



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Sistema Mecatrónico para
Rehabilitación de Pacientes con
Accidente Cerebrovascular**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Mecatrónica

P R E S E N T A

Sandra Montserrat García Villalpando

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Octavio Díaz Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

DEDICATORIA

Para aquellos por quienes soy quién soy
y que, gracias a ellos, he llegado hasta aquí.

A mis padres, a mis hermanos, a Moxi y a Dakota,
por ser los pilares de mi vida y por su apoyo incondicional.



AGRADECIMIENTOS

A mis padres:

Por su apoyo, paciencia y comprensión, y por darme lo mejor de ustedes para el cumplimiento de mis metas.

A mis hermanos y a mi sobrina:

Porque a pesar de nuestras discusiones y desencuentros, ustedes siempre permanecen a mi lado apoyándome y acompañándome.

A mis amigos:

Por las experiencias que me han dejado, por su apoyo moral, su compañía y su consejo en los buenos y malos momentos.

A Moxi y Dakota:

Por ser mis fieles compañeras y amigas, por haberme acompañado durante desvelos y por darme tantos momentos de alegría y tranquilidad a su lado.

A mi director de tesis, profesores y sinodales:

Por permitirme aprender de y con ustedes, así como por haberme guiado durante el desarrollo de esta tesis.

A mi Facultad y, en general, a la UNAM:

Por haberme dado la oportunidad de tener acceso a sus instalaciones y recursos para mi correcta formación académica.

A todas aquellas personas que contribuyeron con sus ideas, conocimientos y participación durante la realización de este proyecto, porque gracias a su disposición se logró la conclusión del mismo.

A todos ustedes: ***¡GRACIAS!***

Índice

Lista de Abreviaturas.....	iv
Lista de Tablas.....	v
Lista de Figuras.....	v
I) RESUMEN.....	1
II) OBJETIVOS.....	3
1. Objetivo General.....	3
2. Objetivos Particulares.....	3
III) ALCANCES.....	3
IV) JUSTIFICACIÓN.....	4
V) INTRODUCCIÓN.....	5
1. Enfermedad Vascular Cerebral.....	5
a) El Accidente Cerebrovascular (ACV).....	6
b) Secuelas del accidente cerebrovascular.....	7
c) Relación del control motor del cuerpo con el accidente cerebrovascular.....	10
d) Epidemiología del accidente cerebrovascular.....	11
2. Rehabilitación.....	14
a) Rehabilitación tras un accidente cerebrovascular.....	14
b) Rehabilitación activa, asistida y pasiva.....	15
c) Etapas de la rehabilitación del accidente cerebrovascular.....	16
d) Terapias de rehabilitación.....	18
e) Aplicación de la robótica en la rehabilitación.....	28
f) Tipos de robots en la rehabilitación de miembro superior.....	30
VI) ESTADO DEL ARTE.....	31
1. Robots Utilizados en la Rehabilitación.....	31
a) Robots de efector final.....	31
b) Robots de exoesqueleto.....	36
2. Cuadro Comparativo.....	42
3. Análisis de la Tendencia.....	43
4. Consideraciones.....	43

VII)	MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
1.	Diseño del Sistema.....	44
a)	Requerimientos	44
b)	Diagramas del sistema	45
2.	Componentes del Subsistema Mecánico.....	45
a)	Mecanismo	45
3.	Componentes del Subsistema Electrónico.....	46
a)	Sensores de posición angular	46
b)	Tarjeta de desarrollo.....	47
c)	Otros	47
4.	Componentes del Subsistema Informático	48
a)	Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino	48
b)	Processing.....	49
c)	MATLAB	50
5.	Cinemática Directa.....	51
6.	Lectura de las Posiciones Angulares	52
a)	Configuración de los sensores	52
b)	Programación en el Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino.....	52
7.	Programación de la Interfaz de Usuario	53
a)	Diseño de la interfaz	53
b)	Programación de la interfaz en Processing.....	53
8.	Procesamiento de Datos Obtenidos	57
a)	Obtención de gráficas	57
VIII)	EXPERIMENTACIÓN CON EL SISTEMA MECATRÓNICO.....	60
1.	Realización del Experimento Preliminar con Sujetos Sanos.....	60
a)	Objetivo del estudio.....	60
b)	Criterios de inclusión	60
c)	Criterios de exclusión.....	60
d)	Criterios de eliminación	60
e)	Realización de la convocatoria.....	60
f)	Entrega de documentación.....	60

g)	Realización de la entrevista	61
h)	Instrucciones.....	61
2.	Configuración Física del Experimento.....	61
3.	Configuración de los Componentes Informáticos.....	65
a)	Programación del Arduino DUE	65
b)	Ejecución del programa en Processing	65
4.	Realización del Ejercicio por el Usuario	65
5.	Procesamiento de Datos.....	71
IX)	RESULTADOS	74
1.	Trazo de la Espiral Brazos Izquierdo y Derecho	74
2.	Tiempo en Alcanzar los Objetivos	78
3.	Comportamiento Posición en ‘X’	81
4.	Comportamiento Posición en ‘Y’.....	84
X)	CONCLUSIONES.....	87
XI)	TRABAJO A FUTURO	89
XII)	REFERENCIAS.....	91
XIII)	APÉNDICES	95
	APÉNDICE A. DIAGRAMAS Y CÓDIGO DE LA PROGRAMACIÓN EN ARDUINO.....	95
	APÉNDICE B. DIAGRAMAS Y CÓDIGO DE LA PROGRAMACIÓN EN PROCESSING.....	100
	APÉNDICE C. CÓDIGO DE LA PROGRAMACIÓN EN MATLAB	114
	APÉNDICE D. CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA EL ESTUDIO PRELIMINAR	118
	APÉNDICE E. CUESTIONARIO APLICADO EN EL ESTUDIO PRELIMINAR	124
	APÉNDICE F. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN	125
	APÉNDICE G. CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO	136
	APÉNDICE H. CARTA DE REVOCACIÓN DEL CONSENTIMIENTO	142
	APÉNDICE I. CUESTIONARIO.....	144

Lista de Abreviaturas

ACV – Accidente Cerebrovascular

AVD – Actividades de la Vida Diaria

BF-EMG – Biofeedback Electromiográfico

COM – Comunicaciones

CPR – Ciclos por Revolución

EEF – Estimulación Eléctrica Funcional

EENM – Estimulación Eléctrica Neuromuscular

EVC – Enfermedad Vasculat Cerebral

FNP – Facilitación Neuromuscular Propioceptiva

GABA – Ácido Gamma-AminoButírico

GDL – Grados de Libertad

IDE – Entorno de Desarrollo Integrado

Inc. – Incorporation

inMotion – Interactive Motion

iPAM – Intelligent Pneumatic Arm Movement

M.A. – Massachusetts

MIME – Mirror-Image Motion Enabler

MIT – Instituto Tecnológico de Massachusetts

OMS – Organización Mundial de la Salud

PPR – Pulsos por Revolución

RHB - Rehabilitación

USB – Bus Universal en Serie

VDC – Volts de Corriente Directa

Lista de Tablas

Tabla 1. Denominaciones del accidente cerebrovascular	6
Tabla 2. Tabla comparativa de los dispositivos para rehabilitación	42
Tabla 3. Promedios de error calculados.....	77

Lista de Figuras

Figura 1. ACV Hemorrágico e isquémico [4].....	5
Figura 2. Partes del cerebro [5].....	7
Figura 3. Funciones de los hemisferios del cerebro [6].....	8
Figura 4. Cerebelo [7]	9
Figura 5. Funciones del tronco cerebral [8]	10
Figura 6. Homúnculo somato-sensorial del cerebro humano [10].....	11
Figura 7. Principales causas de muerte en el año 2015	11
Figura 8. Estadística de los sobrevivientes del ACV.....	12
Figura 9. Áreas funcionales del cerebro [19]	13
Figura 10. Tratamiento de fisioterapia [23]	15
Figura 11. Fase aguda [26]	16
Figura 12. Fase subaguda [26]	17
Figura 13. Rehabilitación domiciliaria [27].....	18
Figura 14. Método Bobath [31].....	20
Figura 15. Facilitación Neuromuscular Propioceptiva [32]	21
Figura 16. Movimiento orientado a tareas [33]	22
Figura 17. Terapia de movimiento inducido por restricción [34].....	23
Figura 18. Ejercicio de recuperación para los hombros [35].....	24
Figura 19. Medicación [35]	24
Figura 20. Biofeedback electromiográfico [36]	25
Figura 21. Estimulación eléctrica neuromuscular [37].....	26
Figura 22. Estimulación Eléctrica Funcional [38].....	26
Figura 23. Estimulación neuromuscular activada electromiográficamente [39].....	27
Figura 24. Ejemplo de robot para rehabilitación [44]	28
Figura 25. Realidad Virtual para la rehabilitación [49]	30
Figura 26. Robots de a) Efecto final y b) Exoesqueleto [50]	30
Figura 27. MIT-Manus [52]	31
Figura 28. Sistema MIME con movimiento a) Unilateral, y b) Bilateral [54]	32

Figura 29. Bead Highway Resorte y amortiguador [53]	33
Figura 30. GENTLE/s [53]	33
Figura 31. Interfaz InMotion Arm [55]	34
Figura 32. InMotion Arm e InMotion Hand [55]	34
Figura 33. Biodex System 4 [57].....	35
Figura 34. HUMAC NORM Ejercicios de hombro [58]	35
Figura 35. HUMAC NORM [58].....	36
Figura 36. ARMin [60]	36
Figura 37. Exoesqueleto MGA [62]	37
Figura 38. ArmeoPower [65].....	37
Figura 39. ArmeoSpring [67]	38
Figura 40. ArmeoSpring Pediatric [68].....	38
Figura 41. Myomo [69]	39
Figura 42. Hand Mentor [70]	39
Figura 43. HAL-5 [71]	40
Figura 44. Amadeo [51].....	40
Figura 45. iPAM [72]	41
Figura 46. PuParm [73]	41
Figura 47. Diagrama del sistema mecatrónico diseñado. Elaboración propia	45
Figura 48. Mecanismo antropomórfico de 5 GDL	46
Figura 49. Encoder E4P USDigital [74]	47
Figura 50. Puertos del arduino DUE [75].....	47
Figura 51. Entorno de Desarrollo Integrado del Arduino	48
Figura 52. Entorno de trabajo de Processing.....	49
Figura 53. Entorno de trabajo de MATLAB	50
Figura 54. Cinemática directa del mecanismo	51
Figura 55. Conexión de los encoders al cable	52
Figura 56. Pantalla de inicio	55
Figura 57. Pantalla de juego.....	55
Figura 58. Pantalla final.....	56
Figura 59. Gráfica de la espiral trazada en la prueba de funcionamiento.....	57
Figura 60. Gráfica del tiempo en alcanzar los objetivos de la prueba de funcionamiento.....	58
Figura 61. Comportamiento en 'X' Brazo modelo	59
Figura 62. Comportamiento en 'Y' Brazo modelo	59
Figura 63. Posición inicial del mecanismo.....	62
Figura 64. Conexión del mecanismo al Arduino DUE y a la computadora	62
Figura 65. Esquema del usuario realizando el ejercicio. Elaboración propia	64
Figura 66. Primera pantalla del juego	66
Figura 67. Pantalla principal del juego	67
Figura 68. Recorrido de la espiral activando los objetivos	68

Figura 69. Pantalla de término.....	69
Figura 70. Pantalla de término sin completar el ejercicio	70
Figura 71. Segmentos de la espiral	71
Figura 72. Puntos objetivo de la espiral	72
Figura 73. Espirales trazadas por el voluntario 1	74
Figura 74. Espirales trazadas por el voluntario 2	75
Figura 75. Espirales trazadas por el voluntario 3	75
Figura 76. Espirales trazadas por el voluntario 4	76
Figura 77. Tiempo en alcanzar los objetivos del voluntario 1	78
Figura 78. Tiempo en alcanzar los objetivos del voluntario 2	79
Figura 79. Tiempo en alcanzar los objetivos del voluntario 3	79
Figura 80. Tiempo en alcanzar los objetivos del voluntario 4	80
Figura 81. Comportamiento en 'X' del voluntario 1	81
Figura 82. Comportamiento en 'X' del voluntario 2	82
Figura 83. Comportamiento en 'X' del voluntario 3	82
Figura 84. Comportamiento en 'X' del voluntario 4	83
Figura 85. Comportamiento en 'Y' del voluntario 1	84
Figura 86. Comportamiento en 'Y' del voluntario 2	85
Figura 87. Comportamiento en 'Y' del voluntario 3	85
Figura 88. Comportamiento en 'Y' del voluntario 4	86
Figura 89. Diagrama de flujo del programa en Arduino. Elaboración propia.....	95
Figura 90. Diagrama de flujo para las interrupciones en Arduino. Elaboración propia.....	96
Figura 91. Diagrama de flujo para el programa en Processing. Elaboración propia.....	100
Figura 92. Diagrama de flujo para las subrutinas CursorBrazo y KeyPressed. Elaboración propia.....	101
Figura 93. Diagrama de flujo para las subrutinas: puntosEspiral, objetivoAlcanzado, mostrarDatos y serialEvent. Elaboración propia	102
Figura 94. ACV Hemorrágico e Isquémico [3].	125

I) RESUMEN

En el presente trabajo se comienza realizando la definición de los objetivos, así como su justificación y los alcances que tiene el proyecto. Posteriormente, se procede a realizar la descripción del accidente cerebrovascular, las secuelas que puede producir, y su panorama en México y el mundo. Con respecto a este último punto es importante hacer notar que el accidente cerebrovascular es la principal causa de discapacidad en México y el mundo, razón por la cual surge la necesidad de buscar alternativas que auxilien a los terapeutas a brindar terapias de calidad sin que su fatiga resulte una limitación para la intensidad de los ejercicios, dándoles incluso la oportunidad de rehabilitar a diferentes pacientes por sesión.

Por lo que se refiere a la rehabilitación del accidente cerebrovascular, se describe en qué consiste, las etapas que la componen, y algunas de las terapias que son ofrecidas para alcanzar los objetivos de rehabilitación de cada paciente. Entre la investigación de estas últimas, la terapia robótica llama la atención dado que permite la realización de tareas repetitivas, intensas y activas. Se debe mencionar también que, en general, son terapias no invasivas y representan un bajo riesgo para sus usuarios.

En vista de que la terapia robótica presenta las características mencionadas anteriormente, se toma como base para la realización de la revisión de la literatura. Es por esto que se investigaron los sistemas robóticos utilizados actualmente para la rehabilitación con la finalidad de obtener información relevante relacionada al tema en cuestión.

Una vez identificadas las herramientas con que se cuenta para rehabilitar pacientes con accidente cerebrovascular, y en aras del cumplimiento de los objetivos de este trabajo, se diseña y propone la configuración de un sistema mecatrónico, y se realiza la descripción de los materiales y métodos que fueron empleados para su realización y puesta en marcha. Además, se describen paso a paso los subsistemas implementados, así como la manera en que se llevó a cabo su integración. En este último punto cabe destacar que para permitir la interacción física con el usuario se utiliza un subsistema mecánico, el cual se encuentra instrumentado electrónicamente para obtener información de la posición y el movimiento de su mango. Dicha información posteriormente es procesada y enviada a una interfaz gráfica que provee retroalimentación visual del movimiento realizado por el usuario.

Tras realizar la descripción del funcionamiento de nuestro sistema mecatrónico, se propone un ejercicio para ser realizado por diferentes voluntarios con el propósito de verificar que el sistema funcione correctamente. Además, la realización de estas pruebas permite identificar las posibles fallas, incomodidades y delimitantes que pueda tener el sistema durante su utilización.

