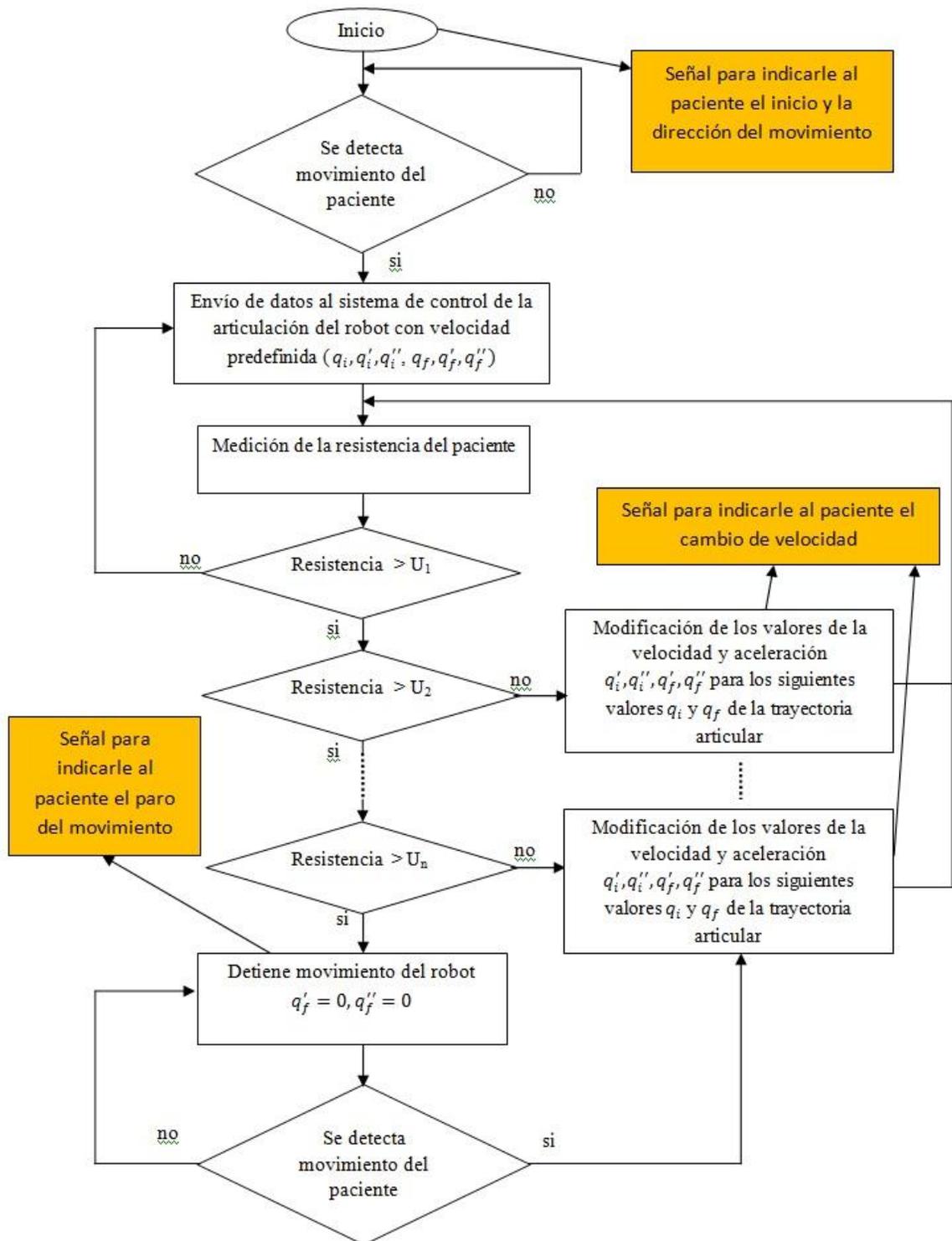


Fig. 30. Esquema de retroalimentación visual y auditiva aplicada al sistema de control.

Capítulo 5 | EVALUACIÓN DE LA MOTRICIDAD FINA

Una de las ventajas de los sistemas robóticos de rehabilitación es que permiten la implementación de sistemas de evaluación. En este capítulo se presenta un método de evaluación de la motricidad fina, por la obtención de características de la escritura mediante una tableta digitalizadora. La información obtenida servirá para que el médico ajuste la terapia a las necesidades del paciente.

5.1. Introducción

Actualmente los sistemas robóticos generalmente cuentan con sensores para evaluar características como velocidad del movimiento, fuerza aplicada por el paciente, trayectoria del movimiento y objetivos alcanzados por el paciente. Sin embargo no existe correlación con las características clínicas necesarias para evaluar la mejora funcional de los pacientes, y todavía menos, que evalúen la recuperación funcional utilizando pruebas específicas para la muñeca y mano.

La secretaria de salud en su manual para la atención del EVC, especifica que se deben evaluar las necesidades de rehabilitación de los pacientes lo antes posible tras el ingreso. En los pacientes con indicación de rehabilitación el tratamiento debe iniciarse lo antes posible. Se recomienda también, evaluar el resultado final del tratamiento rehabilitador a los 6 meses post-enfermedad vascular cerebral [28].

Para ello se deben utilizar métodos y escalas objetivas y validadas para identificar los objetivos, planificar el tratamiento y evaluar los resultados. Las escalas de limitación de la actividad con mayor validez, fiabilidad y consenso en la rehabilitación de la enfermedad vascular cerebral son el índice de Barthel y la medida de independencia funcional (FIM)..

Existen diversas escalas para valorar la mejoría de la motricidad después de un EVC, Estas se pueden dividir en evaluación del funcionamiento motor y evaluación de la funcionalidad. La tabla 5 muestra las principales escalas de valoración y sus características.

Tabla 6. División de las escalas de valoración según funcionalidad y funcionamiento motor.

Evaluación de la función motora	Características
Fugl Meyer assessment	Evalúa la función motora mediante la realización de ciertos ejercicios. Tiene una evaluación especial para la muñeca y mano.
Motor assesmentScale	Evalúa la función motora mediante la realización de ciertos ejercicios. Tiene una evaluación especial para los movimientos de la mano y una evaluación especial para actividades especiales de la mano.
MotricityIndex	Evalúa la motricidad del brazo y la pierna. Utiliza ejercicios de agarrar y colocar objetos.
Evaluación de la funcionalidad	Características
BarthelIndex	Es un instrumento para detectar 10 actividades básicas de la vida diaria, como bañarse y alimentarse .Es la escala más utilizada internacionalmente para la valoración funcional del paciente neurológico.
Functional Independence Measure	Es un instrumento para evaluar actividades dela vida diaria, divididas en auto cuidado, movilidad, comunicación y entendimiento.
Jebsen Hand function Test	Esta evaluación está dirigida exclusivamente a la funcionalidad de la mano. Tiene un apartado especial para ejercicios de escritura. Donde se mide el tiempo en que el paciente escribe una sentencia.
Arm motor Ability test (AMAT)	Medición de Capacidad funcional para realizar

Las escalas de valoración funcional utilizadas por los médicos para medir el nivel de mejoría en los pacientes se basan principalmente en la independencia de los pacientes al realizar actividades de la vida diaria y la calidad con las que las realizan, siendo subjetivas en ciertos casos.

Actualmente existen estudios que relacionan las mediciones que proporcionan los sistemas robóticos de rehabilitación motora gruesa, sin embargo no hay mediciones para evaluar la motricidad fina y mucho menos para la evaluación de la tarea de escritura.

5.1. Mediciones objetivas: precisión y suavidad del movimiento

Como se explicó en la sub sección anterior, no existe alguna escala para evaluar la motricidad fina funcional, sin embargo existen dos elementos que pueden describir de manera objetiva la funcionalidad de la mano, la precisión y la suavidad en un movimiento.

Puesto que la precisión en un movimiento es un importante aspecto de todos los movimientos funcionales. Para el caso de un movimiento en un plano la precisión se describe como la distancia entre el punto objetivo deseado y el punto final del movimiento realizado (ver figura 31).

Un error de cero, dice que la funcionalidad es casi perfecta, y una distancia muy grande entre estos dos puntos, es una pésima funcionalidad. La precisión en el plano se calcula como:

$$precisión = \sqrt{(x_o - x_f)^2 + (y_o - y_f)^2} \quad (5.1)$$

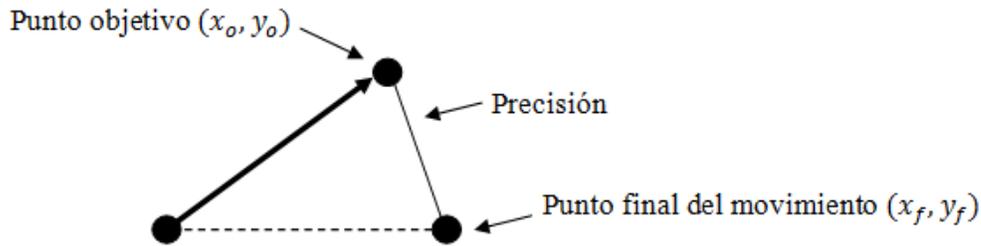


Fig. 31. Medición objetiva de la precisión.

La suavidad del movimiento indica el control de la velocidad del movimiento que es ejercido por el brazo durante la ejecución de una tarea. El control de la velocidad del movimiento es crítico porque un movimiento funcional se debe realizar con la velocidad adecuada para la distancia a ser recorrida por el brazo. También los cambios en la velocidad deber ser ejecutados suavemente en ciertos puntos de las tareas. En [13] definen la suavidad del movimiento como una correlación entre una idealizada velocidad normal contra la velocidad del sujeto a evaluar durante el recorrido de una trayectoria en el plano.

Por lo tanto definiremos la suavidad del movimiento como la precisión por unidad de tiempo.

$$suavidad = \frac{\sum_0^T \text{precisión}}{T} \quad (5.2)$$

5.2. Esquema general del subsistema propuesto

Para medir el nivel de funcionalidad de un paciente en rehabilitación, en este trabajo se propone el uso de una tableta digitalizadora de tecnología electromagnética para tomar datos acerca de la habilidad motora fina cuando se realiza el ejercicio de escritura.

La información obtenida de la tableta digitalizadora grafica tiene características de presión, de posición, inclinación y tiempo. Esta información se procesa y podemos obtener datos como velocidad promedio, error de desviación de la trayectoria, dirección del movimiento y vector de fuerza aplicada. Con estos datos se busca la correlación con

pruebas clínicas reconocidas para la evaluación de la funcionalidad de la habilidad motora fina, en nuestro caso para evaluar el ejercicio de escritura.

Esta información digital está disponible para visualizarse, procesarse o normalizarse para transferir a otro sistema (podría servir como retroalimentación de algún sistema robótico de rehabilitación). La visualización de los movimientos en tiempo real puede representar cualquiera de los datos obtenidos directamente o algún otro dato derivado de esta información.

Los datos son recibidos por la aplicación utilizando los métodos de cambio de nivel. Para ello existen dos opciones. La primera es esperar a que cada que ocurra un cambio de nivel se lean los valores de los datos proporcionados por la tableta. La segunda es programar un temporizador para que pueda leer los datos periódicamente. Estas dos opciones se muestran en los diagramas de flujo de la figura 32.