Finalmente, como fruto de la realización de la experimentación se presentan en forma gráfica los resultados obtenidos, así como las conclusiones que esta investigación generó. También, a partir de esta información se plantea un protocolo de experimentación que permitirá su aplicación como elemento auxiliar en la terapia de rehabilitación de pacientes con secuelas de un accidente cerebrovascular.

II) OBJETIVOS

1. *Objetivo General*

El objetivo de este proyecto es:

Desarrollar un sistema mecatrónico que sirva de apoyo en la rehabilitación activa de pacientes con discapacidad neuromotora de brazo tras sufrir un Accidente Cerebrovascular.

2. *Objetivos Particulares*

- ✓ Proponer un sistema mecatrónico que pueda auxiliar al paciente con discapacidad neuromotora a recuperar la capacidad de mover el brazo de manera coordinada.
- ✓ Proponer un ejercicio de coordinación neuromotora que el paciente llevará a cabo.
- ✓ Diseñar un subsistema informático capaz de obtener, almacenar y graficar la información del progreso de la rehabilitación.

III) ALCANCES

El proyecto comprende el desarrollo de un sistema mecatrónico conformado por un mecanismo de 5 GDL de efector final cuyos movimientos serán relacionados en una interfaz de usuario. Dicha interfaz recopilará información del desempeño del paciente durante la realización de los ejercicios de rehabilitación programados en ella para que el paciente los ejecute.

Para programar los movimientos a ser ejecutados por el paciente se propondrán ejercicios para la rehabilitación del brazo en la etapa post-aguda de un paciente con discapacidad neuromotora.

IV) JUSTIFICACIÓN

Considerando que el accidente cerebrovascular es la principal causa de discapacidad, no solamente en México, sino a nivel mundial, y tomando en cuenta que, aproximadamente la mitad de las personas que lo han padecido requieren de servicios de rehabilitación, con un 40% de ellos que necesitan rehabilitación activa, se ha encontrado la necesidad de buscar alternativas que ayuden a los terapeutas a brindar terapias físicas de calidad en donde la fatiga del terapeuta no limite la intensidad de los ejercicios de rehabilitación, lo cual inclusive le podrá permitir al terapeuta brindar terapia de manera simultánea a diferentes pacientes.

El sistema mecatrónico diseñado, además de aportar ejercicios adecuados para la rehabilitación del brazo, proveerá motivación al paciente, la cual tiene un papel crucial para alcanzar las metas que se desean cumplir en la rehabilitación del ACV. Por otro lado, el desempeño del paciente durante la realización de los ejercicios podrá ser registrado para permitirle al fisioterapeuta tener medidas más objetivas del progreso del paciente.

Otra característica del sistema es que el fisioterapeuta podrá seleccionar, entre los ejercicios propuestos, el que mejor se adapte a las necesidades de cada paciente, partiendo de la identificación del área en que éste requiera mejorar su habilidad.

En resumen, la realización de este proyecto asistirá a las personas que sufrieron un ACV y que se encuentran en la etapa de rehabilitación post-aguda, en la recuperación de la capacidad de coordinar los movimientos del brazo en un lapso menor de tiempo, requiriendo menor esfuerzo físico del fisioterapeuta, proveyendo motivación al paciente y teniendo mayor objetividad al realizar la evaluación del progreso del mismo en el proceso para alcanzar las metas de rehabilitación deseadas. Todo esto se verá reflejado en una mayor independencia del paciente, lo cual le dará la oportunidad de obtener mayor éxito en su reincorporación a sus actividades de la vida diaria, y mejorará, con ello, su calidad de vida.

V) INTRODUCCIÓN

1. Enfermedad Vascular Cerebral

La enfermedad vascular cerebral o enfermedad cerebrovascular es cualquier enfermedad del encéfalo, focal o difusa, transitoria o permanente, provocada por una alteración de la circulación cerebral. Esta alteración puede tener su etiopatogenia en un proceso patológico que afecte a los vasos sanguíneos, o bien, en un trastorno de la sangre circulante [1].

Las enfermedades cerebrovasculares comprenden el infarto cerebral, la hemorragia intracerebral y la hemorragia subaracnoidea [2]:

- **Infarto cerebral:** Es un episodio de disfunción neurológica causado por un infarto focal, del encéfalo, médula espinal o retiniano. En otras palabras, es la muerte de una parte del cerebro debido a la falta de irrigación de sangre.
- **Hemorragia intracerebral:** Es la colección de sangre dentro del parénquima cerebral o el sistema ventricular, no ocasionado por trauma. Esto significa que, debido a la ruptura de un vaso sanguíneo, se tiene una acumulación de sangre dentro del tejido del cerebro.
- **Hemorragia subaracnoidea:** Es una hemorragia dentro del espacio subaracnoideo (espacio entre la aracnoides y la piamadre del encéfalo o médula espinal). Dicho de otra manera, es la introducción de sangre donde normalmente circula el líquido cefalorraquídeo.

Según la naturaleza de la lesión, las enfermedades cerebrovasculares pueden ser **isquémicas** o **hemorrágicas**. Una enfermedad **hemorrágica** consiste en una extravasación de sangre intracranalmente debido a la *ruptura de un vaso*, mientras que en la **isquémica** se *disminuye el flujo sanguíneo* cerebral, lo cual produce una necrosis tisular por daño neuronal irreversible (infarto cerebral) [1]. La proporción es de un 85% para la isquémica y un 15% para la hemorrágica [3].

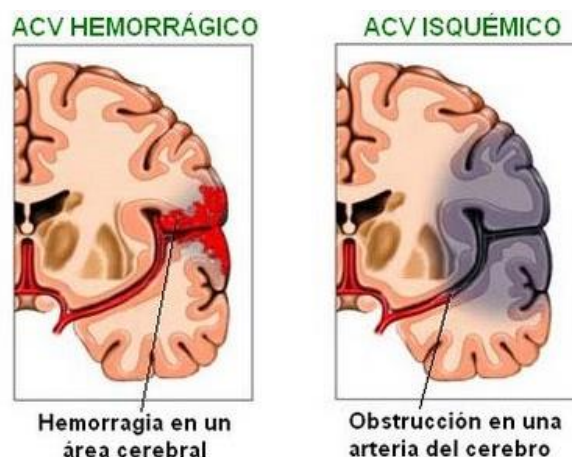


Figura 1. ACV Hemorrágico e isquémico [4]

Entre las clasificaciones de las enfermedades cerebrovasculares la más utilizada es la del National Institute of Neurological Disorders and Stroke, la cual se divide de la siguiente manera [1, 3]:

➤ **Enfermedad cerebral asintomática**

Es aquella que todavía no ha dado síntomas cerebrales o retinianos pero que ha producido algún daño vascular demostrable.

- Infarto cerebral silente.
- Ateroma carotideo asintomático.

➤ **Disfunción cerebral focal**

Engloba los ataques isquémicos transitorios de cualquier localización y los ictus isquémicos o hemorrágicos.

- Ataque isquémico transitorio (duración < 24 horas).
- Ictus.
- Hemorragias cerebral y subaracnoidea.
- Infarto cerebral.

➤ **Demencia vascular**

Deterioro cognitivo secundario a enfermedad cerebrovascular de cualquier etiología y forma de presentación.

➤ **Encefalopatía hipertensiva**

Unida a la hipertensión arterial, cursa con cefalea, síndrome confusional y disminución del nivel de conciencia; puede asociar convulsiones y déficit neurológico focal.

➤ **Flebotrombosis intracraneal**

Formación de coágulos en una vena dentro del cerebro.

a) El Accidente Cerebrovascular (ACV)

La OMS define el evento vascular cerebral como el *desarrollo rápido de signos clínicos indicativos de trastorno focal o global de la función cerebral, con síntomas que persisten 24 o más horas o que conducen a la muerte sin que exista una causa aparente distinta de la vascular* [1].

También se le conoce con el término genérico *ictus*, mostrándose en la siguiente tabla algunas de las otras denominaciones con las que se le puede referir o encontrar en la literatura.

Tabla 1. Denominaciones del accidente cerebrovascular

Concepto	Ictus
Sinónimo	AVC (accidente vascular cerebral) ACV (accidente cerebro vascular) Ataque cerebrovascular Evento vascular cerebral Ataque Cerebral
Traducción al inglés	Stroke CVA (Cerebral Vascular Accident) Brain Vascular Accident Cerebral Stroke

Para este trabajo se referirá como **accidente cerebrovascular (ACV)**.

b) Secuelas del accidente cerebrovascular

La mayoría de los pacientes que sobreviven a los primeros momentos después del ACV sufren secuelas que no siempre son motoras, siendo la hemiplejía la más frecuente, la cual consiste en la debilidad o parálisis en un lado del cuerpo.

Sin embargo, las secuelas del ACV dependen de la gravedad y del área del cerebro que resulte afectada por el ACV: *hemisferio derecho*, *hemisferio izquierdo*, *cerebelo* y *tronco cerebral*.

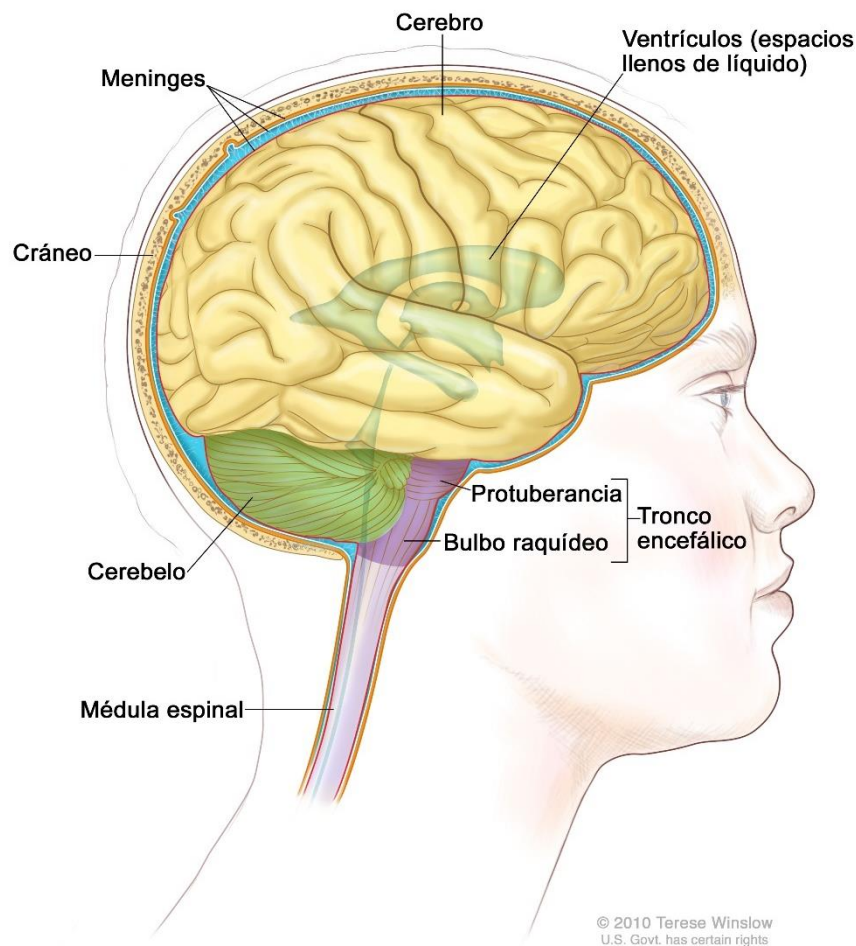


Figura 2. Partes del cerebro [5]

A continuación, se indican las secuelas más frecuentes del ACV según la zona del cerebro afectada [1]:

➤ **Hemisferio derecho**

El hemisferio derecho controla el movimiento del lado izquierdo del cuerpo, así como la capacidad de análisis que juzga la distancia, tamaño y velocidad o posición de objetos.

Las secuelas más frecuentes son:

- Hemiplejía izquierda.
- Errores al calcular distancia (se caen las cosas que van a sostener).
- Dificultades para leer (no distinguen la dirección correcta).
- Carácter impulsivo o agresivo.
- Negación del lado acto y de lo que esté en ese lado.
- Problemas de memoria a corto plazo.

➤ **Hemisferio izquierdo**

El hemisferio izquierdo controla el movimiento de la parte derecha del cuerpo, además, controla el habla y la mayor parte de las actividades lingüísticas. Por lo tanto, las secuelas más frecuentes del ACV son:

- Hemiplejía derecha.
- Afasia sensitiva o motora (incapacidad para entender o emitir lenguaje).
- Disartria (incapacidad para la correcta pronunciación).
- Alteraciones de la memoria, sobre todo para retener nuevos conocimientos.
- Alteraciones para obtener conceptos o generalizarlos.



Figura 3. Funciones de los hemisferios del cerebro [6]

➤ **Cerebelo**

El cerebelo controla muchos de nuestros reflejos y sistemas de coordinación.

Si se tiene una afección en esta zona se presentan:

- Alteraciones de los reflejos (espasticidad, reflejos anómalos).
- Alteraciones en la coordinación (disdiacocinesia o imposibilidad de realizar movimientos alternativos rápidamente).



Figura 4. Cerebelo [7]

➤ **Tronco cerebral**

Controla los movimientos y actos involuntarios, incluyendo las funciones de soporte vital.

Por tanto, los pacientes que sufren un ACV del tronco pueden desarrollar:

- Hemiplejía o parálisis de ambos lados del cuerpo.
- Alteración en los movimientos oculares.
- Alteraciones en la audición.
- Alteraciones en las funciones vitales (frecuencia respiratoria, presión arterial, ritmo cardíaco).



Figura 5. Funciones del tronco cerebral [8]

Otros efectos de los ACV incluyen dolor, adormecimiento o sensaciones extrañas en el lado afectado, espasticidad (contracción incontrolable de los músculos de un brazo o una pierna que puede causar dolor), osteoporosis, dolor de hombro, caídas, fracturas, contracturas, disfunción sexual, trastornos cognitivos, problemas de atención, retraimiento, trastorno del sueño, problemas con el control de los esfínteres, depresiones, ansiedad y astenia (se cansa rápidamente y pierde el interés en las actividades) [9].

c) Relación del control motor del cuerpo con el accidente cerebrovascular

Es importante tener conocimiento de las zonas del cerebro que se encargan del control motor de cada parte del cuerpo porque dan una idea de cuál o cuáles órganos son los que tienen mayor probabilidad de sufrir alteraciones tras ocurrir un ACV en determinada zona del cerebro.

El control motor del cuerpo se puede representar mediante un homúnculo, el cual se emplea para describir la organización o distribución del área motora o corteza primaria. El homúnculo representa las divisiones anatómicas de la corteza cerebral responsables del movimiento e intercambio de información sensorial de cada órgano del cuerpo.

Para este trabajo, el área de interés del cerebro es la parte responsable del **control motor del brazo**, lo cual significa que, la zona del cerebro afectada por el accidente cerebral, en este caso particular, forma parte de la corteza motora primaria tal y como se muestra en la siguiente imagen:

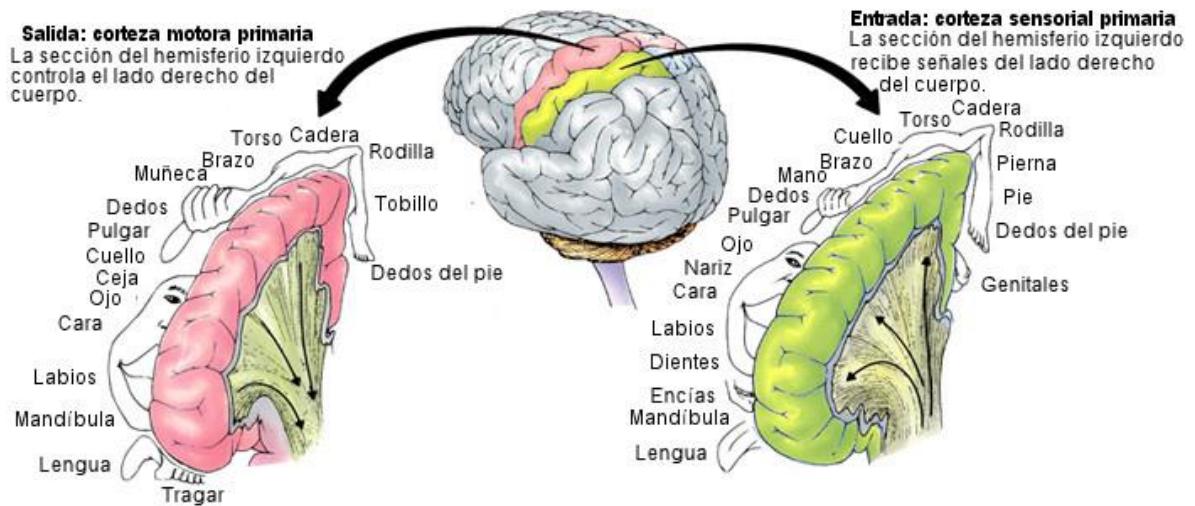


Figura 6. Homúnculo somato-sensorial del cerebro humano [10]

d) Epidemiología del accidente cerebrovascular

Los accidentes cerebrovasculares son un problema de salud pública. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), durante los últimos 15 años el ACV ha sido la segunda causa global de muerte, contando en el año 2015 con 6.24 millones de muertes, lo cual corresponde al 11.06 % del total de los fallecimientos registrados en ese año (56.4 millones). Esto significa que, a nivel mundial, una persona muere por un ACV cada 5 segundos [11, 12].

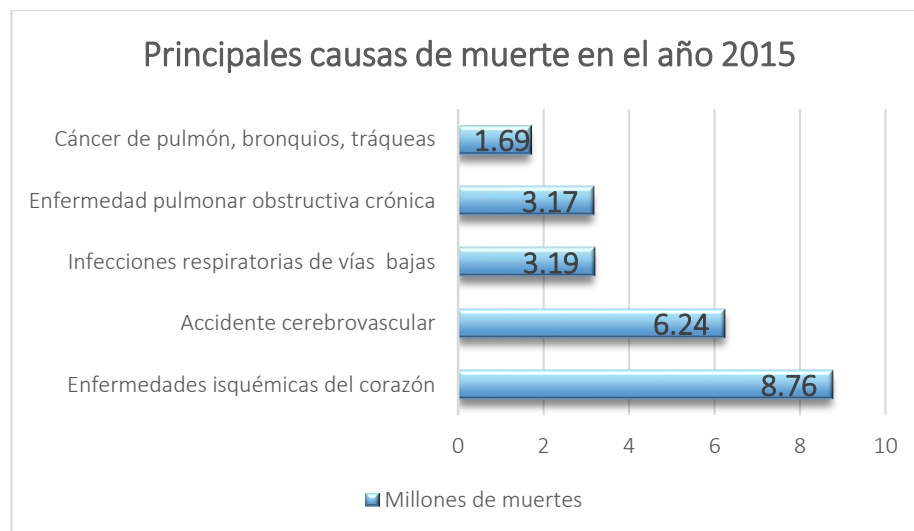


Figura 7. Principales causas de muerte en el año 2015

Es importante destacar que dos tercios de estos fallecimientos ocurren en países con ingresos medios y bajos [12, 13].

A nivel mundial la EVC tiene una prevalencia de 500 a 700 casos por 100 000 habitantes. La OMS reporta una media de 200 casos nuevos por 100 000 habitantes [2].

Aproximadamente 15 millones de personas alrededor del mundo sufren de un ACV cada año. Dicho de otra manera, cada 2 segundos una persona padece un ACV [12, 14].

En México, a partir del año 2008 pasó a ser la tercera causa de mortalidad con más de 30 000 fallecimientos. Siendo también la cuarta causa de muerte en personas mayores de 65 años, y la séptima en sujetos de 15 a 65 años de edad [2].

El ACV es la principal causa de discapacidad en el adulto, causando una mayor gama de discapacidades que otras condiciones. Debido a ello, la mitad de los sobrevivientes del ACV dependen de otras personas para realizar sus actividades diarias. Las condiciones en que viven los sobrevivientes de un ACV se pueden observar en la gráfica siguiente [14].

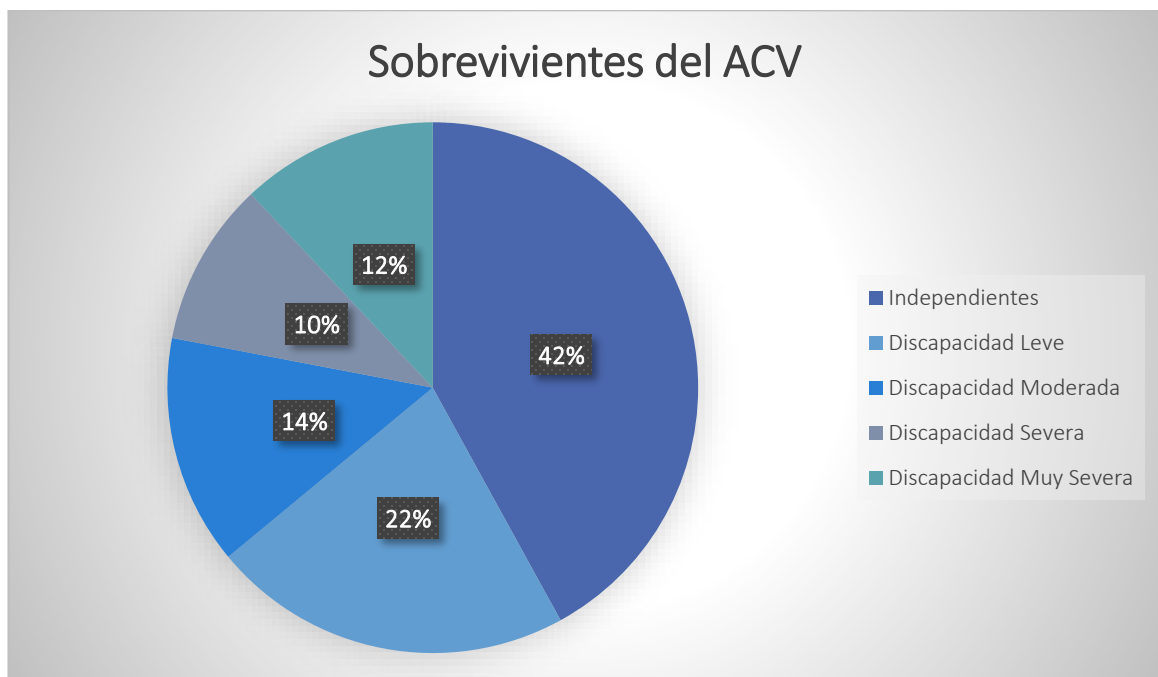


Figura 8. Estadística de los sobrevivientes del ACV

Aproximadamente el 50% de las personas que tuvieron la experiencia de un ACV, necesitan de los servicios de rehabilitación y presentan limitaciones funcionales o secuelas que repercuten en las actividades propias del individuo y en su participación con el medio ambiente [15]. Y el 40% de los pacientes con ACV necesita específicamente de los servicios de *rehabilitación activa* [1].

Sin embargo, el impacto de los factores pronósticos de recuperación son poco claros [16].

De manera más particular, las dificultades más comunes que presentan los pacientes tras un ACV son: dificultades en el movimiento general con un 80% de personas afectadas, dificultades en el movimiento del brazo con un 70%, e incapacidad de utilizar un brazo a largo plazo [14].

Un estudio realizado en Perú aplicado a pacientes con *ACV isquémico*, señaló como localización cerebral más común del accidente el lóbulo parietal derecho con un 21.4% de los casos, el temporo parietal izquierdo con un 17.9%, y el parietal izquierdo con 10.7% de los casos [17].

Por otro lado, las zonas del cerebro más afectadas por los *ACV hemorrágicos* encontrados en un estudio realizado en Montevideo, Uruguay son [18]: los ganglios basales con 47.6% y los lóbulos con 41.3%.

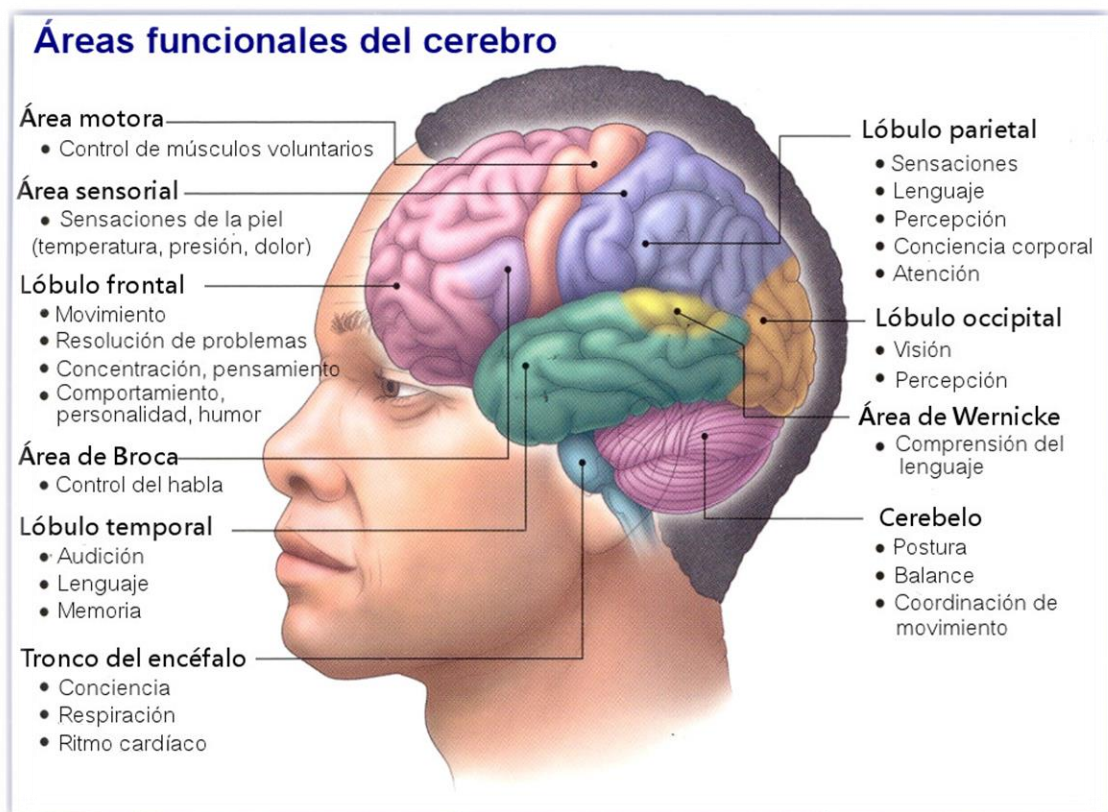


Figura 9. Áreas funcionales del cerebro [19]

Analizando dichos resultados, y relacionándolos con las áreas funcionales del cerebro ilustradas en la figura anterior, se puede notar que las afecciones al lóbulo parietal derecho son las más comunes, por lo que es importante considerar que el daño a este lóbulo puede producir incapacidad o dificultad para detectar, atender o responder a estímulos presentados en el lado contrario a la lesión cerebral (negligencia contralateral), lo cual puede resultar en el deterioro de habilidades del auto-cuidado tales como el vestirse y el lavarse [20].

2. Rehabilitación

La OMS define la **rehabilitación** (aplicada a la incapacidad), como la aplicación coordinada de un conjunto de medidas médicas, sociales, educativas y profesionales para preparar o readaptar al individuo con objeto de que alcance la mayor proporción posible de capacidad funcional.

Siendo la **rehabilitación médica** la parte de la asistencia médica que trata de desarrollar las capacidades funcionales y psicológicas del individuo y, si es preciso, sus mecanismos de compensación, a fin de permitirle llevar una existencia autónoma y activa [21].

a) Rehabilitación tras un accidente cerebrovascular

La rehabilitación (RHB) del paciente con ACV es un proceso limitado en el tiempo y orientado por objetivos; tiene como finalidad fundamental tratar y/o compensar los déficits y minimizar la discapacidad para conseguir la máxima capacidad funcional posible, facilitando la independencia y la reintegración del paciente al entorno familiar, social y laboral; requiere de un abordaje interdisciplinario y cuya interacción determina el grado de discapacidad tras el proceso de RHB [22].

Este proceso debe iniciarse lo antes posible durante el ingreso hospitalario, una vez que el paciente se encuentre estable. Los pacientes que inician la rehabilitación dentro de la primera semana tras el ingreso presentan mejores resultados a largo plazo que aquellos que inician la rehabilitación con posterioridad.

El equipo de rehabilitación debe ser multidisciplinar e incluir médicos, enfermeras, fisioterapeutas, logopedas, terapeutas ocupacionales y trabajadores sociales. Los pacientes y familiares o cuidadores deben involucrarse activamente en este equipo, si es posible, desde el inicio y durante toda la rehabilitación.

Una vez que los pacientes son dados de alta pueden seguir beneficiándose del tratamiento rehabilitador si lo precisan. Los servicios de rehabilitación que ofrecen terapias (fisioterapia, terapia ocupacional y otras intervenciones multidisciplinarias) son eficaces a la hora de reducir la probabilidad de un mal pronóstico y mejorar la independencia para las Actividades de la Vida Diaria (AVD) en pacientes ambulatorios que han sufrido un ictus o han sido dados de alta tras un ictus hace menos de un año.

Los pacientes que no presentan secuelas y aquellos con gran deterioro funcional o muy dependientes para las AVD, con un desfavorable pronóstico de recuperación, no son candidatos a la rehabilitación. En estos casos, los familiares y cuidadores deben ser educados e instruidos en su cuidado.



Figura 10. Tratamiento de fisioterapia [23]

La rehabilitación del ACV debe durar hasta que no se identifiquen objetivos funcionales que lograr, teniendo cinco grandes objetivos [9][24]:

1. Prevenir y tratar complicaciones intercurrentes.
2. Entrenar al paciente para una máxima independencia funcional.
3. Lograr la adaptación psicosocial del paciente y su familia.
4. Reintegrar en la comunidad (incluyendo actividades del hogar, familiar, recreacional y vocacional).
5. Mejorar la calidad de vida.

La mejoría a largo plazo se atribuye a la plasticidad neuronal: las neuronas sanas pueden aprender funciones de las neuronas afectadas, pudiendo sustituirla al menos parcialmente. Existe una reorganización cerebral que puede modularse con la rehabilitación a través del fenómeno de plasticidad neuronal [24].

b) Rehabilitación activa, asistida y pasiva

Ahora bien, es importante mencionar que existen tres modalidades de recuperación dependiendo del nivel de actividad que requiera el paciente: pasiva, asistida y activa.

En la **rehabilitación pasiva** el terapeuta moviliza las estructuras sin el esfuerzo del individuo, mientras que en la **rehabilitación activa** el individuo realiza todo el esfuerzo en los ejercicios.