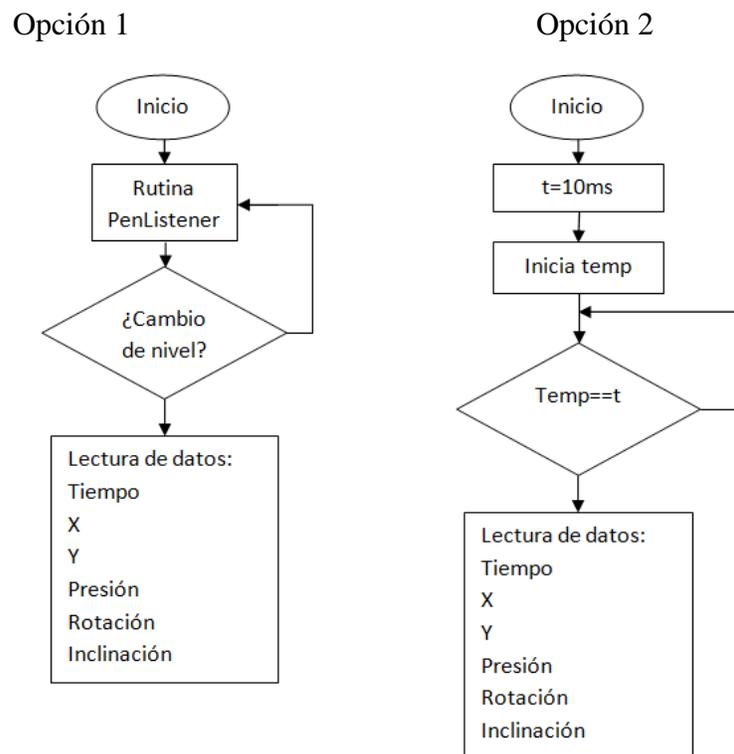


Fig. 32. Proceso de adquisición de datos para evaluación.

Capítulo 6 | SIMULACIÓN FÍSICA Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta la simulación física del sistema robótico de rehabilitación motora fina por el movimiento funcional de la escritura, basada en los medios básicos descritos en los capítulos anteriores. Se describe el hardware y el software de la plataforma experimental y los programas desarrollados sobre la base de los subsistemas. Finalmente se presentan los resultados obtenidos en la simulación física.

6.1. Componentes del sistema

La programación de los medios básicos investigados se basó en la infraestructura con la que cuenta la Universidad Tecnológica de la Mixteca y especialmente el Laboratorio de Robótica Inteligente. La implementación de cada uno de los medios básicos se ajustó a las especificaciones de los equipos utilizados en el sistema.

6.1.1. Hardware

Como el centro de la plataforma experimental se tiene al robot de seis grados de libertad PowerCube. Una tableta digitalizadora gráfica de tecnología electromagnética complementa el hardware principal de la implementación.

Todos los subsistemas requieren de una computadora en donde se realiza el procesamiento de la información. El software desarrollado se implementó en la computadora portátil Toshiba L635, con procesador Intel core i3 y 3GB de RAM. Sin embargo, estas características no son críticas para el funcionamiento de los subsistemas,

debido a que para la simulación aquí presentada, no es necesario realizar procesamiento en tiempo real.

Sistema robótico

El brazo robótico PowerCube mostrado en la figura 33, tiene 6 grados de libertad en configuración TRTRRT (donde T corresponde con torsión y R con rotación). Este robot fue desarrollado en Alemania por la empresa AMTEC GmbH, como un robot industrial, el cual realiza tareas de tomar y colocar objetos (pick and place). Con este brazo se implementó el subsistema de control del movimiento del robot.

Por su configuración permite el movimiento del brazo en 6 grados de libertad y adicionalmente cuenta con una pinza (gripper) en un grado de libertad. Sus principales características son:

- 6 módulos con servo motores DC en lazo cerrado.
- Controlador individual para cada uno de los módulos.
- Energía con ± 24 VDC, 20-80 A.
- Alcance frontal de 847.2 mm.
- Soporte de objetos de hasta 2 Kg de peso en elevación.
- Utiliza el protocolo de comunicación CAN-bus, para mandar señales a cada uno de los módulos independientemente.
- La velocidad y aceleración máximas para todas las articulaciones son de $50^\circ/s$ y $62^\circ/\text{seg}^2$ respectivamente.
- La versión de la serie es la 3.5.00.
- Para su programación se puede emplear cualquiera de los siguientes sistemas de desarrollo: Visual C++, Visual Basic, Diadem, LabView, LabWindows y AgilentVee.



Fig. 33. Brazo robótico PowerCube.

Tableta digitalizadora

Para la implementación de los subsistemas de formación de la trayectoria y el subsistema de evaluación se utilizó la tableta digitalizadora de tecnología electromagnética Intuos3 de la empresa Wacom (ver Fig. 34),

Las características de esta tableta son:

- Superficie de trabajo 12"x 9"
- Sensibilidad de presión de 1024.
- Resolución: 5080 LPI.
- Tasa de respuesta: 200 RPS.
- Rango de Inclinación del lápiz (+60°, -60°)



Fig. 34. Tableta digitalizadora Wacom Intuos3.

Se utilizó también la tableta digitalizadora gráfica EasyPen i405 de la empresa Genius (ver Fig. 35). A diferencia de la primera tableta digitalizadora mencionada, esta no permite obtener los datos de inclinación del lápiz, razón por la cual, solamente se utilizó para implementar el subsistema de formación de la trayectoria por el método del cálculo automático. El costo del sistema disminuye considerablemente si se utiliza esta tableta aunque limita su uso en el subsistema de evaluación.

Sus principales características son:

- Superficie de trabajo 4"x5,5" para dibujos y escritura.
- Sensibilidad de presión de 1024.
- 28 teclas de acceso rápido programables.
- Resolución: 2540 LPI.
- Tasa de respuesta: 100 RPS.



Fig. 35. Tableta digitalizadora EasyPen de Genius.

6.1.2. Software

En base a las especificaciones de los subsistemas y del hardware, fueron desarrollados los programas para la implementación del sistema de neurorehabilitación propuesto. Los programas fueron desarrollados en los lenguajes C++ y Java. Para obtener los datos de las tabletas digitalizadoras se utilizó un API de Java y para la programación del robot se utilizaron librerías propias del sistema operativo del robot en lenguaje C++. En primer lugar se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés) para controlar todo el sistema. Este programa, desarrollado en lenguaje Java, controla los distintos programas que implementan los subsistemas propuestos en la tesis.

Para el subsistema de formación de la trayectoria se desarrollaron dos programas: el programa de formación automática de la trayectoria y el programa de formación de la trayectoria adquirida. Estos dos programas escritos en lenguaje Java corresponden con los dos algoritmos propuestos en las secciones 3.2 y 3.3 respectivamente.

Para el subsistema de control del movimiento del robot se desarrollaron tres programas; el programa generador de los datos de control de la trayectoria (basado en el algoritmo de solución del problema cinemático inverso presentado en [35]), el programa de ajuste de los datos de control de la trayectoria y el programa de control por interacción con el paciente. Estos programas fueron desarrollados en lenguaje C++, ya que este es el lenguaje mediante el cual se desarrollan los programas de la plataforma robótica PowerCube.

Finalmente se desarrolló un programa que implementa el subsistema de retroalimentación visual y auditiva. Este programa, escrito en lenguaje Java, permite llevar a cabo el proceso de retroalimentación visual y auditiva, mediante la visualización en pantalla del movimiento requerido y mensajes de audio según la respuesta del paciente ante los estímulos antes mencionados.

6.1.3. Flujo de datos

La figura 36, muestra el flujo de información entre los diferentes subsistemas propuestos, derivada de la figura 5.

Por un lado, el sistema puede recibir la información administrada por el médico para formar el ejercicio del paciente por medio de una tableta digitalizadora. Esta se recibe con una frecuencia de hasta 100 Hz y describe la trayectoria del instrumento de escritura por las señales de:

- Posición
- Inclinación
- Tiempo

Por otro lado, el sistema genera la terapia mandando información de la trayectoria que debe de seguir el efector final del robot, como un conjunto de configuraciones, y una señal de retroalimentación visual presentada en una pantalla. La visualización en la pantalla corresponde con los movimientos reales del robot.

Adicionalmente, todos los datos son procesados por la computadora y pueden ser enviados a una base de datos donde se registra el estado y progreso de los pacientes, y el registro de los ejercicios de la terapia. El esquema contempla el uso de tecnologías de la información e internet.

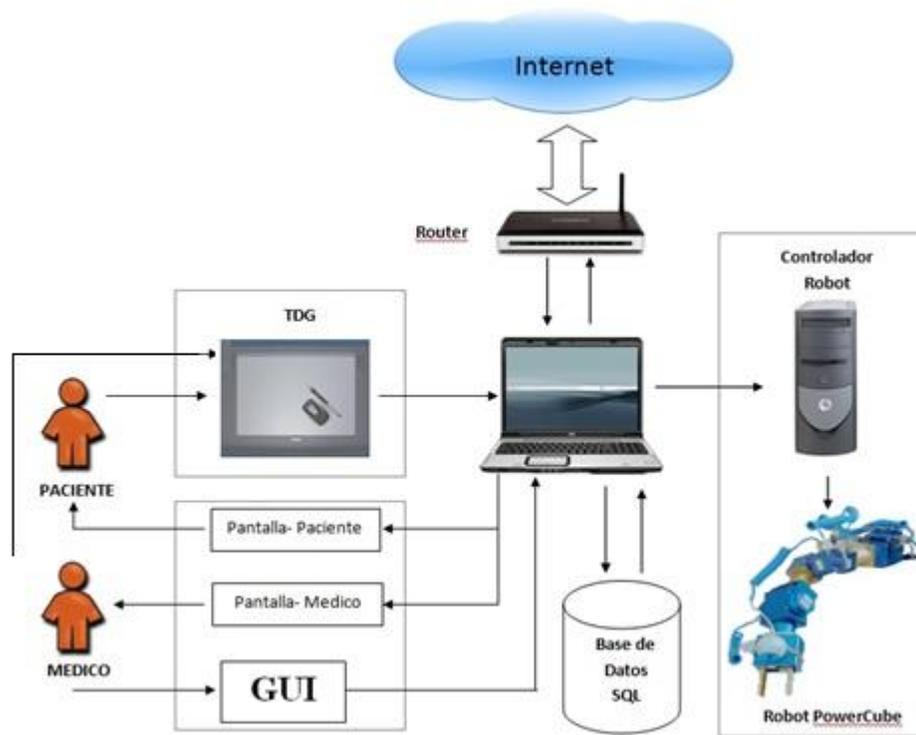


Fig. 36. Flujo de información del sistema propuesto.

El hardware se aplicó en los subsistemas como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Hardware utilizado en cada subsistema.

Subsistema	Hardware principal
Subsistema de formación de la trayectoria	Tableta digitalizadora gráfica
Subsistema de control del robot	Brazo robótico PowerCube
Subsistema de visualización.	Pantalla
Subsistema de evaluación.	Tableta digitalizadora gráfica

6.2. Simulación física

6.2.1. Programa de formación de la trayectoria

En esta sub sección se describen los programas en Java que encuentra la matriz de transformación que representa la trayectoria de movimiento del instrumento de escritura a partir de los datos adquiridos y calculados. Estos programas forman parte del subsistema de formación de la trayectoria que se detalla en el capítulo 3.