Sin embargo, existe una modalidad intermedia, la **rehabilitación asistida**, en la cual se combinan el esfuerzo del paciente y del terapeuta [25].

c) Etapas de la rehabilitación del accidente cerebrovascular

A lo largo de la rehabilitación del ACV se distinguen varias fases. Generalmente se consideran tres periodos o fases (aguda, subaguda y crónica), pero se ha empezado a considerar una cuarta fase (postaguda), la cual permite identificar y responder de manera más eficiente ante las necesidades de la persona afectada.

- **Fase aguda:**

También se le conoce como fase hospitalaria, es el momento más próximo a la instauración del daño cerebral, y su signo más determinante es la hipotonía. Generalmente la persona se encuentra estable desde el punto de vista neurológico, y está hospitalizada en unidades de vigilancia intensiva, servicios de Neurocirugía o de Neurología, por lo que suele ser el tiempo que el paciente permanece encamado. Existe un importante riesgo vital y pueden aparecer complicaciones graves.

El objetivo fundamental en esta fase es la estabilización clínica y el tratamiento y prevención de complicaciones (trastornos cutáneos, actitudes viciosas, etc.), así como lograr la mayor recuperación cognitiva posible.



Figura 11. Fase aguda [26]

La situación de los pacientes que sobreviven a la fase aguda del ACV y alcanzan la estabilización neurológica se describe de la siguiente manera:

- 10% quedan sin secuelas, por lo que no requieren rehabilitación funcional.
- 10% quedan severamente dañados, por lo que no se benefician de rehabilitación activa y el manejo consiste en prevenir complicaciones y entrenamiento familiar.
- 80% quedan con algún grado de déficit neurológico que se beneficiaría de un proceso de rehabilitación activo.

- **Fase subaguda:**

En esta fase la persona con daño cerebral se encuentra estabilizada y ha sido trasladada a una unidad de neurorrehabilitación en régimen de hospitalización. Se puede observar una regresión de las lesiones y una recuperación funcional motora en los casos favorables, así como la aparición de espasticidad e hiperreflexia. Se procuran cuidados médicos y de enfermería encaminados a la prevención y tratamiento de complicaciones, y se inicia el periodo de rehabilitación interdisciplinar e intensiva, marcando el inicio de la fase de trabajo activo por parte del paciente para la recuperación de fuerza y coordinación. Es la fase de rehabilitación más importante, ya que el paciente puede intervenir de forma activa con propósito de recuperación del déficit y/o funcional.

La duración habitual es de 3 meses, pero se definirá por la exploración física y observación de cambios.

El objetivo fundamental en esta fase es el de procurar el máximo nivel de autonomía y alcanzar el grado de estabilización clínica suficiente para poder seguir acometiendo el programa de rehabilitación de forma ambulatoria. Para lograrlo se busca la corrección de deformidades ortopédicas, la reeducación propioceptiva, de la coordinación y del equilibrio en bipedestación, así como se aplican técnicas de regulación de la espasticidad, de estimulación sensorial y se realizan ejercicios para la parálisis facial y movilizaciones pasivas, progresando a movimientos activos-asistidos de lado parético y potenciación muscular.



Figura 12. Fase subaguda [26]

- **Fase postaguda:**

En este periodo la persona ya no requiere cuidados médicos o de enfermería continuos, y su estado clínico puede ser abordado desde el ámbito domiciliario. La persona con daño cerebral vive en su domicilio (descansa, duerme, se asea y se alimenta en su casa) y son principalmente sus familiares los

que asumen los cuidados necesarios. La persona acude diariamente al centro de rehabilitación ambulatoria donde recibirá el programa de rehabilitación personalizado.

El objetivo fundamental en esta fase es afianzar los logros conseguidos en las fases anteriores mediante la generalización de los conocimientos y las destrezas adquiridas y adaptación a la nueva situación vital, tanto por parte de la persona afectada como de la familia.



Figura 13. Rehabilitación domiciliaria [27]

La duración de la fase subaguda y postaguda en conjunto es de aproximadamente 6 meses.

- **Fase crónica:**

En esta fase los pacientes solo requieren necesidades de mantenimiento. El paciente tiene estabilidad neurológica y funcional pero aún puede beneficiarse del tratamiento en alguno de los aspectos en el que es deficitario o donde la deficiencia tenga más implicaciones en la autonomía de sus actividades (logopedia, fisioterapia, terapia ocupacional, psicología clínica). El tratamiento prolongado en esta fase puede estar justificado, tanto para obtener mejoras puntuales como para evitar el deterioro; además las pequeñas ganancias ayudan psicológicamente al paciente lo que favorece a la familia ya que les ayuda a no decaer durante este largo proceso.

Esta fase puede durar meses e incluso años, y en algunos casos el tratamiento de mantenimiento deberá continuarse de por vida [24, 28-30].

d) Terapias de rehabilitación

Se han propuesto numerosos abordajes para mejorar los déficits motores del hemipléjico. Histórica y conceptualmente se han agrupado en tres grandes grupos: técnicas de compensación, técnicas de facilitación y las propuestas más recientes.

Técnicas de compensación

El objetivo es aumentar la independencia en las actividades cotidianas y mejorar la función. El tratamiento se centra en reentrenar las capacidades residuales utilizando sobre todo el hemicuerpo no afectado. Se considera razonable en pacientes con graves déficits motores con un mal pronóstico de recuperación, ya que puede que se dificulte y bloquee la recuperación del lado afecto.

Técnicas de facilitación

Su objetivo es mejorar (facilitar) la calidad del movimiento en el lado afectado. Los métodos tradicionales de facilitación son cuatro: el abordaje de Rood, la terapia del Neurodesarrollo (Bobath), la terapia del movimiento de Brunnstrom y la Facilitación Neuromuscular Propioceptiva (FNP). Rood compartió sus ideas a través de enseñanzas clínicas y teóricas, pero publicó muy poco.

Se describen a continuación los rasgos fundamentales de los otros métodos.

Método Bobath. Berta Bobath diseñó técnicas para influir sobre las alteraciones del tono muscular y del movimiento de los pacientes con parálisis cerebral y hemiplejía, partiendo del concepto de que el aumento del tono muscular y de la actividad refleja surgen por una falta de inhibición de un mecanismo reflejo postural dañado. El paciente espástico sólo podría llegar a tener una función motora normal si se normaliza el tono muscular y se elimina la actividad muscular indeseable. Berta Bobath observó que podía influir sobre el tono muscular modificando la posición y el movimiento de las articulaciones proximales del cuerpo. Bertha Bobath se dedicó a la reeducación del lado enfermo.

Los tres pilares básicos del tratamiento son:

- 1) disminuir la espasticidad, las sinergias y los patrones anormales de movimiento utilizando técnicas de inhibición;
- 2) desarrollar patrones normales de postura y movimiento mediante técnicas de facilitación;
- 3) incorporar el lado hemipléjico en todas las actividades terapéuticas, desde las fases más iniciales, restablecer la simetría e integrarlo en movimientos funcionales.

El terapeuta se basa en el contacto manual a través de los denominados “puntos clave de control” para mejorar la calidad del movimiento.



Figura 14. Método Bobath [31]

Método Brunnstrom. Signe Brunnstrom observó que los estímulos externos y cambios de posición de las articulaciones provocaban cambios en las respuestas motoras del paciente con hemiparesia espástica. Propuso utilizar los estímulos aferentes (de origen exteroceptivo o propioceptivo) para iniciar el movimiento que el paciente era incapaz de producir voluntariamente. Según Brunnstrom el paciente debe ser alentado y ayudado a obtener el control de las sinergias básicas de los miembros. Una vez que consiga realizar las sinergias de las extremidades podrá ir adquiriendo combinaciones de movimientos que se derivan de esas sinergias. Pensaba que en el paciente hemipléjico las sinergias siempre precedían a la recuperación del movimiento normal, la cual, podría detenerse en cualquiera de las fases. Las sesiones de tratamiento se planifican solicitando sólo tareas que el paciente pueda llegar a realizar.

Intenta estimular toda actividad motora que emerge en el tronco y extremidades pléjicas, independientemente de que dicha actividad sea patológica o no, para posteriormente ejercitar el control voluntario de las respuestas reflejas.

La selección del estímulo aferente depende de la fase de recuperación. En las fases iniciales se utilizan los reflejos tónicos, laberínticos, la estimulación propioceptiva o la resistencia a los movimientos para provocar las sinergias. Posteriormente, se intenta facilitar el control voluntario de las sinergias mezclando componentes de diferentes patrones de movimiento e introduciendo actividades cada vez más complejas.

Facilitación Neuromuscular Propioceptiva (FNP). El creador del método fue el doctor Kabat, médico y neurofisiólogo, y se unieron a él Margaret Knott y Dorothy Voss. La FNP se basa en utilizar estímulos periféricos simultáneos y sincronizados de origen superficial (tacto) o profundo (posición articular,

estiramiento de músculos y tendones) para estimular el sistema nervioso con el fin de aumentar la fuerza y la coordinación muscular. Parte del concepto de que los músculos no trabajan aisladamente sino en estrecha y mutua colaboración para realizar cualquier acto motor, así como del principio de que todo acto motor es una elaboración del sistema nervioso central en respuesta a múltiple información sensitivo motora simultánea y secuencial. Así, el terapeuta no solicita al músculo o músculos débiles de una forma aislada o analítica, sino integrándolos dentro del conjunto muscular en el que están acostumbrados a trabajar.

Se utilizan patrones de movimiento en diagonal y en espiral, en cuya ejecución el músculo o músculos débiles son ayudados por los agonistas o sinergistas más fuertes. Siempre que sea posible se solicita el esfuerzo voluntario del paciente. Se describen diferentes tipos de ejercicios según el objetivo a lograr: potenciación muscular (contracciones repetidas, inversiones lentas), coordinación (iniciación rítmica), equilibrio (estabilizaciones rítmicas) y relajación (tensión-relajación, contracción-relajación).

Su objetivo fundamental es la debilidad muscular y tratar de reforzar las respuestas motoras. Además, se planifican las actividades siguiendo las etapas del desarrollo motor infantil.



Figura 15. Facilitación Neuromuscular Propioceptiva [32]

Técnicas modernas

Uno de los avances más importantes ha sido el descubrimiento de que el cerebro posee una plasticidad mucho mayor de lo que se creía. La posibilidad de estudiar la función del cerebro en personas vivas mediante técnicas de neuroimagen funcional (Resonancia Magnética Funcional, Estimulación Magnética Focal Transcranial, Tomografía de Emisión de Positrones...) ha dado un enorme impulso a las investigaciones. Aprovechar al máximo esa plasticidad es uno de los principales objetivos de las nuevas modalidades de tratamiento.

A continuación, se describen algunas de las técnicas con mayor solidez científica.

Reaprendizaje motor orientado a tareas. Por las fisioterapeutas australianas, Janet Carr y Roberta Shepherd, el objetivo del tratamiento es enseñar al paciente estrategias eficaces para conseguir realizar un movimiento útil funcionalmente. El principio es: uno aprende lo que practica. Consideran al paciente un participante activo en su recuperación. *En vez de «tratar» al paciente, el objetivo es «entrenarlo».* Recomiendan forzar la utilización del lado parético evitando el desarrollo de estrategias compensadoras inadecuadas. Proponen que los métodos de entrenamiento deben ser similares a los que se han demostrado eficaces para adquirir nuevas habilidades en gente sana. El terapeuta ha de tener en cuenta la biomecánica del movimiento, las características de los músculos implicados en la acción, el contexto ambiental en el que se desarrolla y la naturaleza de los déficits asociados. La adquisición de una nueva habilidad implica la capacidad de realizarla de diferentes formas y poder adaptarse a las demandas ambientales.

El programa de reaprendizaje motor utiliza cinco estrategias para enseñar y motivar al paciente. El terapeuta elegirá la combinación más apropiada adaptándose a las necesidades individuales del paciente: 1) instrucciones verbales simples y claras asociadas, si es necesario, a comunicación no verbal; 2) demostraciones visuales de cómo realizar la tarea; 3) guía manual pero evitando ayudas innecesarias y disminuyendo progresivamente el nivel de supervisión hasta lograr la práctica independiente; 4) refuerzo y feedback positivo cuando la acción se realiza correctamente y 5) práctica repetitiva.

Para conseguir mejorar el rendimiento motor el paciente debe, además, practicar a lo largo del día según las instrucciones del terapeuta. Varios ensayos clínicos sugieren que el reaprendizaje orientado a tareas es más eficaz que las terapias tradicionales y que el efecto es específico de la actividad reentrenada.



Figura 16. Movimiento orientado a tareas [33]

Terapia del movimiento inducido mediante restricción del lado sano (TMIR). Esta modalidad de tratamiento es un grupo de técnicas. La más empleada utiliza la restricción motora de la extremidad superior (mediante una órtesis y cabestrillo) y el entrenamiento del brazo parético varias horas al día durante varios días consecutivos (habitualmente 10-14 días). Se va aumentando la dificultad motora en pequeños incrementos y se emplean refuerzos positivos cada vez que el paciente logra un objetivo. Se ha observado una gran mejoría en la función motora y que ésta se incorpora a las actividades habituales del paciente. El efecto del tratamiento, además, se mantiene a largo plazo.

Una de las principales limitaciones de la técnica es que sólo se puede aplicar a pacientes con una paresia moderada (al menos 20° de extensión activa de muñeca y 10° de extensión de dedos) y sin problemas cognitivos relevantes. Es la única técnica que se ha demostrado que induce una reorganización cortical en el cerebro del paciente con ictus.



Figura 17. Terapia de movimiento inducido por restricción [34]

Programas de fortalecimiento muscular y reacondicionamiento físico. A pesar de que la debilidad muscular es uno de los síntomas cardinales del ictus, durante años se ha prestado una escasa atención a los programas de fortalecimiento muscular. Cada vez parece más claro que la debilidad muscular y la pérdida de coordinación de los movimientos influyen mucho más en la incapacidad tras el ictus que el aumento del tono muscular. Se han publicado varios ensayos clínicos que demuestran que es posible aumentar la fuerza y la capacidad funcional del hemipléjico con ejercicios de musculación contra resistencia sin provocar efectos adversos. Los resultados positivos se han descrito con protocolos de ejercicios isotónicos e isocinéticos. Para mejorar la resistencia y la forma física se han recomendado además programas de ejercicios aeróbicos. Se ha demostrado que es posible mejorar la forma física de forma significativa educando al paciente sobre la forma de incrementar su actividad sin necesidad de un entrenamiento supervisado. Los efectos del ejercicio de musculación contra resistencia y del ejercicio aeróbico probablemente se complementen y se han publicado mejorías importantes con programas combinados.

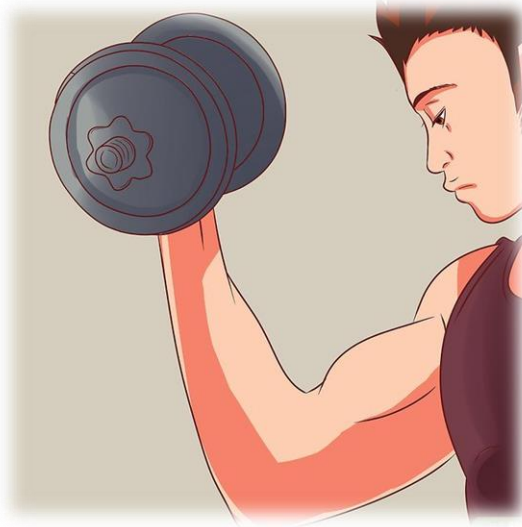


Figura 18. Ejercicio de recuperación para los hombros [35]

Medicación. Varios estudios experimentales han observado que algunos fármacos pueden modular la acción de ciertos neurotransmisores centrales y tener un efecto beneficioso, o perjudicial, sobre la recuperación motora tras una lesión cerebral. Algunos fármacos, cuyo efecto sobre la recuperación motora se ha investigado en los últimos años, son anfetaminas, norepinefrina, GABA (gamma-aminobutyric acid), dopamina, levodopa, el estimulante metilfenidato y los antidepresivos que favorecen la recaptación de serotonina. Loubineaux et al (101) han descrito que en sujetos normales una simple dosis de fluoxetina o de anfetamina modifica significativamente el perfil de activación motora observado en una Resonancia Magnética Funcional. En resumen, aunque algunos datos sugieren la posible utilidad de algunos fármacos para favorecer la recuperación motora en la fase subaguda del ictus, la información disponible es poco concluyente para recomendar su utilización rutinaria.