El subsistema recibe como entrada los valores de los parámetros que representan el movimiento del instrumento de escritura al realizar un dibujo (el cual es preparado por el médico) y forma la trayectoria de movimiento que repetirá el manipulador robótico (para mover el instrumento de escritura) en base a su sistema de coordenadas propio. Como salida del subsistema se obtiene un conjunto de matrices de transformación que forman la trayectoria espacial del efector final del robot. El diagrama de bloques del subsistema se presenta en la figura 7.

Programa de formación de la trayectoria automática

Como se mencionó en la sección 3.2, el método de formación de la trayectoria de movimiento automática, obtiene el conjunto de matrices de transformación (del sistema de coordenadas del efector final al sistema de coordenadas básico del manipulador robótico) que producen la trayectoria espacial del instrumento de escritura desde un patrón de dibujo, relacionando valores definidos de ángulos de inclinación del instrumento de escritura a posiciones de su punta en el dibujo.

Como primer paso se realizó un programa para definir automáticamente las coordenadas en milímetros, con respecto al sistema de coordenadas básico del manipulador, de cada una de las figuras propuestas en la tabla 8. Los parámetros para calcular las coordenadas de la figura a realizar en el ejercicio son:

- Posición
- Tamaño

- Orientación

Adicionalmente a estas variables es necesario definir el número de puntos con los que se formará la figura, dependiendo de su tamaño, siendo que una figura más grande requiere un mayor número de puntos para poderse formar (el espacio entre los puntos debe de ser el mismo en cualquier caso). Para el caso de un *Círculo* de 50 mm de radio y 64 puntos de paso, la tabla 8 presenta las coordenadas en el sistema de coordenadas básico del manipulador. Se observa que al ser un plano paralelo al eje z del Sistema de coordenadas básico del manipulador, la coordenada z (altura) es la misma y solo cambian las coordenadas x y y .

Tabla 8. Coordenadas de los puntos de interés para la figura del círculo.

Vértice	x	y	z
0	572.5	50	-115
1	577.400857	49.7592363	-115
2	582.2545161	49.039264	-115
3	587.0142339	47.8470168	-115
4	591.6341716	46.1939766	-115
5	596.0698368	44.0960632	-115
6	600.2785117	41.5734806	-115
7	604.2196642	38.6505227	-115
8	607.8553391	35.3553391	-115
9	611.1505227	31.7196642	-115
10	614.0734806	27.7785117	-115
11	616.5960632	23.5698368	-115
12	618.6939766	19.1341716	-115
13	620.3470168	14.5142339	-115
14	621.539264	9.7545161	-115

Como segundo paso se realizó la programación de la ecuación (3.6) dejando como entrada del programa las variables mostradas en la tabla 9.

Tabla 9. Datos de entrada para el programa.

Variable	Descripción
X	Rango de X
Y	Rango de Y
Δx	Milímetros por grado de inclinación en x
Δy	Milímetros por grados de inclinación en y
AngMax	Angulo Máximo
AngMin	Angulo Mínimo
L	Longitud del instrumento de escritura

Programa de formación de la trayectoria adquirida

Para el manejo de la TDG se utilizó una librería en Java que contiene métodos de acceso a estos dispositivos [38]. La arquitectura de esta librería permite recibir datos cuando ocurre un evento como cambio de nivel de presión o cambio de coordenadas, de tal manera que todos los movimientos que el paciente realice sobre la tableta se pueden obtener, y por lo tanto procesar. Para esta parte del trabajo se desarrolló un programa en Java que permite obtener los datos de la tableta para su procesamiento y almacenamiento en archivos de texto. La captura de los datos sigue el mismo esquema que el presentado en la figura 32, que corresponde al subsistema de evaluación

6.2.2. Programa de movimiento del robot

La arquitectura cerrada de los controladores del robot manipulador PowerCube, solo permiten la programación punto a punto. En este control punto a punto el sistema de control automático del robot realiza la interpolación entre los puntos especificados. De tal

manera que se diseñó un programa que lee los datos de posición velocidad y aceleración de un archivo de texto.

Se realizó la programación de la ecuación (3.6) estableciendo los parámetros de inclinación máximos y mínimos definidos por (3.7), además de definir la posición espacial del área de escritura por el robot el área de escritura

La formación de la trayectoria automática presupone un plano de escritura en el espacio alcanzable por el robot, el cual se denominó espacio factible. Para encontrar el espacio factible, se tomó en cuenta el volumen de trabajo del robot PowerCube. Una representación del volumen de trabajo de éste manipulador se presenta en [39], que corresponde con el volumen de trabajo de la pinza del manipulador en posición horizontal y vertical para tomar y colocar objetos (ver fig. 37).

En el caso de este proyecto, el volumen de trabajo está en función de las coordenadas que colocan el plano de escritura paralelo al eje x del sistema de coordenadas básico del manipulador. la altura del instrumento de escritura y de su inclinación para formar el patrón de movimiento a emplear en los ejercicios de rehabilitación.

Este programa fue desarrollado en lenguaje C++.

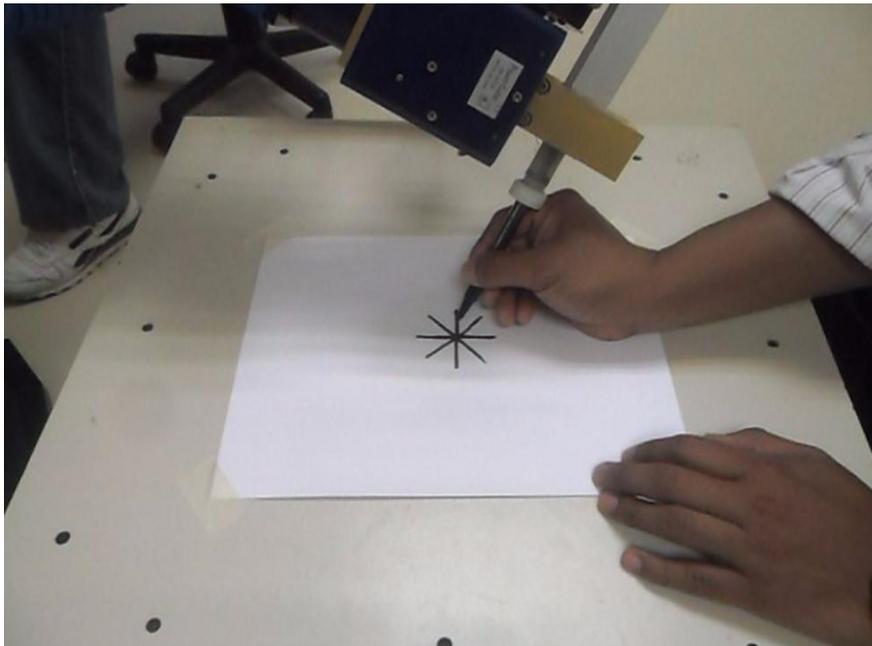


Fig. 37. Implementación en el sistema robótico PowerCube.

6.2.3. Programa de evaluación del estado y progreso del paciente

Para el subsistema de evaluación del estado y progreso del paciente, se desarrolló un programa en lenguaje Java que permite obtener los distintos parámetros de movimiento del instrumento de escritura de la Tableta Digitalizadora. Con los parámetros obtenidos se puede hacer una evaluación del estado del paciente basada en características clínicas que permitan medir la funcionalidad de la mano antes, durante y después de la terapia con el robot. El programa debe obtener parámetros objetivos que permitan mejorar el programa de rehabilitación.

Una vez que se han obtenido los datos de la Tableta Digitalizadora, estos pueden mostrarse directamente mediante graficas o estadísticas en pantalla, además de que se almacenan para su uso posterior.

El sistema entrega datos de la presión ejercida en la tableta, el tiempo del movimiento y la posición del instrumento de escritura. La interfaz se muestra en la figura 38. La figura 39 muestra la simulación de un paciente realizando el proceso de evaluación.

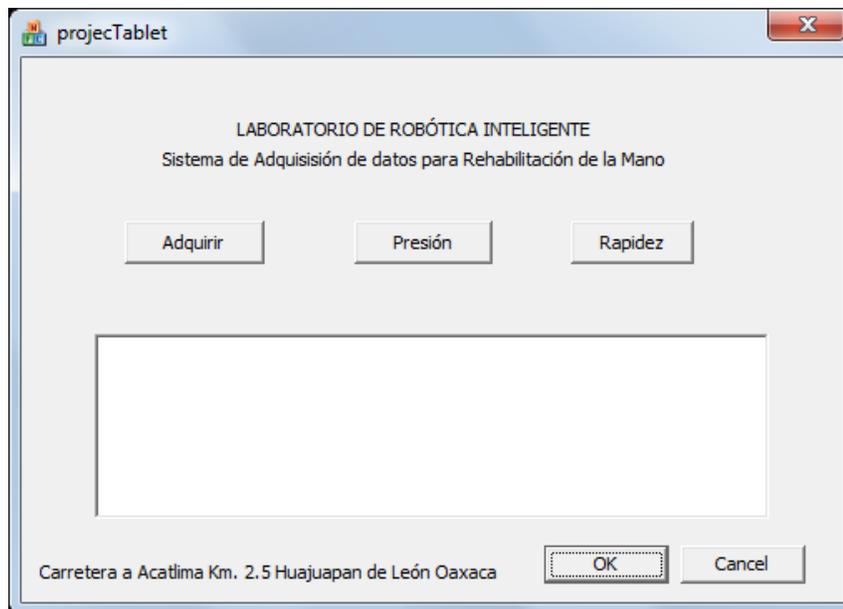


Fig. 38. Interfaz del programa para la evaluación del estado y progreso del paciente.

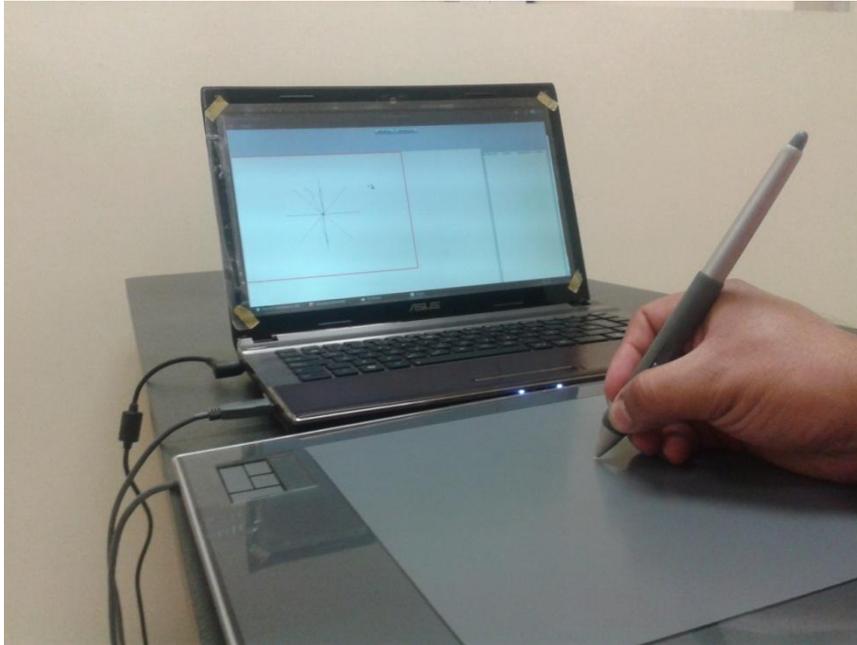


Fig. 39. . Implementación del programa de evaluación del estado del paciente.

6.2.4. Programa de implementación del sistema completo sin robot

Se implementó un esquema de rehabilitación sin robot, de manera completa con la utilización de los medios básicos desarrollados sobre los principios de los algoritmos y métodos desarrollados.

El programa principal se desarrolló en lenguaje Java el cual al ser un lenguaje de código abierto permite reducir los costos del sistema [40]. Además el API que permite obtener los datos de las tabletas digitalizadoras está desarrollado en este lenguaje, sin mencionar las funcionalidades como el manejo de gráficas y el acceso a las bases de datos. La plataforma de programación fue NetBeans IDE 6.8 [41].

La interfaz general se presenta como dos interfaces, una para el médico y otra para el paciente, estas se describen en las siguientes dos secciones.

Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) para el médico

Dentro del sistema de Neurorehabilitación Motora fina Propuesto, existe una Interfaz Gráfica de Usuario en la cual el médico puede interactuar con la aplicación, escogiendo entre los ejercicios disponibles y cambiando sus características, proponer un ejercicio de forma libre, así como visualizar gráficas, datos de rehabilitación y visualizar el expediente desde una base de datos. La interfaz se presenta en la figura 40.

Las tablas 10 y 11, muestran las características que corresponden a cada ejercicio seleccionado y los datos guardados en la selección de forma libre.

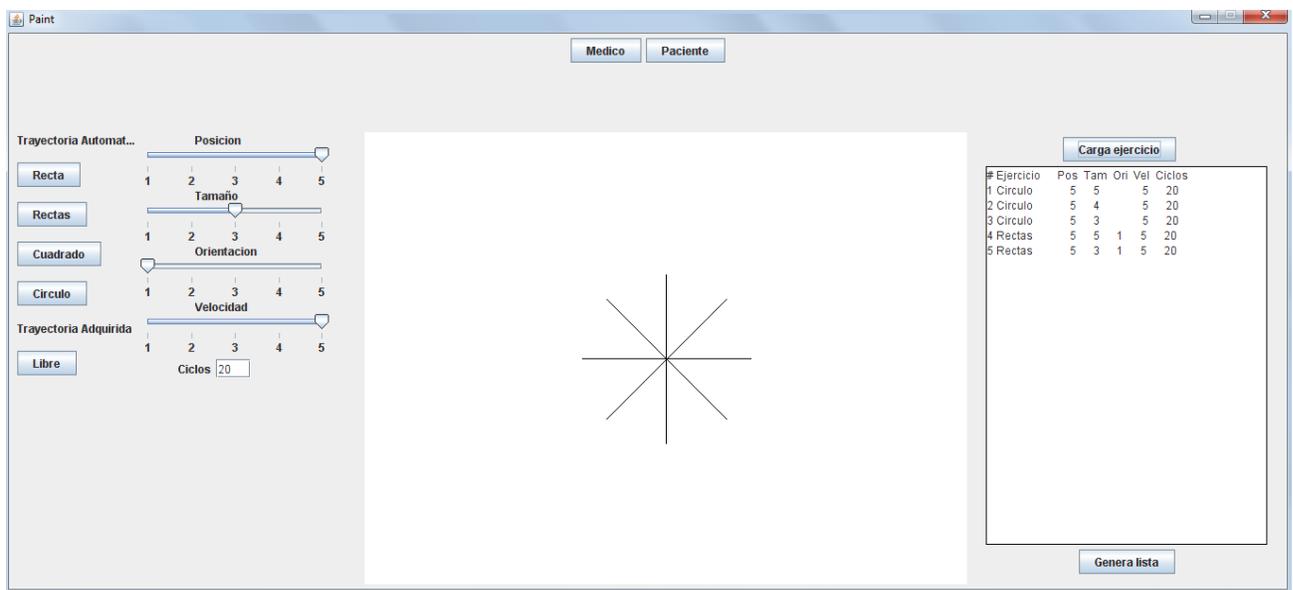


Fig. 40. Interfaz gráfica de usuario para el médico.

Tabla 10. Características de los ejercicios de formación automática.

Ejercicio	Posición	Tamaño	Orientación	Velocidad	Ciclos
Recta	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Rectas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Cuadrado	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Círculo	Sí	Sí	No	Sí	Sí

Tabla 11. Parámetros adquiridos, en las tabletas digitalizadoras utilizadas.

Características	TDG simple	TDG electromagnética
posición	Sí	Sí
Inclinación	No	Sí
Presión	Sí	Sí
Tiempo	Sí	Sí

Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) para el paciente

La Interfaz Gráfica de Usuario para el paciente permite iniciar el movimiento del robot y a la vez mostrar en pantalla la figura que se realiza por el paciente y el robot. Además una lista de los ejercicios que tienen que desarrollarse en cada sesión. La interfaz se presenta en la figura 41.

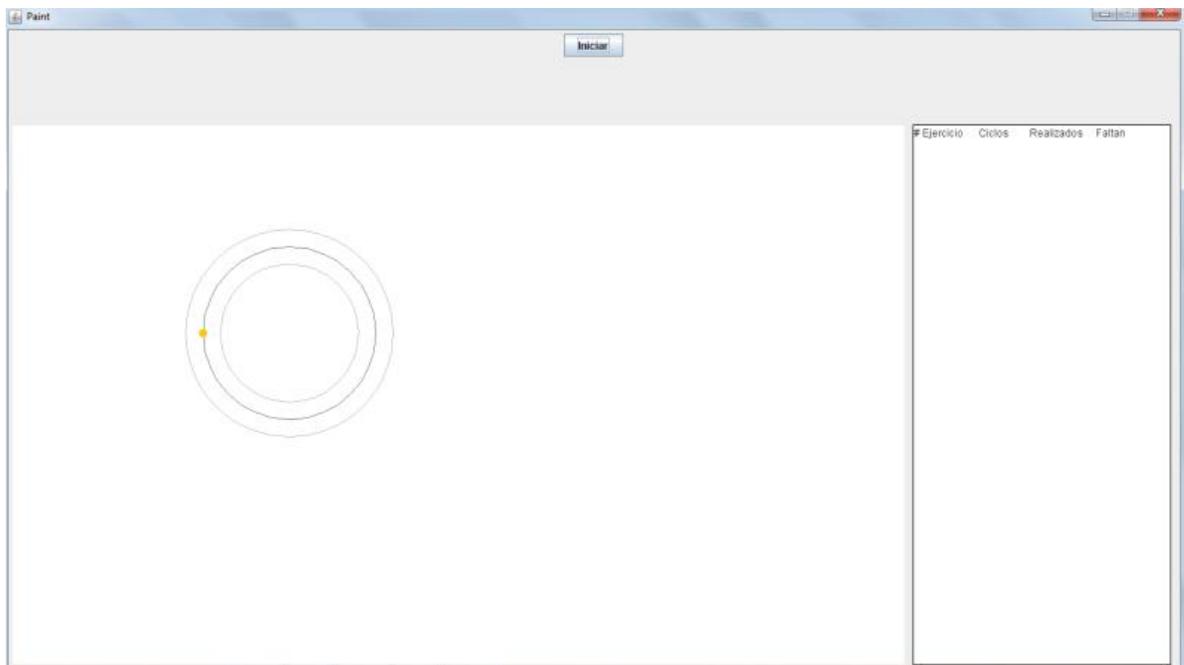


Fig. 41. Interfaz gráfica de usuario para el paciente.

Se simuló el esquema de control, presentado en la figura 27 mediante un programa en Java.

Descripción:

- Se muestra un punto donde el paciente debe colocarse para iniciar el ejercicio.
- Cuando se coloca la punta del instrumento de escritura en el punto de inicio, comienza el movimiento del punto objetivo con la velocidad predeterminada.
- Se evalúa si se ha terminado el ejercicio o si un temporizador ha sobrepasado un tiempo establecido (T1). Si se cumplen las condiciones se termina el programa.
- Se evalúa que se encuentre dentro del rango establecido de posición de la punta del instrumento de escritura y la distancia de la punta del instrumento de escritura al punto objetivo sea menor que un umbral U1. Si se cumplen las condiciones se incrementa la velocidad del ejercicio en un porcentaje (hasta máximo la velocidad preestablecida) y el temporizador se vuelve cero. De lo contrario se reduce en un porcentaje la velocidad.
- Se evalúa que la distancia de la punta del instrumento de escritura al punto objetivo sea menor que un umbral U2. De lo contrario se detiene el punto objetivo.
- Se continúa hasta terminar el ejercicio.

6.3. RESULTADOS

La programación del subsistema de formación de la trayectoria automática permitió generar una base de datos de figuras básicas las cuales son, la recta el círculo el cuadrado y las rectas. Las figuras 42 y 43 muestran la simulación física de la trayectoria calculada para un ejercicio compuesto de diversas figuras y para una figura básica.

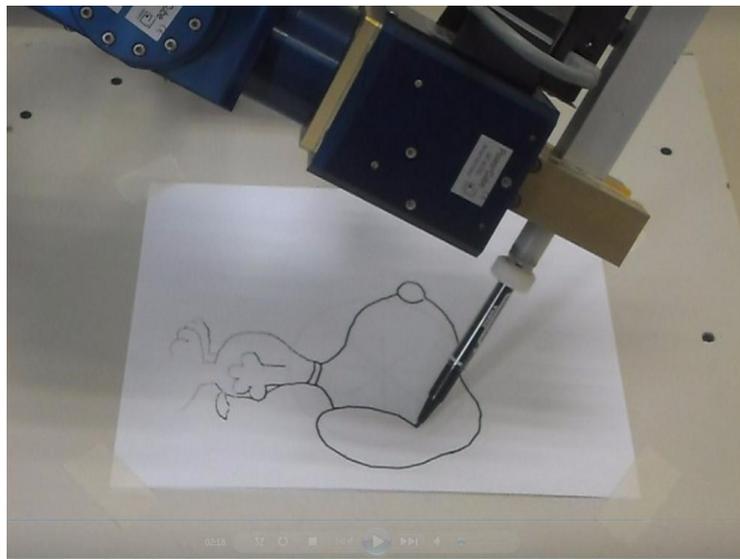


Fig. 42. Trayectoria compuesta por diversos elementos.

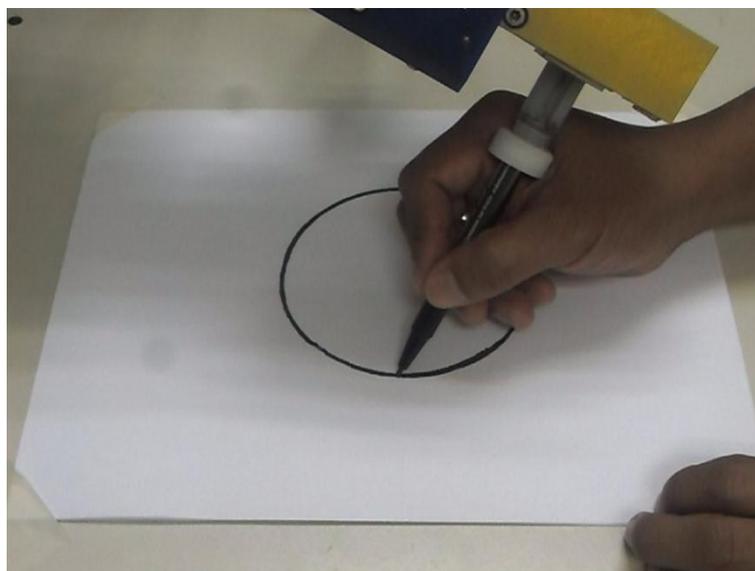


Fig. 43. Trayectoria básica con la figura de círculo.