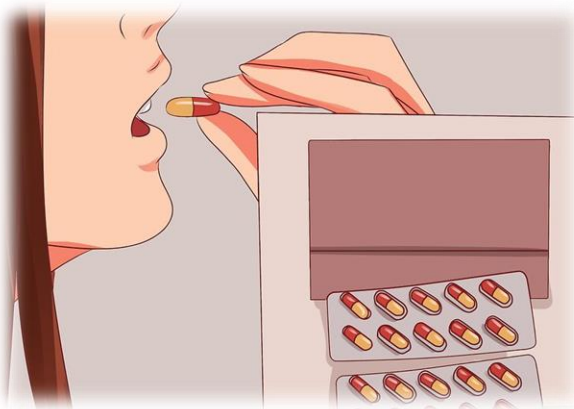


Figura 19. Medicación [35]

Biofeedback. Se basa en utilizar un equipo que reconoce los procesos fisiológicos y los transforma en señales acústicas y/o visuales para facilitar su reentrenamiento. El modelo más utilizado es el **biofeedback electromiográfico (BF-EMG)**, el cual detecta la actividad mioeléctrica del músculo mediante electrodos superficiales, y se utiliza para aumentar la contracción de un músculo espástico y/o para conseguir equilibrio y coordinación entre varios músculos que intervienen conjuntamente en un patrón de movimiento. Al paciente se le pide que utilice la información auditiva o visual que le proporciona el aparato para aumentar o inhibir una determinada actividad muscular.

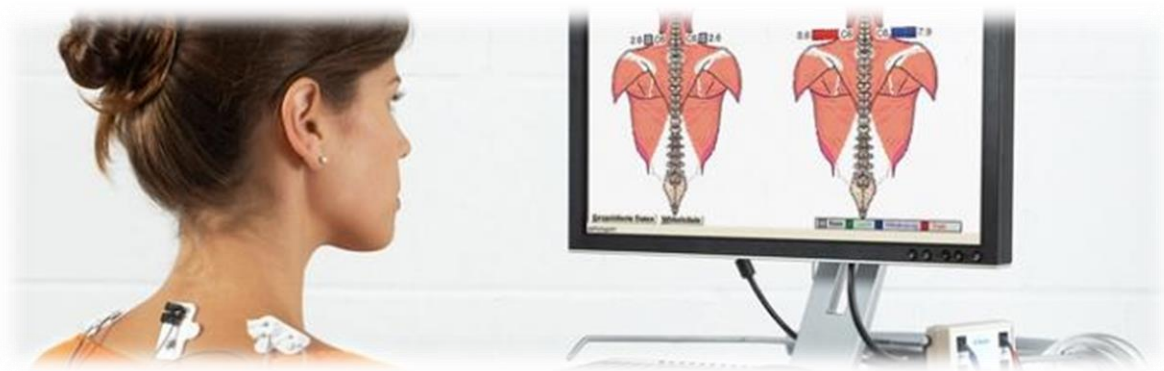


Figura 20. Biofeedback electromiográfico [36]

Estimulación eléctrica neuromuscular (EENM). Consiste en la aplicación de corriente eléctrica para obtener una contracción muscular. Se han propuesto varios efectos terapéuticos sobre el paciente hemipléjico: fortalecimiento muscular, inhibición de la espasticidad del antagonista, corrección de contracturas, prevención de la subluxación del hombro y facilitación del control motor voluntario. La contracción muscular que se obtiene con la EENM es fundamentalmente de fibras tipo II, fácilmente fatigables, de unidades motoras grandes y se activan de forma sincronizada. La contracción muscular voluntaria es diferente, se activan principalmente fibras tipo I, las unidades motoras pequeñas y de forma desincronizada. La EENM debe considerarse, casi exclusivamente, en pacientes muy motivados con un déficit motor moderado. Sólo debe utilizarse como un complemento del ejercicio activo y con objetivos concretos.



Figura 21. Estimulación eléctrica neuromuscular [37]

Estimulación Eléctrica Funcional (EEF). Utiliza la EENM como sustitución ortésica. Se basa en el control de músculos inervados para conseguir movimientos funcionales con objetivos concretos. La aplicación más simple, y de las más utilizadas, es la estimulación del nervio peroneo para conseguir la dorsiflexión del tobillo durante la marcha. Exige un buen nivel cognitivo y una importante participación activa del paciente (para ajustar la amplitud y situar correctamente los electrodos). El diseño del aparato hace difícil aplicar y conectar los electrodos con una sola mano y muchos pacientes requieren ayuda. Su complejidad y elevado precio han supuesto un freno importante a su utilización.



Figura 22. Estimulación Eléctrica Funcional [38]

Estimulación neuromuscular activada electromiográficamente. Es una de las alternativas más atractivas y con mayor potencial. Combina las ventajas de la EENM y del biofeedback. El paciente inicia el movimiento de forma voluntaria y a partir de un umbral prefijado se activa un estimulador eléctrico. Permitiría el entrenamiento específico, individualizado, repetido y sin necesidad de supervisión directa, de los músculos paréticos. Varios ensayos clínicos controlados apoyan su eficacia.

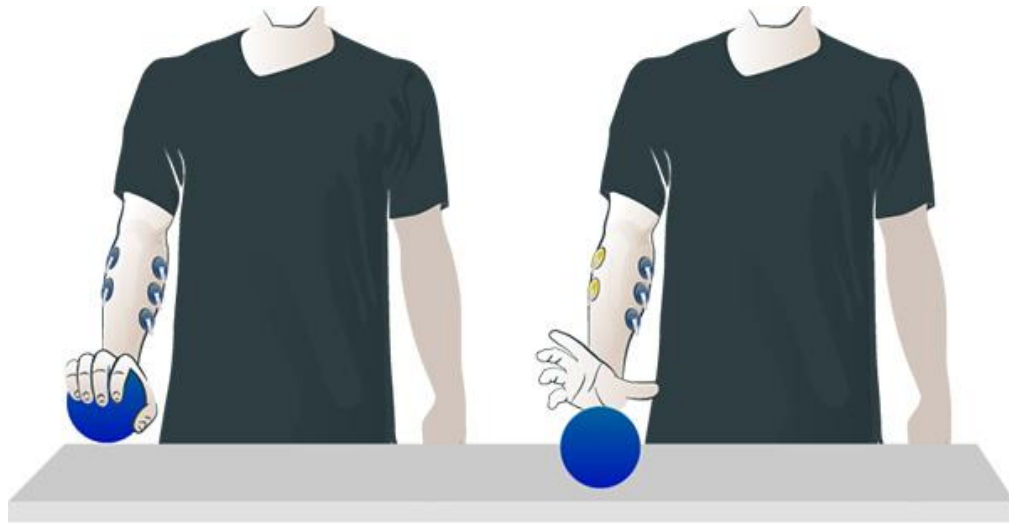


Figura 23. Estimulación neuromuscular activada electromiográficamente [39]

Tratamiento de rehabilitación asistido por robot. El uso de equipos robóticos en rehabilitación puede proporcionar un tratamiento interactivo que cumple con la recomendación del manejo fisioterapéutico que indica la realización de tareas específicas, tempranas, repetitivas, intensas, activas y pertinentes para las actividades de la vida diaria. Además, permite agregar el empleo de retroalimentación visual, propioceptiva y verbal durante la ejecución de la tarea, lo cual hace que la realización de una secuencia motora funcional tenga más sentido y resulte más motivante para el individuo.

Los equipos robóticos para la rehabilitación proporcionan modalidades de tratamiento tales como la movilización pasiva, movilización activo-asistida con descarga parcial o completa de peso y movilización contra resistencia [30, 40-43].



Figura 24. Ejemplo de robot para rehabilitación [44]

e) Aplicación de la robótica en la rehabilitación

La robótica se ha definido como la aplicación de dispositivos con sistemas electrónicos o computarizados diseñados para realizar funciones humanas. Un robot terapéutico es un sistema que detecta los movimientos del usuario, utiliza esta información para ajustar parámetros y provee retroalimentación visual y sensitiva al paciente. Son dispositivos no invasivos, de fácil control, con poco riesgo para el paciente, y de buena efectividad para el tratamiento.

Sus metas son: facilitar el trabajo del terapeuta físico u ocupacional, y lograr una rehabilitación óptima que ofrezca las siguientes ventajas: reproducibilidad, programas orientados a tareas específicas, progresión cuantificada, actividades lúdicas [45].

El uso de robots en la rehabilitación tiene dos aplicaciones fundamentales:

- 1) Almacenar información de la realización del movimiento activo del paciente (posición, velocidad y fuerza).
- 2) Incorporar la información proveniente del usuario para realizar el control autoadaptativo del sistema de rehabilitación robótica [46].

Los robots se han empleado en la rehabilitación desde los años 1960s, en ese entonces su enfoque era el remplazo de funciones perdidas utilizando órtesis robóticas, sillas de ruedas robóticas,

dispositivos para alimentación y estaciones de trabajo. En las últimas décadas se han incrementado las investigaciones que utilizan robots como apoyo para la terapia física, ello se debe a que los robots realizan tareas repetitivas y pueden ser diseñados para modificar la fuerza que utilizan en la ejecución de los ejercicios, lo cual reduce la carga de trabajo del terapeuta, permitiéndole supervisar simultáneamente el tratamiento de varios pacientes. Además, los dispositivos robóticos pueden utilizarse para un diagnóstico con mayor objetividad empleando datos cuantitativos que se obtienen utilizando los sensores adecuados.

Los robots empleados para terapia física utilizan un control de retroalimentación activa para proveer guía, asistencia o resistencia a los usuarios durante la realización de sus ejercicios de rehabilitación.

Los robots de rehabilitación deben tener un diseño ergonómico, seguro y amigable con el usuario. Además, deben permitir ajustes del tratamiento de rehabilitación para adaptarse a las necesidades y características de cada usuario. Así mismo, los robots deben ser capaces de operar de manera segura en diferentes entornos.

Estos requisitos introducen un número de retos en el diseño y control de robots para la rehabilitación siendo los principales:

- Compatibilidad cinemática: El robot debe conformar la anatomía de la extremidad humana para mantener la compatibilidad cinemática durante el movimiento.
- Optimización de diseño: Los parámetros de diseño del robot necesitan optimizarse para obtener un robot compacto y eficiente que alcance el rango de movimiento y fuerza requerida.

Finalmente, los sistemas robóticos pueden aportar una interfaz gráfica de usuario diseñada para captar la atención del paciente, lo que permite que la rehabilitación se realice a modo de videojuegos en donde se indica la trayectoria que el paciente debe seguir para alcanzar su objetivo. Esto, sin lugar a dudas, permite tener ejercicios de rehabilitación orientados a metas con una mayor motivación del paciente [47].

Realidad virtual y rehabilitación. *La realidad virtual es una interface de usuario avanzada para aplicaciones computacionales, que permiten al usuario navegar e interactuar, en tiempo real, con un ambiente tridimensional generado por una computadora, usando dispositivos multisensoriales.* Los ambientes virtuales han servido como medio para la realización de ejercicios de rehabilitación. Dichos ambientes son escenarios gráficos en los cuales el usuario interactúa en tiempo real haciendo uso de dispositivos sensoriales para visión, audición y propiocepción.

De la combinación de los conceptos de realidad virtual y rehabilitación, surgió el concepto de rehabilitación virtual, un término acuñado por los profesores Daniel Thalmann y Grigore Burdea. La *rehabilitación virtual* se define como *el entrenamiento basado en ejercicios de simulación mediante tecnología de realidad virtual* [48].



Figura 25. Realidad Virtual para la rehabilitación [49]

f) Tipos de robots en la rehabilitación de miembro superior

Los robots de rehabilitación robótica se han clasificado principalmente en robots de efector final y exoesqueletos.

Los robots de *efector final* permiten el movimiento de la extremidad del usuario en un espacio de trabajo muy limitado. Por otro lado, los *exoesqueletos* tienen una estructura cinemática similar a la extremidad humana, y están diseñados para operar junto a la extremidad del usuario.

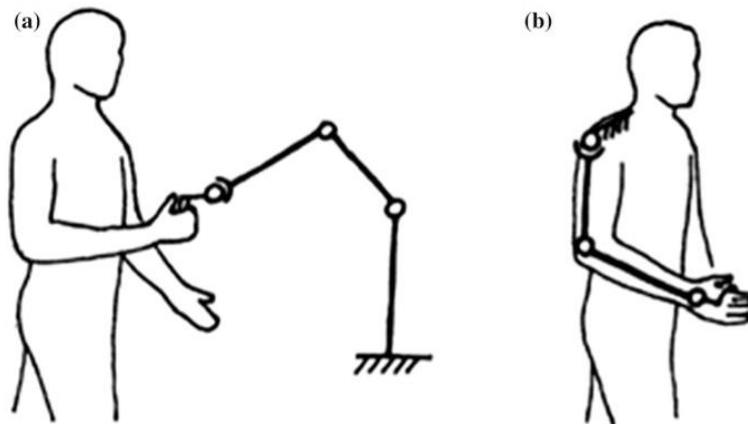


Figura 26. Robots de a) Efector final y b) Exoesqueleto [50]

VI) ESTADO DEL ARTE

Considerando las diferencias entre los robots de efector final y los de exoesqueleto, se realizó una búsqueda de la literatura de ejemplos de los tipos de robots aplicados en el campo de la rehabilitación de miembro superior.

1. Robots Utilizados en la Rehabilitación

Los robots diseñados para terapia física suelen emplearse para el entrenamiento neuromotor de pacientes con trastornos neurológicos. En particular, para la rehabilitación de miembro superior podemos encontrar los siguientes ejemplos de robots:

a) Robots de efector final

- **MIT-Manus:**

Es un robot de efector diseñado por investigadores del Hospital de Rehabilitación de Burke, en colaboración con el Instituto Tecnológico de Massachusetts.

La mano y la muñeca del paciente se dejan sobre un soporte rígido que permite movimientos activos de codo y hombro. Un módulo del robot guía al brazo del paciente permitiendo el movimiento en el plano horizontal de 2 GDL, y si se monta otro módulo al extremo del módulo planar, se obtienen 3 GDL que proporcionan movimiento a la muñeca. También permite un pequeño rango de movimiento vertical pasivo a través de un conjunto de resortes.

El sistema está diseñado para tener baja inercia, y provee retroalimentación visual y auditiva para indicar al usuario la localización de su mano, así como para darle instrucciones.

El dispositivo puede registrar los movimientos e información tal como posición, velocidad y las fuerzas aplicadas, que se utilizan como parámetros de retroalimentación y modulación de la terapia [47, 48, 51].

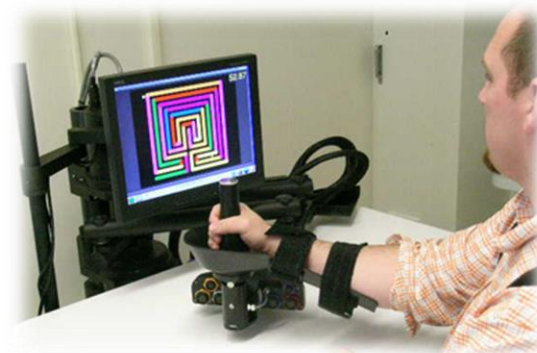


Figura 27. MIT-Manus [52]

- **MIME:**

El sistema MIME “Mirror-image motion enabler” emplea un robot manipulador de 6 GDL (PUMA 560, de Staubli Unimation Inc, Duncan, Carolina del Sur) que permite al antebrazo posicionarse en un espacio tridimensional. Las fuerzas y torques entre el robot y la extremidad afectada son medidas. Una computadora controla el movimiento del robot a partir de tareas pre-programadas para el nivel de recuperación del usuario y las metas terapéuticas.

Se utilizan cuatro modos de asistencia de movimiento: pasivo, activo-asistido, activo-restringido y bilateral. En el modo pasivo, el robot mueve la extremidad hasta un objetivo con una determinada trayectoria. En el modo activo-asistido, el usuario inicia el movimiento con una fuerza voluntaria hacia el objetivo trabajando con el robot como si éste moviera la extremidad. En el modo activo-restringido, el robot provee una resistencia en la dirección del movimiento deseado y las fuerzas de retorno de resorte perpendiculares a la dirección del movimiento que el usuario intentó alcanzar hacia el objetivo con un esfuerzo máximo. En el modo bilateral, ambos antebrazos se mantienen en simetría de espejo por un digitalizador de posición que mide el movimiento del antebrazo contralateral y provee coordenadas al controlador de movimiento del robot [47, 53, 54].

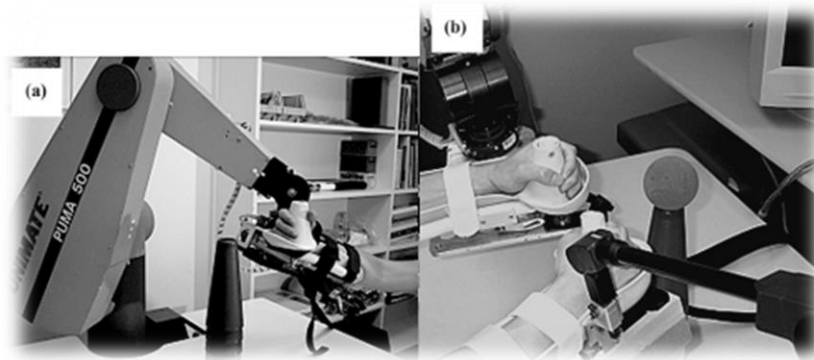


Figura 28. Sistema MIME con movimiento a) Unilateral, y b) Bilateral [54]

- **GENTLE/s:**

Es un proyecto financiado por la Comisión Europea cuyo objetivo es evaluar la terapia de rehabilitación asistida por robots en la rehabilitación del ictus. El sistema emplea un robot de efector final con una interfaz háptica de 3 GDL. El fisioterapeuta elige el perfil del paciente de una base de datos, seleccionar un ejercicio o crear un nuevo ejercicio utilizando una interfaz gráfica de usuario tridimensional. Con el fin de permitir al usuario interactuar de manera virtual se utilizan modelos como el concepto “Bead Highway” que asume que el movimiento toma lugar entre un punto inicial y un punto final. Se asume que su comportamiento es similar al comportamiento de las cuentas de un collar, que sólo se pueden mover a lo largo de su camino. Para lograr este comportamiento el efector final está conectado a un muelle y amortiguador virtual (véase figura 29) donde la cuenta está obligada a moverse en una ruta y un perfil de velocidad del movimiento [47, 53].

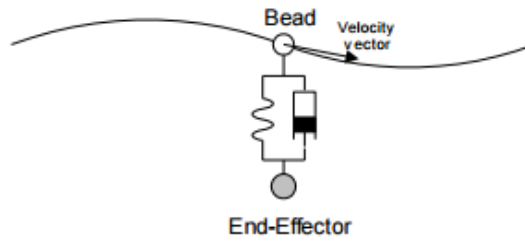


Figura 29. Bead Highway Resorte y amortiguador [53]



Figura 30. GENTLE/s [53]

- **InMotion ARM:**

De Interactive Motion Technologies, Inc., Boston, M.A., es un robot de efector final con 2 GDL activos. Es capaz de adaptarse continuamente a las habilidades del paciente. Tiene un software de juegos de ejercicios terapéuticos para planeación de movimiento, coordinación ojo-mano y de atención. Además, provee de medidas de retroalimentación, y posee una herramienta de valoración del control motor y recuperación del movimiento de la extremidad. Se le puede añadir un módulo (InMotion HAND) que mide las fuerzas del paciente y lo asiste en el agarre de la mano [47, 55].



Figura 31. Interfaz InMotion Arm [55]



INMOTION ARM™



Figura 32. InMotion Arm e InMotion Hand [55]

- **Biodex System 4 dynamometer:**

De Biodex Medical Systems, Inc., New York, es un robot de efector final que utiliza una tecnología de dinamómetro avanzada para aplicarse en pruebas neuromusculares y rehabilitación. Tiene las opciones de carga muscular dinámica y estática, lo cual permite realizar combinaciones de técnica y aplicación. Su software muestra las necesidades, progreso y resultados de los ejercicios, así como el posicionamiento del paciente en la pantalla con apoyo auditivo y visual [47, 56, 57].



Figura 33. Biodex System 4 [57]

- **HUMAC NORM:**

De CSMi, Stoughton, M.A., es un robot de efector final desarrollado por el Exercise Science Lab y perfeccionado en Physical Therapy Clinic and Athletic Training Room. Tiene retroalimentación visual en gráficos y juegos, así como reportes del progreso de la recuperación del paciente.

En una sola máquina, el HUMAC NORM ofrece 22 movimientos independientes cubriendo el hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla, tobillo y espalda. Además, cuenta con diferentes tipos de evaluaciones-entrenamientos con cuatro modos de trabajo diferentes: isocinético, isotónico, isométrico y pasivo.

El asiento del HUMAC NORM tiene la posibilidad de mover el respaldo adelante y atrás, así como sus cinturones de seguridad y arneses de cuatro puntos, acomodan y estabilizan por igual a pacientes grandes, pequeños, jóvenes y viejos [47, 58, 59].



Figura 34. HUMAC NORM Ejercicios de hombro [58]



Figura 35. HUMAC NORM [58]

b) Robots de exoesqueleto

- **ARMin III**

Es un robot de exoesqueleto de 3 GDL que controla la posición del dispositivo e interactúa con la fuerza entre el robot y el paciente. Tiene una interfaz gráfica con diferentes escenarios de entrenamiento que varían dependiendo del modo de entrenamiento, el cual puede ser movilización pasiva, terapia de juego activa y entrenamiento de las AVDs activa [47, 60].



Figura 36. ARMin [60]

- **MGA:**

Es un robot de exoesqueleto de 4 GDL para el hombro, una articulación de cabeceo del codo y una articulación del antebrazo pro / supinación pasiva.

Cuando se detecta un fallo, el exoesqueleto debe también a) detener el movimiento del brazo y mantener la posición actual, o b) cuidar el brazo mediante el corte de la energía de los motores [47, 61, 62].



Figura 37. Exoesqueleto MGA [62]

- **ArmeoPower:**

Es un robot exoesqueleto (órtesis robótica) de brazo de 6 GDL accionados que permite una recuperación en forma temprana de funciones motoras perdidas del brazo y la mano empleando ejercicios para incrementar la fuerza muscular y el rango de movimiento. Además, también cuenta con herramientas de valoración para obtener un análisis objetivo del progreso.

Utiliza una amplia gama de ejercicios, mediante juegos elaborados para capacitar las actividades de la vida diaria y que, además, ofrecen retroalimentación al paciente. También reconoce cuando el usuario es incapaz de llevar a cabo algún movimiento y ayuda al miembro tanto como sea posible para alcanzar el objetivo de manera exitosa. ArmeoPower se adapta al miembro afectado y a las necesidades individuales y habilidades de cada usuario [47, 48, 63, 64].



Figura 38. ArmeoPower [65]

- **ArmeoSpring:**

Es un robot exoesqueleto pasivo de 7 GDL, instrumentado con un mecanismo de resortes para ajustarse, se utiliza en pacientes que comienzan a recuperar el movimiento activo del brazo y la

mano en un espacio 3D, y puede utilizarse como dispositivo de entrada en tiempo real. Cuenta con un compensador de peso y una forma ajustable que abraza el brazo desde el hombro hasta la mano.

ArmeoSpring ofrece una terapia de movimientos activos, repetitivos, auto-iniciados y con motivación, ya que provee retroalimentación mediante juegos para motivar al paciente. También obtiene información de la posición del brazo 3D y la fuerza de agarre que permiten aprovechar sus herramientas para valorar el desempeño del paciente [47, 63, 66].



Figura 39. ArmeoSpring [67]

- **ArmeoSpring Pediatric:**

Es una versión del ArmeoSpring específicamente diseñada para las necesidades de los niños, es decir, permite un ajuste de la longitud de la órtesis para niños de 4 a 12 años de edad [47, 63].



Figura 40. ArmeoSpring Pediatric [68]

- ***mPower arm brace:***

De la compañía Myomo, Inc., Cambridge, MA, es un brazo portable de 1 GDL que utiliza señales de electromiografía (EMG) obtenidas de los músculos bíceps y tríceps para generar torques asistivos para la flexión y extensión del codo [47, 69].



Figura 41. Myomo [69]

- ***Hand Mentor:***

De Kinetic Muscles, Inc., Temple AZ, es un dispositivo que se puede vestir (wearable) de 1 GDL para la rehabilitación de la muñeca y de los dedos, provee fuerza, posición y retroalimentación EMG, y es actuada por un músculo neumático [47, 70].



Figura 42. Hand Mentor [70]

- ***Robot Suit HAL-5:***

De Cyberdyne Inc., Japan, es un exoesqueleto de cuerpo completo que utiliza la lectura de señales EMG del usuario para generar torques asistivos. El exoesqueleto HAL 5 ayuda al usuario a cumplir con una variedad de tareas de la vida diaria [47, 71].



Figura 43. HAL-5 [71]

- **Amadeo:**

De Tyromotion, es un dispositivo mecatrónico que consiste en un mecanismo eléctrico cuyo movimiento se acciona por sí mismo. Posee un marco de apoyo con altura ajustable, y una unidad de control basada en una computadora. Amadeo mueve los dedos de acuerdo con un patrón o protocolo de movimiento preseleccionado. La idea principal es proporcionar un amplio número de terapias, evaluación del rango de movimiento, medición de la fuerza, retroalimentación y terapia asistida. Los dedos del paciente son conectados al mecanismo de correderas del Amadeo por medio de imanes, una vez que el brazo es ajustado al dispositivo y el paciente se sienta derecho se procede a realizar la terapia física [47, 51].



Figura 44. Amadeo [51]

- ***iPAM (intelligent Pneumatic Arm Movement):***

Es un brazo robótico con actuadores neumáticos, es semi-automatizado y proporciona ejercicios de extremidades superiores. El sistema emula la asistencia de un fisioterapeuta, compensa la gravedad y elimina cualquier carga potencialmente peligrosa para el paciente. También ofrece realimentación del paciente en cuanto a desempeño, usabilidad en el ejercicio y motivación [48, 72].



Figura 45. iPAM [72]

- ***PuParm:***

Bajo los requisitos de ser sencillo y modular, ofrece una terapia capaz de aumentar la motivación y compromiso de los pacientes con la terapia y evaluar el progreso del punto de vista funcional [48, 73].



Figura 46. PuParm [73]

2. Cuadro Comparativo

Con base en la investigación realizada se realizó un cuadro comparativo que considera algunas características importantes de los dispositivos descritos anteriormente con el objetivo de identificar las tendencias y diferencias entre éstos y el sistema mecatrónico diseñado.

Tabla 2. Tabla comparativa de los dispositivos para rehabilitación

<i>Dispositivo</i>	Tipo	RHB	Movimiento	GDL	Sujeción y/o apoyo	Retroalimentación	Registra	Diseño y venta
<i>MIT-Manus</i>	Efector final	Pasiva	Codo, hombro, muñeca	2 o 3	Correas, soporte rígido	Visual, auditiva	Posición, velocidad, fuerza	E.U.A.
<i>MIME</i>	Efector final	Pasiva, activa-asistida, activa-restringida	Hombro, brazo	6	Correas, soporte rígido		Fuerza, torque	E.U.A.
<i>GENTLE/s</i>	Efector final	Asistida	Hombro, brazo	3	Correas, soporte rígido	Visual	Fuerza, posición	Europa
<i>InMotion Arm</i>	Efector final	Asistida	Hombro, codo, muñeca, mano	2	Correas	Visual	Fuerza	E.U.A.
<i>Biodex System 4</i>	Efector final	Pasiva, asistida	Miembros superiores e inferiores		Correas, soporte rígido	Auditiva, visual	Posición, fuerza	E.U.A.
<i>HUMAC NORM</i>	Efector final	Pasiva, asistida	Hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla, tobillo, espalda		Respaldo movable, cinturon, arneses	Visual	Posición, fuerza, torque	E.U.A.
<i>ARMin III</i>	Exoesqueleto	Pasiva, Asistida	Hombro, codo, antebrazo, muñeca	3	Correas, soportes rígidos	Visual	Posición, fuerza	Suiza
<i>MGA</i>	Exoesqueleto	Asistida, Activa	Hombro, codo, antebrazo	5	Soportes rígidos	Visual	Posición, fuerza, velocidad	E.U.A.
<i>ArmeoPower</i>	Exoesqueleto	Pasiva, asistida	Brazo, mano	6	Soporte rígido, correas	Visual	Posición	Suiza, Singapur, Eslovenia, E.U.A., Chile México
<i>ArmeoSpring</i>	Exoesqueleto	Asistida	Brazo, mano	7	Soporte rígido, correas	Visual	Posición, fuerza	Suiza, Singapur, Eslovenia, E.U.A., Chile México
<i>mPower arm brace</i>	Exoesqueleto	Asistida	Brazo		Soporte rígido, correas	Torque	Fuerza	E.U.A.
<i>Hand Mentor</i>	Exoesqueleto	Pasiva	Muñeca, dedos	1	Soporte	Visual	Posición	Reino Unido
<i>HAL-5</i>	Exoesqueleto	Asistida	Cuerpo completo		Soporte, correas	Torque	Fuerza	Japón
<i>Amadeo</i>	Exoesqueleto	Pasiva, asistida	Dedos		Soporte, correas	Visual	Fuerza	Austria, Alemania, E.U.A.
<i>iPAM</i>	Exoesqueleto	Asistida	Miembro superior		Soporte, correas	Visual	Posición	Reino Unido
<i>PuParm</i>	Exoesqueleto	Activa	Miembro superior	2		Visual, auditiva	Posición	España
Propuesta de sistema	Efector final	Pasiva	Hombro, brazo, muñeca	6		Visual	Posición, velocidad	México

3. Análisis de la Tendencia

Como se puede observar en los ejemplos anteriores, la tendencia actual de los robots en la rehabilitación va encaminada a la utilización de retroalimentación visual y auditiva por medio de juegos para captar la atención de los usuarios durante la realización de los ejercicios propuestos.

Otra tendencia detectada es el uso de correas como medio de sujeción, así como de bases para brindar un mayor soporte al brazo.

Por otro lado, se notó que la mayor parte de estos dispositivos tienen tareas pre-programadas para la realización de ejercicios de rehabilitación pasiva.