Para el subsistema de formación de la trayectoria adquirida, los datos obtenidos primeramente fueron graficados en Matlab (ver fig. 44) y posteriormente fueron llevados al robot virtual del sistema robótico PowerCube (ver fig. 45) desarrollado en [42], debido a que el robot físico no permite el envío de datos de control para modificar la trayectoria como se mencionó en la sección 1.7.

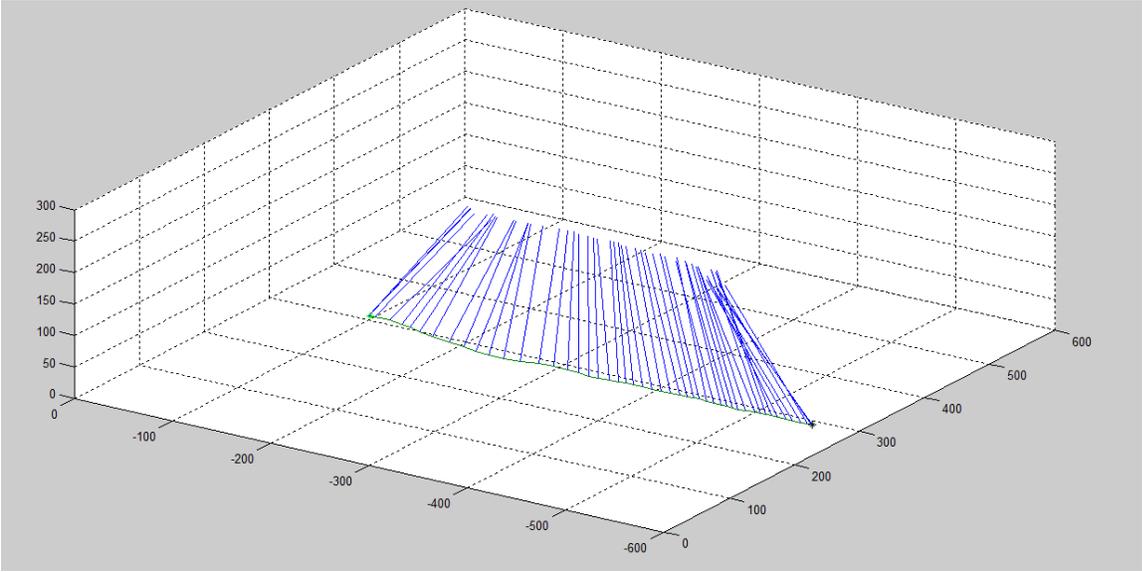


Fig. 44. Simulación en Matlab de la trayectoria adquirida.

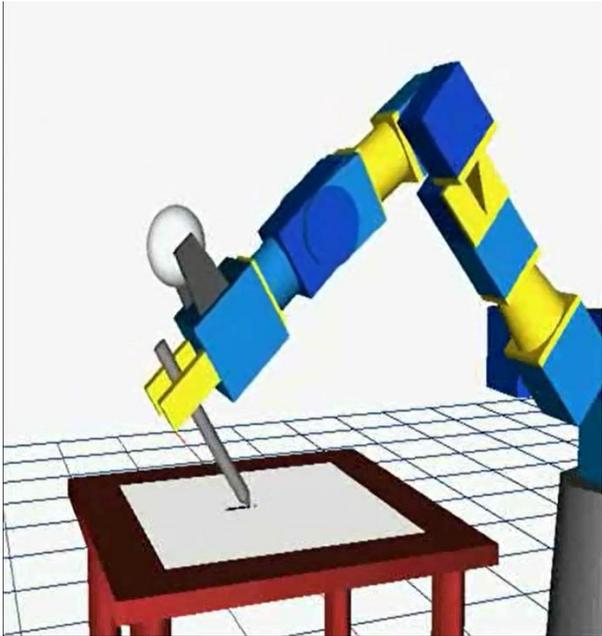


Fig. 45. Implementación de la trayectoria adquirida en el robot virtual.

Adicionalmente se simuló el movimiento del instrumento de escritura en el programa de simulación Maya [43] en su versión estudiantil (ver Fig. 46). Este software además permite la evaluación del movimiento adquirido desde diversas perspectivas.

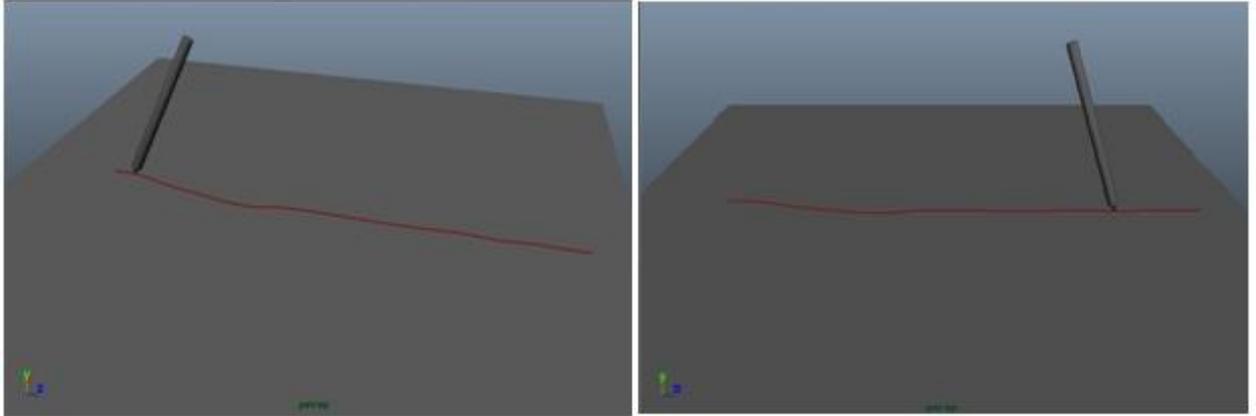


Fig. 46. Simulación en Maya de la trayectoria adquirida.

El sistema de control para el manipulador robótico de 6 grados de libertad PowerCube se simuló en la computadora con las características detalladas en la sub sección 6.1.1. El software desarrollado para la planificación de las trayectorias por splines cúbicos, genera los datos de posición, velocidad y aceleración para garantizar la continuidad entre dos puntos dados de la trayectoria articular, en base al cambio de los datos temporales.

Este programa realiza un cambio de velocidad entre dos puntos de la trayectoria articular cuando recibe un cambio en el tiempo, con la finalidad de ejemplificar el cambio de velocidad en el servomotor cuando exista una resistencia del paciente, respondiendo al movimiento del robot.

Para una trayectoria de línea recta en el plano de escritura fueron obtenidos los datos mostrados en la tabla 12 utilizando el software de generación de la trayectoria calculada para todas las articulaciones.

La figura 47 muestra la gráfica de los datos obtenidos para el cálculo de la trayectoria de la articulación Teta 1, con velocidad y aceleración inicial y final igual a cero e intervalos de 1.2 milisegundos. La figura 48 muestra la respuesta del programa con el

cambio en los intervalos de tiempo entre los puntos de interpolación propuestos como se muestra en la tabla 13.

Tabla 12. Valores de las articulaciones.

	Teta 1	Teta 2	Teta 3	Teta 4	Teta 5	Teta 6
P₁	33.113	-21.79	-54.10	-59.75	-23.89	-5.55
P₂	33.149	-24.33	-52.08	-63.74	-18.27	-5.48
P₃	32.983	-26.74	-50.03	-67.60	-12.63	-5.51
P₄	32.623	-29.0	-47.95	-71.36	-6.95	-5.66
P₅	32.081	-31.8	-45.84	-75.02	-1.2	-5.93
P₆	31.373	-32.94	-43.72	-78.59	4.6	-6.36
P₇	30.521	-34.54	-41.62	-82.05	10.5	-6.98
P₈	29.561	-35.85	-39.6	-85.39	16.51	-7.83
P₉	28.540	-36.82	-37.72	-88.60	22.61	-8.96

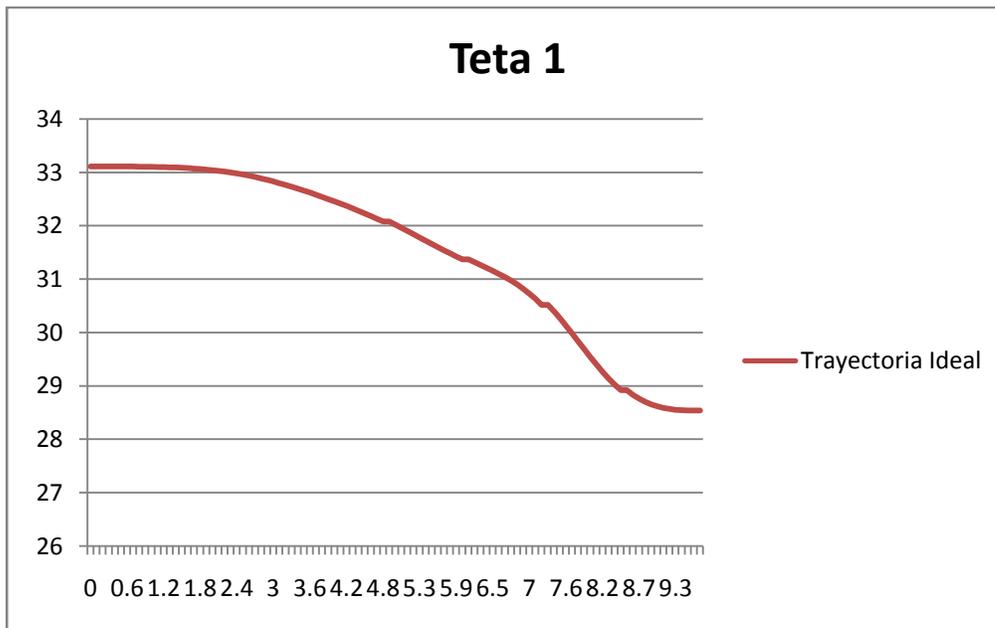


Fig. 47. Grafica de la trayectoria generada por splines cúbicos para Teta 1.

Tabla 13. Cambio en los valores de los intervalos para el re cálculo de la trayectoria.

Intervalos	Valor original (ms)	Valor modificado (ms)
I ₁	1.2	1.2
I ₂	1.2	1.2
I ₃	1.2	1.2
I ₄	1.2	1.4
I ₅	1.2	1.6
I ₆	1.2	1.8
I ₇	1.2	2.0
I ₈	1.2	2.2

En la siguiente gráfica se muestran las dos trayectorias, la trayectoria ideal cuando el paciente no opone resistencia al movimiento del robot y la trayectoria modificada en correspondencia a la resistencia del paciente. Como se puede observar en la figura, la trayectoria es la misma pero con un tiempo más largo. El tiempo de respuesta del programa de re cálculo de la trayectoria por splines cúbicos es de 39.142 ms.