Además, también es muy común encontrar que los robots que apoyan en la rehabilitación de todo el miembro superior tienden a ser muy robustos e inclusive a rehabilitar no solo el miembro superior, sino también el miembro inferior.

En el caso particular de los robots de exoesqueleto se puede notar que, aunque muchos distribuyen el peso del mecanismo hacia su base, llegan a limitar la funcionalidad del brazo, ya sea porque añaden un mayor peso a la extremidad, o porque su configuración restringe la ejecución de determinados movimientos. A esto se le suma la necesidad de adaptar sus mecanismos de sujeción y soporte de acuerdo a las dimensiones de los usuarios.

Finalmente, cabe destacar que se percibió que los dispositivos citados anteriormente han sido diseñados, comercializados e implementados mayoritariamente en el extranjero.

4. Consideraciones

Con base en la investigación de los robots realizada, así como en el análisis de la tendencia y cuadro comparativo, se optó por tomar como base la estructura de un robot de efector final. Esta decisión se tomó debido a que éstos presentan una mayor sencillez en sus mecanismos y, además, no resultan ser tan invasivos para las personas.

Otra característica importante observada consiste en que no requieren de una alineación o ajuste riguroso a las dimensiones de las extremidades de cada persona.

Finalmente, considerando que los objetivos particulares del trabajo tienen un enfoque a la recuperación de la coordinación neuromotora del brazo, y no a la recuperación del tono muscular, los robots de efector final se ajustan de manera perfecta a la etapa de la rehabilitación en que se desea aplicar el sistema mecatrónico diseñado.

VII) MATERIALES Y MÉTODOS

1. Diseño del Sistema

a) Requerimientos

- ✓ **Seguridad.** El sistema evitará causar lesiones al usuario.
- ✓ **Funcional.** El sistema recopilará la información del movimiento del mecanismo y la integrará en una interfaz de usuario para proveer retroalimentación.
- ✓ **Comodidad.** El sistema facilitará la realización de los ejercicios de rehabilitación, evitando posturas que cansen al usuario.
- ✓ **Rapidez de respuesta.** El sistema proveerá retroalimentación visual al usuario del movimiento realizado de manera instantánea.
- ✓ **Resistencia.** El sistema soportará los esfuerzos aplicados por el usuario durante la ejecución de la tarea.
- ✓ **Fácil de utilizar.** Los usuarios y los aplicadores de las pruebas podrán entender y ejecutar las instrucciones únicamente con el apoyo de la interfaz gráfica.
- ✓ **Mayor movilidad posible.** El sistema permitirá moverse en un amplio espacio de trabajo y alcanzable para la extremidad superior del paciente.
- ✓ **De interés.** El sistema mantendrá la atención del paciente para la finalización adecuada de los ejercicios propuestos.
- ✓ **Mantenimiento.** El sistema recibirá atención preventiva y correctiva para garantizar su funcionamiento constante.
- ✓ **Adaptabilidad.** El sistema podrá ser utilizado por cualquier usuario adulto sin importar las dimensiones de su brazo.
- ✓ El sistema se compondrá por tres subsistemas, uno mecánico, uno electrónico y uno computacional.

b) Diagramas del sistema

En la figura presentada a continuación se pueden identificar los subsistemas que conforman al sistema mecatrónico diseñado con sus entradas y salidas.

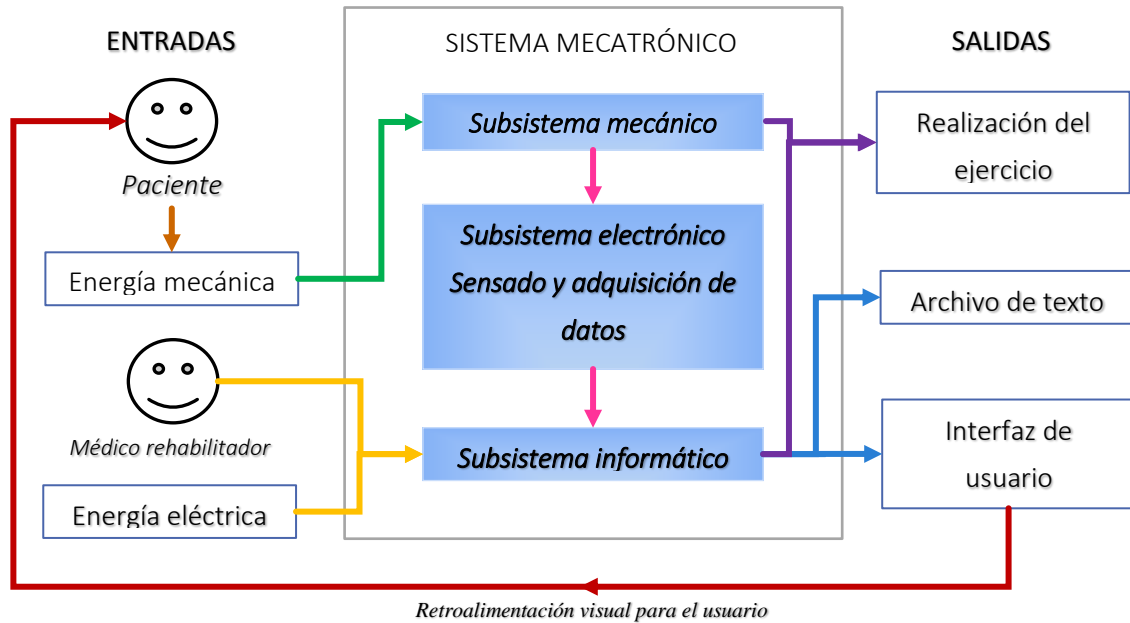


Figura 47. Diagrama del sistema mecatrónico diseñado. Elaboración propia

2. Componentes del Subsistema Mecánico

El subsistema mecánico que está encargado de permitir la interacción física con el usuario requirió de la utilización de los siguientes elementos.

a) Mecanismo

El mecanismo utilizado consiste en un dispositivo antropomórfico de 5 GDL (grados de libertad) compuesto por 5 eslabones y 5 juntas rotacionales. Dicho mecanismo se encuentra instrumentado con cinco sensores de posición angular (encoders), los cuales se ubican en cada una de las juntas para realizar la medición del ángulo de giro de las mismas.

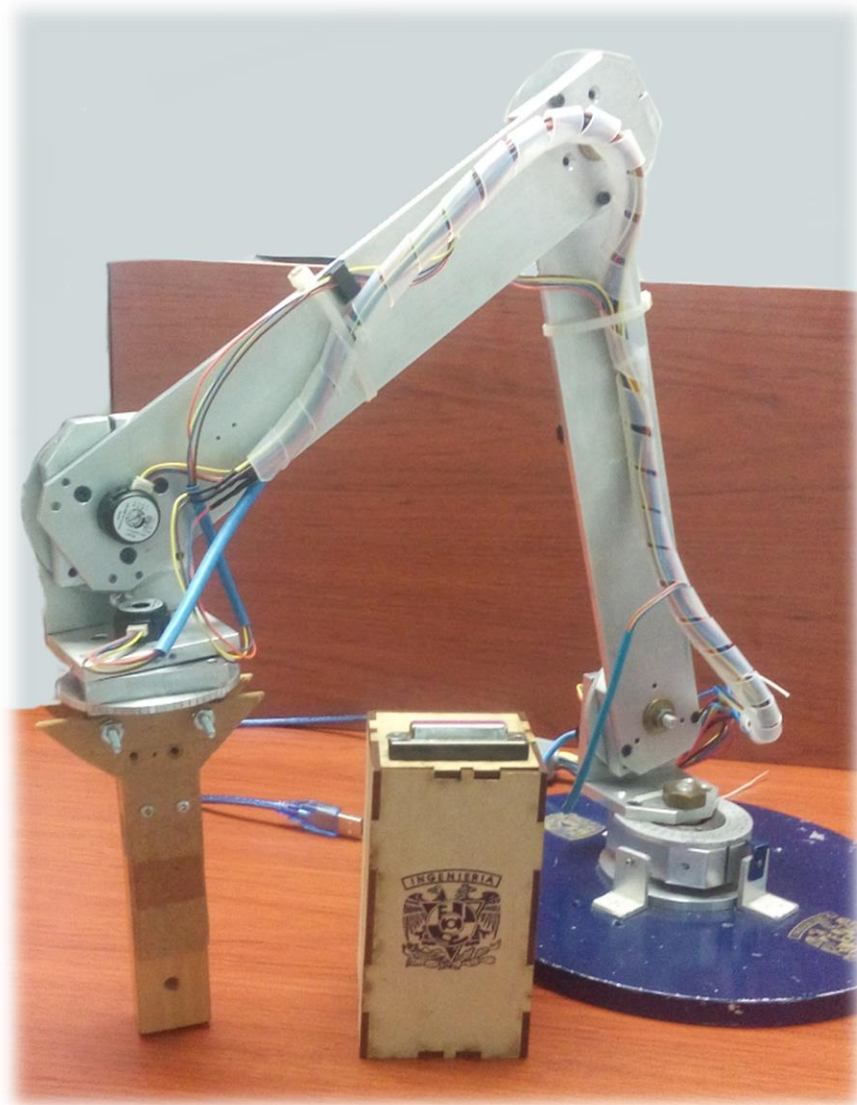


Figura 48. Mecanismo antropomórfico de 5 GDL

3. Componentes del Subsistema Electrónico

Para la adquisición y decodificación de los datos de la posición del mecanismo se emplearon los elementos descritos a continuación.

a) Sensores de posición angular

El modelo de los cinco encoders utilizados para medir los ángulos es E4P de USDigital, el cual corresponde a un encoder óptico miniatura en su versión de terminal simple, con un número de ciclos por revolución (CPR) de 100 a 360, y de 400 a 1440 pulsos por revolución (PPR).



Figura 49. Encoder E4P USDigital [74]

Cada encoder cuenta con las cuatro terminales que se describen a continuación:

Pin	Descripción
1	Alimentación +5 VDC
2	Canal A
3	Tierra
4	Canal B

La alimentación de estos sensores fue aportada directamente de la tarjeta de desarrollo.

b) Tarjeta de desarrollo

Para la realización del control se empleará la tarjeta de desarrollo Arduino Due, la cual fue seleccionada principalmente por el número de interrupciones que puede recibir, siendo éstas las correspondientes a cada uno de sus pines.

Para este proyecto se requiere el uso de 8 interrupciones cuya función principal es la lectura de cuatro de los encoders, obteniendo las señales A y B de cada uno de ellos.

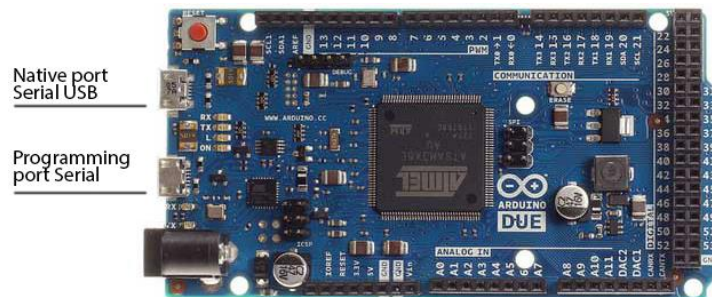


Figura 50. Puertos del arduino DUE [75]

c) Otros

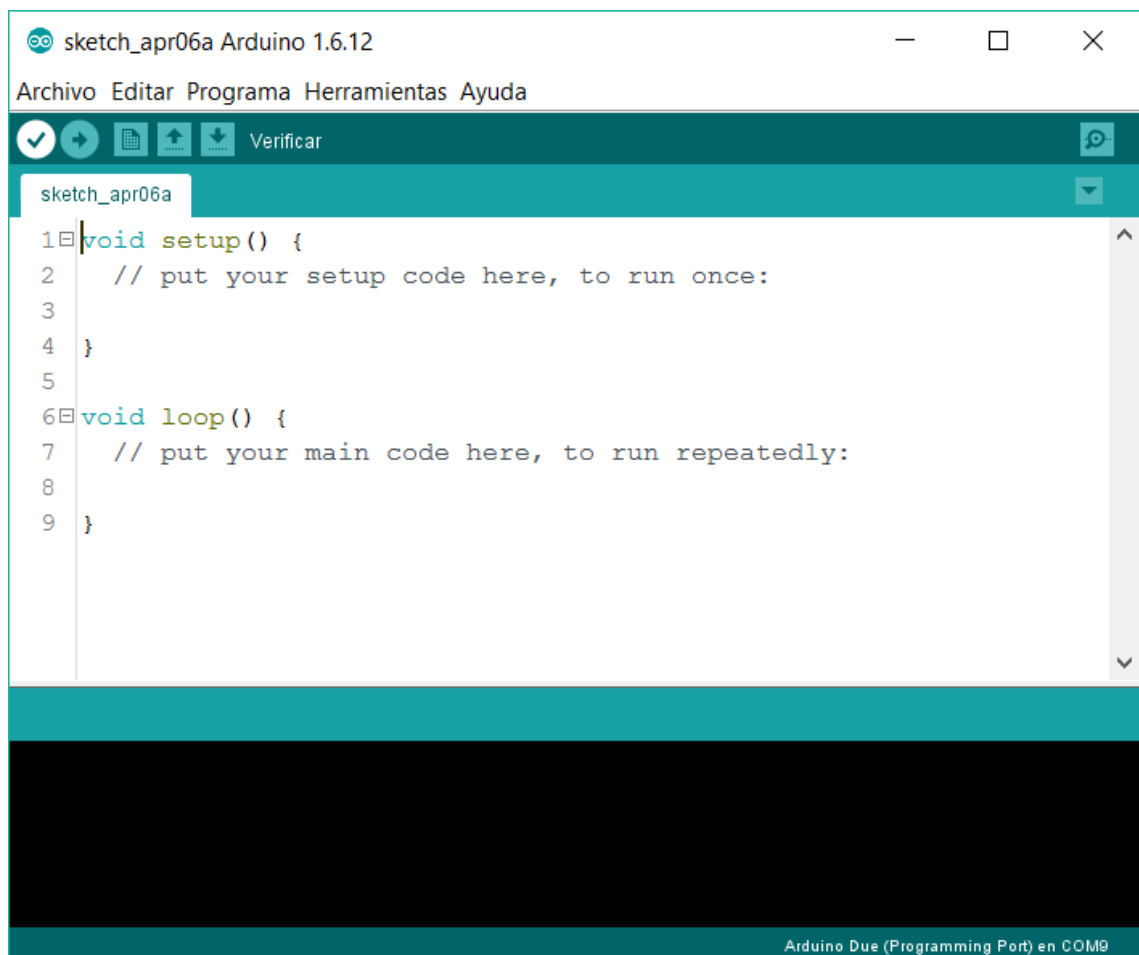
Además, se emplea una computadora a la cual se le conecta el Arduino DUE mediante un cable USB. Por otro lado, para conectar las salidas de los encoders al Arduino DUE se utilizó un cable DB.

4. Componentes del Subsistema Informático

Para la adquisición de datos y la programación de la interfaz de usuario se utilizó una computadora personal a la cual se le instalaron los componentes informáticos que se describen a continuación.

a) Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino

Para la programación del ejercicio propuesto se utilizó el entorno de desarrollo integrado del Arduino, cuyo objetivo particular es realizar la lectura de cada uno de los encoders.



```
sketch_apr06a Arduino 1.6.12
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Verificar
sketch_apr06a
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3
4 }
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8
9 }
```

Arduino Due (Programming Port) en COM9

Figura 51. Entorno de Desarrollo Integrado del Arduino

b) Processing

Por otro lado, para el diseño de la interfaz de usuario se empleó el programa Processing, que, al igual que el programa de Arduino, es de código abierto.