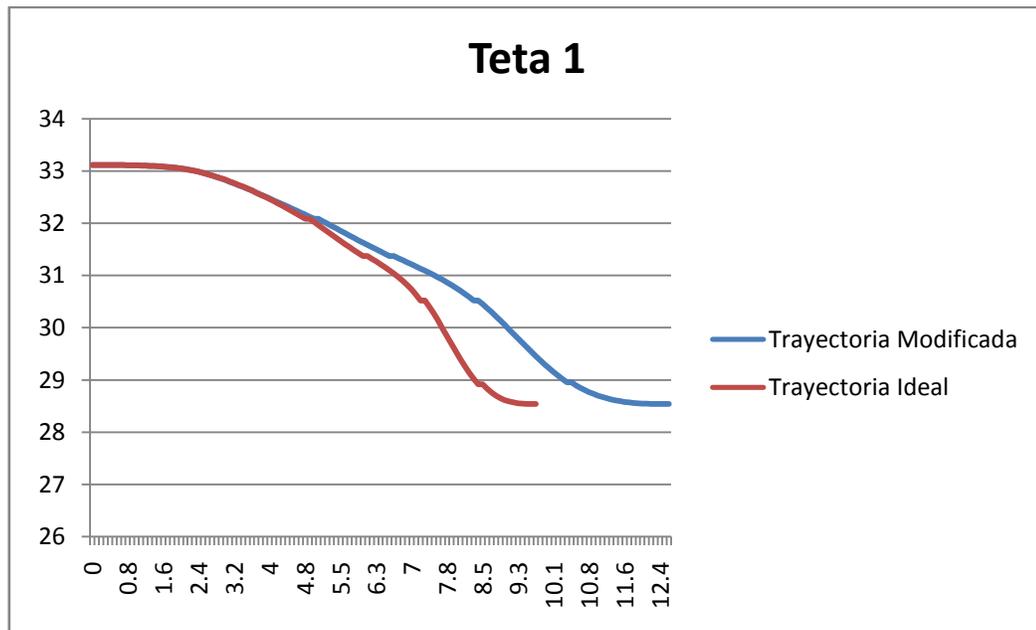


Fig. 48. Gráfica que representa el el cambio de la velocidad en la articulación 1 del robot PowerCube.

Capítulo 7 | CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

7.1. Conclusiones

Se desarrollaron los medios básicos que permiten el diseño y la construcción de sistemas de rehabilitación motora fina por el movimiento funcional de la escritura. Estos medios básicos, denominados subsistemas, se componen de algoritmos métodos y programas que pueden ser implementados sin dependencia del sistema robótico. Los resultados son originales ya que no existen sistemas integrales que permitan realizar una terapia basada en una tarea con tanta complejidad como la escritura.

El enfoque del sistema propuesto es activo ya que el sistema de rehabilitación responde a la intención del paciente para realizar los ejercicios de la escritura, modificando la velocidad del ejercicio en dependencia de la resistencia que opone el paciente al momento de realizar los ejercicios.

El subsistema de formación de la trayectoria provee la capacidad de construir la trayectoria por dos métodos, formación de la trayectoria calculada y la formación de la trayectoria adquirida. El primer método calcula la inclinación del instrumento de escritura en base a la posición de su punta sobre la superficie de escritura. El método de formación de la trayectoria adquirida provee la capacidad de obtener la trayectoria de una persona sana desde una tableta digitalizadora.

El subsistema de control de la trayectoria provee un esquema de control interactivo que hace uso del algoritmo de splines cúbicos para generar trayectorias que cambian la

velocidad del movimiento del sistema robótico. Para la implementación en un sistema robótico de este enfoque es necesario contar con sensores de fuerza.

Para evaluar el estado del paciente se desarrolló un método utilizando una tableta digitalizadora gráfica que permite obtener datos de posición, inclinación y tiempo de medición de los datos de un instrumento de escritura.

La aplicabilidad de los medios básicos desarrollados en este trabajo se confirmó por la simulación física del sistema robótico de rehabilitación interactiva, utilizando el robot de 6 grados de libertad PowerCube.

Todos los medios básicos desarrollados se implementaron en un sistema de rehabilitación que no hace uso de robots, utilizando una tableta digitalizadora. El sistema es aplicable para la rehabilitación de los pacientes con menor grado de lesión neuronal inicial o alcanzado como resultado de la terapia con aplicación del robot. El sistema es aplicable para el uso individual tanto en centros de rehabilitación como en el hogar de los pacientes, por medio de comunicación con el terapeuta a través de internet.

Ya que el esquema modular de los medios básicos se trató de manera general, este mismo esquema puede aplicarse para el diseño de sistemas de rehabilitación de alguna otra tarea funcional.

7.2. Trabajos a futuro

Desarrollar un prototipo del sistema propuesto buscando elementos de bajo costo, aplicando un análisis de usabilidad a las interfaces con el objetivo de hacer el sistema amigable para el paciente. También se pretende aplicar los medios básicos en el desarrollo de un software para la detección de distintas enfermedades mediante la evaluación de ejercicios escritos. Además de complementar el sistema propuesto con terapias que utilicen ambientes inmersivos como animaciones y juegos de video.

APENDICE.

Desarrollo del algoritmo de generación de una trayectoria por splines cúbicos

Para el polinomio cúbico su segunda derivada $Q''(t)$ tiene que ser una función lineal de t :

$$Q''_i(t) = \frac{Q''_i(t_i)}{u_i}(t_{i+1} - t) + \frac{Q''_i(t_{i+1})}{u_i}(t - t_i), \quad i \in [1, n - 1] \quad (A.1)$$

Dónde:

$n \rightarrow$ es el número total de puntos,

$t \rightarrow$ es el tiempo real,

$u \rightarrow$ es el intervalo de tiempo donde se encuentra el spline ($t_{i+1} - t_i$), va de u_1 hasta u_{n-1} ,

$i \rightarrow$ es el número de segmento, va desde 1 hasta $n - 1$

Denominamos $Q_i(t_i) = q_i$ y $Q_i(t_{i+1}) = q_{i+1}$.

Después de integrar (A.1) dos veces se obtiene:

$$Q_i(t) = \frac{Q''_i(t_i)}{6u_i}(t_{i+1} - t)^3 + \frac{Q''_i(t_{i+1})}{6u_i}(t - t_i)^3 + \left[\frac{q_{i+1}}{u_i} - \frac{u_i Q''_i(t_{i+1})}{6} \right] + \left[\frac{q_i}{u_i} - \frac{u_i Q''_i(t_i)}{6} \right] (t_{i+1} - t) \quad (A.2)$$

Las ecuaciones de $Q_i(t), i \in [1, n-1]$ contiene como las incógnitas $Q_i''(t_i)$ y $Q_i''(t_{i+1})$ bajo la condición $Q_1(t_2) = Q_2(t_2)$ y $Q_{n-2}(t_{n-1}) = Q_{n-1}(t_{n-1})$ los cuales no son conocidos.

La construcción de las ecuaciones con respecto a las aceleraciones se basa en las condiciones de continuidad de desplazamiento, velocidad y aceleraciones sobre la trayectoria completa. Para definir los valores de $Q_1(t_2)$ y $Q_{n-1}(t_{n-1})$ se utilizan las igualdades $Q_1'(t_1) = v_1$ y $Q_{n-1}'(t_n) = v_n$.

La expresión para velocidad $Q_i(t)$ se recibe con derivación de $Q_i(t)$ de (A.2):

$$Q_i'(t) = -\frac{Q_i''(t_i)}{2u_i}(t_{i+1} - t)^2 + \frac{Q_i''(t_{i+1})}{2u_i}(t - t_i)^2 + \frac{q_{i+1}}{u_i} - \frac{u_i}{6}Q_i''(t_{i+1}) - \frac{q_i}{u_i} + \frac{u_i}{6}Q_i''(t_i)$$

En el instante $t = t_1$ tenemos

$$Q_1'(t_1) = -\frac{Q_1''(t_1)}{2}u_1 + 0 + \frac{q_2}{u_1} - \frac{u_1}{6}Q_1''(t_2) - \frac{q_1}{u_1} + \frac{u_1}{6}Q_1''(t_1) \quad (A.3)$$

Con los valores conocidos $Q_1'(t_1) = v_1$; $Q_1''(t_1) = a_1$; $Q_1''(t_2) = Q_2''(t_2)$, por lo tanto despejando $Q_2(t_2)$ se encuentra la expresión para $Q_2(t_2)$:

$$Q_2(t_2) = q_1 + u_1v_1 + \frac{u_1^2a_1}{3} + \frac{u_1^2}{6}Q_2''(t_2) \quad (A.4)$$

Donde $Q_2(t_2)$ es una función de $Q_2''(t_2)$ todavía no conocida.

Análogamente utilizando la expresión $Q_n'(t_n)$ y los valores conocidos $Q_{n-1}'(t_n) = v_n$, $Q_{n-1}''(t_n) = a_n$, $Q_{n-2}''(t_{n-1}) = Q_{n-1}''(t_{n-1})$ se encuentra:

$$Q_{n-1}(t_{n-1}) = q_n + u_{n-1}v_n + \frac{u_{n-1}^2a_n}{3} + \frac{u_{n-1}^2}{6}Q_{n-1}''(t_{n-1}) \quad (A.5)$$

Para construir las ecuaciones con respecto a las aceleraciones desconocidas Q_i'' se utiliza la continuidad de las velocidades en los nodos comunes para splines $Q_i''(t_{i+1}) = Q_{i+1}''(t_{i+1}), i \in [1, n-1]$.

A continuación se ejemplifica la construcción de las ecuaciones para 5 splines cúbicos generalizando la última y antepenúltima ecuación.

Para el segundo nodo que corresponde al instante t_2 de (A.3) para $i = 1$ obtenemos:

$$Q_1'(t_2) = 0 + \frac{u_1}{2} Q_1''(t_2) + \frac{Q_2(t_2)}{u_1} - \frac{u_1}{6} Q_1''(t_2) - \frac{q_1}{u_1} + \frac{u_1}{6} Q_1''(t_1) \quad (\text{A.6})$$

De las igualdades $Q_1''(t_2) = Q_2''(t_2)$, $Q_1''(t_1) = a_1$ y de la ecuación (A.4) recibimos:

$$Q_1'(t_2) = \frac{u_1}{2} Q_2''(t_2) + \frac{u_1}{6} a_1 - \frac{q_1}{u_1} + \frac{1}{u_1} \left(q_1 + u_1 v_1 + \frac{u_1^2 a_1}{3} \right)$$

De (A.3):

$$Q_2'(t_2) = -\frac{u_2}{2} Q_2''(t_2) + 0 + \frac{q_3}{u_2} - \frac{u_2}{6} Q_2''(t_3) - \frac{q_2}{u_2} + \frac{u_2}{6} Q_2''(t_2)$$

Cambiamos $\frac{q_2}{u_2}$ por $\frac{Q_2(t_2)}{u_2} = \frac{1}{u_2} \left(q_1 + u_1 v_1 + \frac{u_1^2 a_1}{3} \right) + \frac{u_1^2}{6} Q_2''(t_2)$.

Utilizamos las igualdades $Q_2''(t_3) = Q_3''(t_3)$ y $Q_2''(t_2) = Q_1''(t_2)$ con lo que tenemos:

$$Q_2'(t_2) = -\frac{u_2}{3} Q_2''(t_2) - \frac{u_2}{6} Q_3''(t_3) + \frac{q_3}{u_2} - \frac{u_1^2}{6u_2} Q_1''(t_2) - \frac{1}{u_2} \left(q_1 + u_1 v_1 + \frac{u_1^2 a_1}{3} \right) \quad (\text{A.7})$$

Después de igualar $Q_2'(t_2) = Q_1'(t_2)$ de (A.6) y (A.7) se recibe la ecuación lineal por las dos desconocidas $Q_3''(t_3)$ y $Q_2''(t_2)$ que nos da:

$$\left(3u_1 + 2u_2 + \frac{u_1^2}{u_2} \right) Q_2''(t_2) + u_2 Q_3''(t_3) \quad (\text{Ec.1})$$

$$= -6 \left(\frac{q_3}{u_2} + \frac{q_1}{u_1} \right) - 6 \left(\frac{1}{u_2} + \frac{1}{u_1} \right) \left(q_1 + u_1 v_1 + \frac{u_1^2 a_1}{3} - u_1 a_1 \right) \quad (\text{A.8})$$

De (A.3) sigue:

$$Q_2'(t_3) = \left(\frac{u_2}{6} - \frac{u_1^2}{6u_2} \right) Q_2''(t_2) + \frac{u_2}{3} Q_2''(t_3) + \frac{q_3 - q_1}{u_2} - \frac{u_1}{u_2} v_1 - \frac{u_1^2}{3u_2} a_1 \quad (\text{A.9})$$

$$Q'_3(t_3) = -\frac{u_3}{3}Q''_3(t_3) - \frac{u_3}{6}Q''_3(t_4) + \frac{q_4 - q_3}{u_3} \quad (\text{A. 10})$$

Después de igualar (A.9) y (A.10) y tomando en cuenta que $Q''_2(t_3) = Q''_3(t_3)$ y $Q''_3(t_4) = Q''_4(t_4)$ se recibe:

$$\left(u_2 - \frac{u_1^2}{u_2}\right)Q''_2(t_2) + 2(u_2 + u_3)Q''_3(t_3) + u_3Q''_4(t_4) \quad (\text{Ec. II})$$

$$= \frac{6}{u_2} \left(q_1 + u_1v_1 + \frac{u_1^2a_1}{3}\right) + \frac{6q_4}{u_3} - 6\left(\frac{1}{u_2} + \frac{1}{u_3}\right)q_3 \quad (\text{A. 11})$$

Iguamos las expresiones para $Q'_3(t_4)$ y $Q'_4(t_4)$:

$$Q'_3(t_4) = \frac{u_3}{3}Q''_3(t_4) + \frac{u_3}{6}Q''_3(t_3) + \frac{q_4 - q_3}{u_3} \quad (\text{A. 12})$$

$$Q'_4(t_4) = -\frac{u_4}{3}Q''_4(t_4) - \frac{u_4}{6}Q''_4(t_5) + \frac{Q_5(t_5) - q_4}{u_4} \quad (\text{A. 13})$$

Después de sustituir $Q_5(t_5)$ de (A.5) ($Q_{n-1}(t_{n-1})$ de (5a)) y tomando en cuenta que $Q''_3(t_4) = Q''_4(t_4)$ se recibe:

$$u_3Q''_3(t_3) + 2(u_3 + u_4)Q''_4(t_4) + \left(u_4 - \frac{u_5^2}{u_4}\right)Q''_5(t_5) \quad (\text{Ec. III})$$

$$= \frac{6}{u_4} \left(q_6 - u_5v_6 + \frac{u_5^2a_6}{3}\right) - 6\left(\frac{1}{u_4} + \frac{1}{u_3}\right)q_4 + \frac{6}{u_3}q_3 \quad (\text{A. 14})$$

o

$$\begin{aligned} & u_{n-3}Q''_{n-3}(t_{n-3}) + 2(u_{n-3} + u_{n-2})Q''_{n-2}(t_{n-2}) + \left(u_{n-2} - \frac{u_{n-1}^2}{u_{n-2}}\right)Q''_{n-1}(t_{n-1}) \\ &= \frac{6}{u_{n-2}} \left(q_n - u_{n-1}v_n + \frac{u_{n-1}^2a_n}{3}\right) - 6\left(\frac{1}{u_{n-2}} + \frac{1}{u_{n-3}}\right)q_{n-2} \\ &+ \frac{6}{u_{n-3}}q_{n-3} \end{aligned} \quad (\text{A. 14a})$$

Iguualamos las expresiones para $Q_4'(t_5)$ y $Q_5'(t_5)$:

$$Q_4'(t_5) = \frac{u_4}{3} Q_4''(t_4) + \frac{u_4}{6} Q_4''(t_4) + \frac{Q_5(t_5) - q_4}{u_4} \quad (\text{A.15})$$

$$Q_5'(t_5) = -\frac{u_5}{3} Q_5''(t_5) - \frac{u_5}{6} Q_5''(t_6) + \frac{q_6 - Q_5(t_5)}{u_5} \quad (\text{A.16})$$

Después de sustituir $Q_5(t_5)$ de (A.5) ($Q_{n-1}(t_{n-1})$ de (A.5a)) y tomando en cuenta que $Q_4''(t_5) = Q_4''(t_4)$ se recibe:

$$u_4 Q_4''(t_4) + \left(3u_5 + 2u_4 + \frac{u_5^2}{u_4}\right) Q_5''(t_5) \quad (\text{Ec. IV})$$

$$= -6 \left(\frac{1}{u_5} + \frac{1}{u_4}\right) \left(q_6 - u_5 v_6 + \frac{u_5^2 a_6}{3}\right) + \frac{6}{u_5} q_6 + \frac{6}{u_4} q_4 - u_5 a_6 \quad (\text{A.17})$$

ó

$$\begin{aligned} & u_{n-2} Q_{n-2}''(t_{n-2}) + 3u_{n-1} + \left(2u_{n-2} + \frac{u_{n-1}^2}{u_{n-2}}\right) Q_{n-1}''(t_{n-2}) \\ & = -6 \left(\frac{1}{u_{n-1}} + \frac{1}{u_{n-2}}\right) \left(q_n - u_{n-1} v_n + \frac{u_{n-1}^2 a_n}{3}\right) + \frac{6}{u_{n-1}} q_n \\ & + \frac{6}{u_{n-2}} q_{n-2} - u_{n-1} a_n \end{aligned} \quad (\text{A.17a})$$

Ahora se tiene 4 ecuaciones para 4 incógnitas $Q_i''(t_i)$, $i = 2,3,4,5$.

El sistema de $n - 2$ ecuaciones con respecto a las incógnitas $Q_2''(t_2), \dots, Q_{n-1}''(t_{n-1})$ con u_1 hasta u_{n-1} conocidos. Se plantea en forma matricial de la siguiente manera $A\vec{Q}'' = \vec{b}$ donde

$$\vec{Q}'' = \begin{bmatrix} Q_2''(t_2) \\ \vdots \\ Q_{n-1}''(t_{n-1}) \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 3u_1 + 2u_2 + \frac{u_1^2}{u_2} & u_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ u_2 - \frac{u_1^2}{u_2} & 2(u_2 + u_3) & u_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_3 & 2(u_3 + u_4) & u_4 & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & 0 & u_{n-4} & 2(u_{n-4} + u_{n-3}) & u_{n-3} & 0 \\ & & & u_{n-3} & 2(u_{n-3} + u_{n-2}) & u_{n-2} - \frac{u_{n-1}^2}{u_{n-2}} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & u_{n-2} & 3u_{n-1} + 2u_{n-2} + \frac{u_{n-1}^2}{u_{n-2}} \end{bmatrix}$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} 6\left(\frac{q_3}{u_2} + \frac{q_1}{u_1}\right) - 6\left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2}\right)\left(q_1 + u_1 v_1 + \frac{u_1^2 a_1}{3}\right) - u_1 a_1 \\ \frac{6}{u_2}\left(q_1 + u_1 v_1 + \frac{u_1^2 a_1}{3}\right) + \frac{6}{u_3} q_4 - 6\left(\frac{1}{u_3} + \frac{1}{u_2}\right) q_3 \\ 6\left(\frac{q_5 - q_4}{u_4} - \frac{q_4 - q_3}{u_3}\right) \\ \vdots \\ 6\left(\frac{q_{n-2} - q_{n-3}}{u_{n-3}} - \frac{q_{n-3} - q_{n-4}}{u_{n-4}}\right) \\ \frac{6}{u_{n-2}}\left(q_n + u_{n-1} v_n + \frac{u_{n-1}^2 a_n}{3}\right) - 6\left(\frac{1}{u_{n-3}} + \frac{1}{u_{n-2}}\right) q_{n-2} + \frac{6}{u_{n-3}} q_{n-3} \\ -6\left(\frac{1}{u_{n-1}} + \frac{1}{u_{n-2}}\right)\left(q_n + u_{n-1} v_n + \frac{u_{n-1}^2 a_n}{3}\right) + 6\left(\frac{q_n}{u_{n-1}} + \frac{q_{n-2}}{u_{n-2}}\right) - u_{n-1} a_n \end{bmatrix}$$

Para resolver el sistema de ecuaciones $A\vec{Q} = \vec{b}$, se observa que la matriz A es una matriz 3-diagonal en banda.

Una matriz se llama matriz 3-diagonal si la celda $a_{ij} = 0$ para $i - j > k_1$ y $j - i > k_2$. El valor $k_1 + k_2$ se llama ancho de banda. Si $k_1 = k_2 = 1$ entonces se dice la matriz es una matriz 3-diagonal.

La matriz A queda de la siguiente forma:

Como resultado de los cálculos se encuentran los valores de λ_1 hasta λ_{n-1} , l_1 hasta l_n , u_1 hasta u_{n-1} . λ y l se aplican para encontrar el vector \vec{y} , u para encontrar el vector \vec{x} .

Después de la construcción de la matriz LU se busca la solución del sistema lineal $L\vec{y} = \vec{b}$ el cual se representa como:

$$L\vec{y} = \vec{b}: \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 & & & \\ \lambda_1 & l_2 & 0 & & & \\ 0 & \lambda_2 & l_3 & & & \\ & & \ddots & \ddots & & \\ & & & \lambda_{n-2} & l_{n-1} & 0 \\ & & & 0 & \lambda_{n-1} & l_n \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{bmatrix},$$

Del recorrido directo de $L\vec{y} = \vec{b}$ se tiene:

$$\begin{array}{ll} l_1 y_1 = b_1 & y_1 = \frac{b_1}{l_1} \\ \lambda_1 y_1 + l_2 y_2 = b_2 & y_2 = \frac{1}{l_2} (b_2 - \lambda_1 y_1) \\ \lambda_2 y_2 + l_3 y_3 = b_3 & y_3 = \frac{1}{l_3} (b_3 - \lambda_2 y_2) \\ \vdots & \vdots \\ \lambda_{n-2} y_{n-2} + l_{n-1} y_{n-1} = b_{n-1} & y_{n-1} = \frac{1}{l_{n-1}} (b_{n-1} - \lambda_{n-2} y_{n-2}) \\ \lambda_{n-1} y_{n-1} + l_n y_n = b_n & y_n = \frac{1}{l_n} (b_n - \lambda_{n-1} y_{n-1}) \end{array}$$

El vector buscado \vec{x} se obtiene como la solución del sistema lineal $U\vec{x} = \vec{y}$ el cual se representa como:

$$U\vec{x} = \vec{y}: \begin{bmatrix} 1 & u_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & u_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & u_3 \\ & & & \ddots \\ & & & & \ddots \\ & & & & & 1 & u_{n-1} \\ 0 & & & & & & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix}$$

Del recorrido inverso de $U\vec{x} = \vec{y}$ se tiene:

$$\begin{array}{ll} x_n = y_n & x_n = y_n \\ x_{n-1} + u_{n-1}x_n = y_{n-1} & x_{n-1} = y_{n-1} - u_{n-1}x_n \\ \vdots & \vdots \\ x_3 + u_3 x_4 = y_3 & x_3 = y_3 - u_3 x_4 \\ x_2 + u_2 x_3 = y_2 & x_2 = y_2 - u_2 x_3 \\ x_1 + u_1 x_2 = y_1 & x_1 = y_1 - u_1 x_2 \end{array}$$

Bibliografía

- [1] Jose Fernando Reyes Cortés, *Robótica control de robots manipuladores*, Primera edición ed. México: Alfaomega, 2011.
- [2] I. Pascual-Castroviejo, "Plasticidad cerebral," *Revneurol*, vol. 24, no. 135, pp. 61-66, 1996.
- [3] H.F. Machiel Van Der Loss and Navid Shirzad, "Therapy Robotics: The Power of the Interface to Motivate," in *ROMAN 2011 - The 20th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 2011.
- [4] Laura Marchal-Crespo and David J. Reinkensmeyer, "Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury," *Journal or NeuroEngineering and rehabilitation*, pp. 6-20, 2009.
- [5] J.V.G Robertson, N. Jarrassé, and A. Roby-Brami, "Rehabilitation robots: a compliment to virtual reality," *Schedae*, vol. 6, no. 1, pp. 77-94, 2010.
- [6] Elliott TR., "Guest Editorial: Rehabilitation Research and Development state-of-the-art conference on outcome measures in rehabilitation," *J Rehabil Res Dev*, vol. 49, no. 1, pp. 83-86, 2012.
- [7] Michael Hillman, "Rehabilitation robotics from past to present - a historical perspective," pp. 1-4, Abril 2003.
- [8] H.I. Krebs, N. Hogan, M.L. Aisen, and B.T. Volpe, "Robot-aided neurorehabilitation," *IEEE Trans. Rehab*, pp. 75-87, 1998.
- [9] T. Neft and R. Riener, "ARMin Design of a novel Arm Rehabilitation Robot," *Proceedings of the 2005*, vol. 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005.
- [10] S.K. Charles, H.I. Krebs, B.T. Volpe, D. Lynch, and N. Hogan, "Wrist rehabilitation following stroke: initial clinical results," in *Procedings of the 9th International Conference of Rehabilitation Robotics*, Chicago Il., 2005, pp. 13-16.

- [11] (2010) Tyromotion. [Online]. <http://www.tyromotion.com>
- [12] (2010) YouRehab. [Online]. <http://www.yourehab.com>
- [13] Janis J. Daly et al., "Response to upper-limb robotics and functional neuromuscular stimulation following stroke," *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol. 42, no. 6, pp. 723-736, November/December 2005.
- [14] Kathleen E. Yancosek and David R. Mullineaux, "Stability of handwriting performance following injury-induced hand dominance transfer in adults: A pilot study," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 48, no. 1, pp. 59-68, 2011.
- [15] THE MANAGEMENT OF STROKE REHABILITATION Working Group. (2010) Department of Veterans Affairs. [Online]. http://www.healthquality.va.gov/Management_of_Stroke_Rehabilitation.asp
- [16] OMS. (2011) Informe Mundial Sobre la Discapacidad. [Online]. <http://www.who.int>
- [17] Carlos O. Grushka and Gustavo Demarco, "Disability Pensions and Social Security Reform Analysis of the Latin American Experience," World Bank, Washington D.C., December 2003.
- [18] José E. Urquieta-Salomón, José L. Figueroa, and Bernardo Hernández-Prado, "El gasto en salud relacionado con la condición de discapacidad. Un análisis en población pobre de México.," *Salud Pública de México*, vol. 50, no. 2, pp. 136-146, Marzo-Abril 2008.
- [19] Janeth Hernández Jaramillo and Iván Hernández Umaña, "Una aproximación a los costos indirectos de la discapacidad en Colombia," *Revista de Salud Pública*, vol. 7, no. 002, pp. 130-144, Julio 2005.
- [20] Pedro Sanchez-Escobedo, "Discapacidad, familia y logro escolar," *Revista Iberoamericana de Educación*, vol. 40, no. 2, Octubre 2006.
- [21] INEGI. (2010) INEGI Población, Discapacidad en México, Censo de Población y vivienda 2010. [Online]. <http://cuentame.inegi.org.mx>
- [22] CONAPRED, "Diagnóstico de la discriminación en el estado de Oaxaca," Dirección

- General Adjunta de Estudios, Legislación y Políticas Públicas del CONAPRED, Consejo Nacional para Prevenir la Discriminación, México D.F., Documento de trabajo 2008. [Online].
<http://cedoc.inmujeres.gob.mx/lgamv/v/CONAPRED/conapred04.pdf>
- [23] CIEDD. (2011) Centro de Información Estadística y Documental para el Desarrollo. [Online]. <http://www.ciedd.oaxaca.gob.mx/sp/>
- [24] Maria Eulalia Mendoza García and Graciela Tapia Colocia, "Situación Demográfica de México 1910-2010," pp. 11-24, 2010.
- [25] Gabriela Rodríguez-Abrego, Jorge Escobedo de la Peña, Beatriz Zurita, and Teresita de Jesus Ramírez, "Muerte prematura y discapacidad en los derechohabientes del Instituto Mexicano del Seguro Social," *Salud Pública de México*, vol. 49, no. 2, pp. 132-143, marzo-abril 2007.
- [26] Simón Brailowsky, Donald G. Stein, and Bruno Will, *El cerebro averiado: plasticidad cerebral y recuperación funcional*. Mexico D.F.: Fondo de cultura económica, 1992.
- [27] SECRETARIA DE SALUD, "Programa de Acción Específico 2007-2012. Atención integral a la salud de las personas con discapacidad," Secretaría de Salud, México D.F., ISBN: 978-607-460-056-8, 2009.
- [28] Secretaría de Salud. (2009) Rehabilitación de adultos con enfermedad vascular cerebral, Evidencias y Recomendaciones. [Online].
<http://www.cenetec.salud.gob.mx/interior/gpc.html>
- [29] Ozkan Celik et al., "Normalized Movement Quality Measures for Therapeutic Robots Strongly Correlate With Clinical Motor Impairment Measures," *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 433-444, August 2010.
- [30] OMS. (2012, Septiembre) Enfermedades Cardiovasculares. [Online].
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/es/index.html>
- [31] Judith D. Schaechter, "Motor rehabilitation and brain plasticity after hemiparetic stroke," *Progress in Neurobiology*, vol. 73, no. 1, pp. 61-72, Mayo 2004.

- [32] K. Faddy, A. McCluskey, and NA. Lannin, "Interrater Reliability of a New Handwriting Assessment Battery for Adults," *The American Journal of Occupational Therapy*, vol. 62, no. 5, pp. 595-599, Septiembre/Octubre 2008.
- [33] RH. Jebsen, N. Taylor, RB. Trieschmann, MJ. Trotter, and LA Howard, "An objective and standardized test of hand," *Archives of Physical Medicine and rehabilitation*, vol. 50, no. 6, pp. 311-319, 1969.
- [34] Secretaría de Salud, "Rehabilitación de Adultos con Enfermedad Vasculat Cerebral: Guía de Referencia Rápida," Consejo de Salubridad Ganeral, Secretaría de Salud, México D.F., Catálogo Maestro 2009.
- [35] V. Rybak and G. Siguenza-Paz, "Solución en forma cerrada del problema cinemático inverso para el manipulador de configuración TRTRRT," in *Memorias del Congreso de Instrumentación SOMI XX*, León Guanajuato, 2005.
- [36] Y. Pei, Y. Kim, G. Obinata, K. Hase, and D. Stefanov, "Trajectory planning of a robot for lower limb rehabilitation," in *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE*, Boston MA, 2011, pp. 1259-1263.
- [37] Y. Pei, Y. Kim, G. Obinata, E. Genda, and D. Stefanov, "Robot-aided rehabilitation task design for inner shoulder muscles," in *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE*, San Diego, CA, 2012, pp. 3922-3925.
- [38] JPEN. (2012) JPEN. [Online]. <http://sourceforge.net/apps/mediawiki/jpen/>
- [39] V. Rybak and D. Vásquez-Hernández, "Herramientas para adaptar el entorno a las capacidades de un robot de servicio en interiores," in *Memorias del 3er. congreso Nacional de Mecatrónica*, Pachuca México, 2009.
- [40] Oracle. (2010) Java. [Online]. <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/overview/index.html>
- [41] Netbeans. (2012) Netbeans. [Online]. <http://netbeans.org/>
- [42] Vitaliy Rybak and Gabriel Siguenza-Paz, "Desarrollo del Sistema de Programación Fuera de Línea del Robot Industrial TRTRRT," in *4to. Congreso Nacional de*

Mecatrónica, Cohahuila, México, 2005, pp. 55-60.

- [43] (2012, Diciembre) Sitio Web de Maya Autodesk. [Online]. <http://www.autodesk.com/products/autodesk-maya/overview>
- [44] K. S. Fu, R. C. Gonzales, and C.S. G. Lee, "Robótica, control, detección, visión e Inteligencia," 1988.
- [45] ATI. (2011) Nano17. [Online]. http://www.atia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Nano17
- [46] Andrew S. Cornwell, James Y. Liao, Anne M. Bryden, and Robert F. Kirsch, "Standark task set for evaluating rehabilitation interventions for individuals with arm paralysis," *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol. 49, no. 3, pp. 395-404, 2012.
- [47] Reza N. Jazar, *Theory of Applied Robotics, Kinematics, Dynamics and Control*. New York, USA: Springer, 2010.
- [48] Conapred, "Encuesta Nacional sobre Discriminación en México ENADIS 2010," México D.F., ISBN: 978-607-7514-24-4, 2010.
- [49] Vitaliy Rybak and Wilebaldo Martínez-Velazco, "Neurorehabilitación Motora Fina Funcional Asistida por Robot con la Formación Automática de la Trayectoria de Movimiento de un Instrumento de Escritura," in *Congreso Nacional de Computación e Informatica 2012*, vol. IV, Ciudad del Carmen, Campeche, México., 2012, pp. 133-140.
- [50] Bryan Kolb and Ian Q. Whishaw, *Neuropsicología humana*, Quinta edición ed. México D.F.: Editorial Médica Panamericana, 2006.
- [51] Cerebro. (2012) Cerebro. [Online]. <http://www.clinicacerebro.com.mx/>