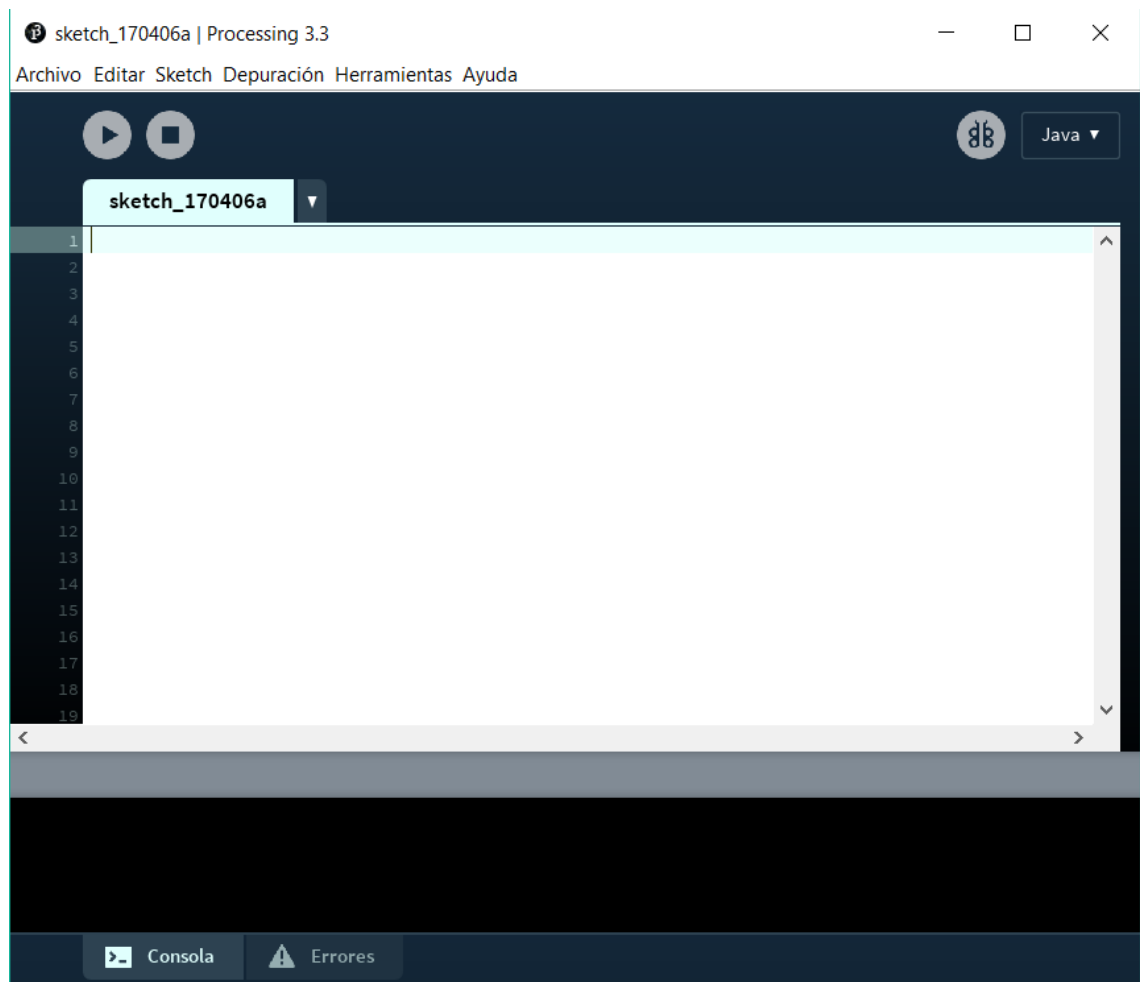


Figura 52. Entorno de trabajo de Processing

c) MATLAB

Finalmente, se utilizó el software MATLAB para el procesamiento de los datos obtenidos.

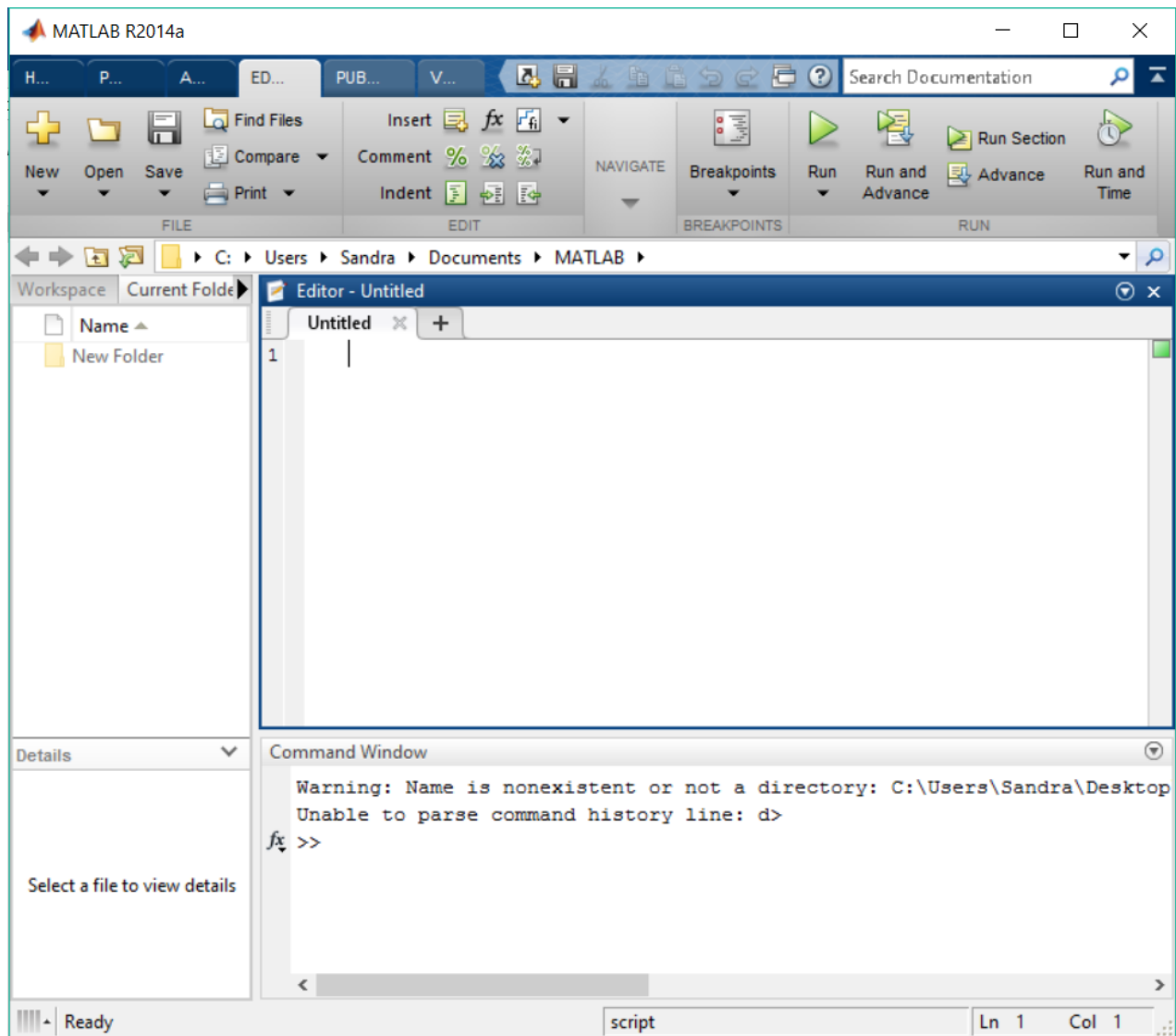


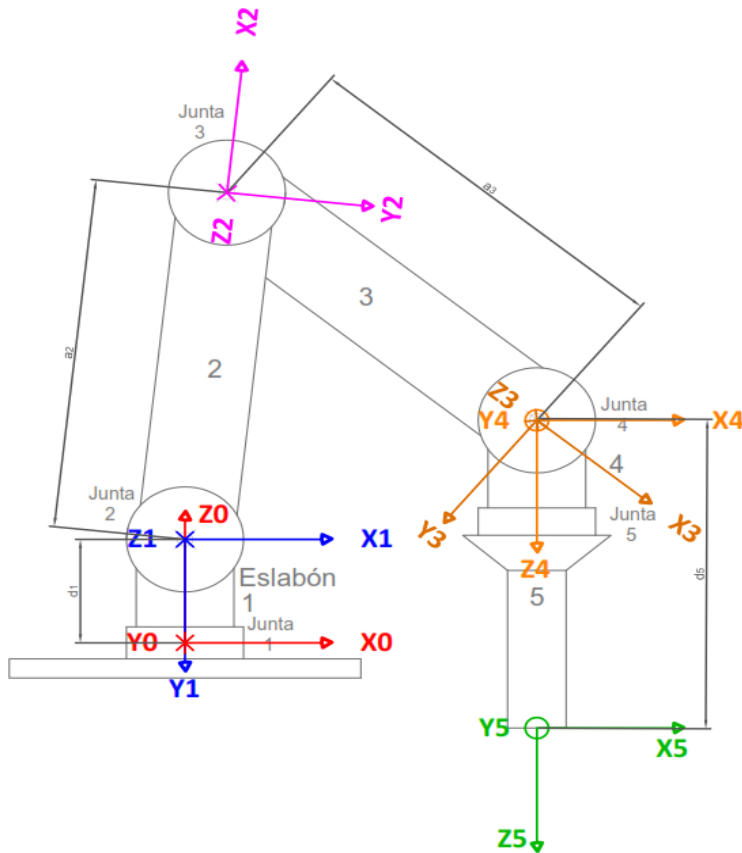
Figura 53. Entorno de trabajo de MATLAB

5. Cinemática Directa

La descripción de la cinemática directa del dispositivo se calculó empleando el método de Denavit-Hartenberg [76], a partir del cual se obtuvo la siguiente tabla:

Junta i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	d_1	0	-90°
2	θ_2	0	a_2	0
3	θ_3	0	a_3	0
4	θ_4	0	0	-90°
5	θ_5	d_5	0	0

Partiendo de la tabla anterior se obtuvieron como resultado las ecuaciones que indican la posición del efector final:



$$Q_x = \cos(\vartheta_1) * (a_2 * \cos(\vartheta_2) + a_3 * \cos(\vartheta_2 + \vartheta_3) - d_5 * \sin(\vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_4))$$

$$Q_y = \sin(\vartheta_1) * (a_2 * \cos(\vartheta_2) + a_3 * \cos(\vartheta_2 + \vartheta_3) - d_5 * \sin(\vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_4))$$

$$Q_z = d_1 - a_2 * \sin(\vartheta_2) - a_3 * \sin(\vartheta_2 + \vartheta_3) - d_5 * \cos(\vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_4)$$

Figura 54. Cinemática directa del mecanismo

6. Lectura de las Posiciones Angulares

a) Configuración de los sensores

Los encoders fueron alimentados a partir de la tarjeta de desarrollo Arduino, empleando su terminal de alimentación de 3.3 [V].

Por otro lado, las señales de salida A y B se conectaron a un cable DP que permite conectarlos directamente al puerto DB del Arduino DUE para realizar su lectura.

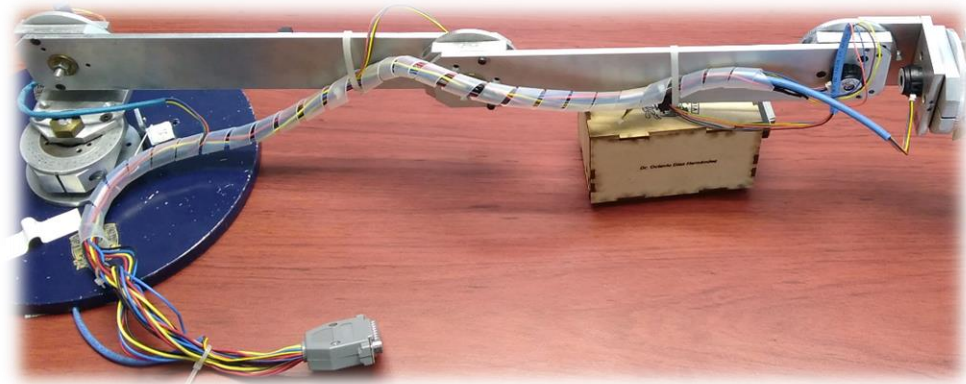


Figura 55. Conexión de los encoders al cable

b) Programación en el Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino

La lectura de los datos recopilados por los encoders se programó en el IDE (por sus siglas en inglés: Integrated Development Environment, o Entorno de Desarrollo Integrado) de Arduino.

Se comenzó definiendo los pines A y B del Arduino DUE que corresponden a cada uno de los cuatro encoders, así como las variables que sirven de contador para cada encoder.

Posteriormente, se procedió a configurar cada uno de los pines de las interrupciones de los encoders, activándose al detectar un cambio de estado, ya sea de alto a bajo, o bien, de bajo a alto. Dichos cambios de estado se darán al detectar que el usuario cambió la posición del mecanismo.

Es importante mencionar que se configuró la velocidad de transmisión de datos a 115200 bps, esta velocidad corresponde a la velocidad con que se enviarán los datos leídos por la tarjeta de desarrollo a la interfaz programada en Processing para la presentación del ejercicio al usuario, es por ello que resulta necesario que ambos entornos tengan dicha velocidad, ya que de no ser así se obtendrá información incompleta.

Además, el programa del Arduino estará ejecutándose todo el tiempo en espera de la recepción de alguna de las interrupciones de los encoders para recibir los datos de la posición del mecanismo.

Esta ejecución continua del programa se encarga de mandar la información de la posición del mecanismo vía puerto serial a la interfaz de usuario programada en Processing.

Al activarse alguna de las interrupciones del Arduino, ya sea de la señal A o B de un encoder, se procede a realizar el ajuste de su contador asociado, ya sea mediante un incremento, si se detecta que su giro fue en el sentido positivo del ángulo, o un decremento, si el giro se dio en el sentido negativo.

El código y diagramas de flujo de este programa pueden consultarse en el [Apéndice A](#).

7. Programación de la Interfaz de Usuario

a) Diseño de la interfaz

Para la realización de la interfaz se propuso un ejercicio que el usuario pudiera realizar a modo de un juego entretenido que le permitiera seguir una trayectoria determinada mediante el seguimiento de objetivos que se desean alcanzar.

La propuesta consiste en seguir la trayectoria de una espiral de puntos, la cual fue considerada dado que se investigaron algunos de los ejercicios que los pacientes que sufrieron un ACV deben realizar durante la etapa activa de su rehabilitación del brazo, y se encontró una actividad en donde el objetivo es que el paciente trace una espiral.

Debido a que una espiral sencilla podría resultar bastante monótona y sin sentido para el usuario al momento de la realización de su recorrido, se optó por realizar un juego sencillo en el que se plantea el personaje de un conejito que pretende llegar a un campo donde cultiva sus alimentos para poder consumir alguno y descansar.

A partir del recorrido ideal indicado por los puntos de la espiral a seguir, se guarda la información obtenida del desempeño del usuario al momento de mover el brazo a la posición de cada uno de los objetivos. La información recopilada incluye las coordenadas en 'X' y 'Y' del efector final, el tiempo correspondiente a cada movimiento y el objetivo alcanzado, así como el tiempo total en el que se completó el ejercicio, y la fecha y hora de la realización de la prueba.

b) Programación de la interfaz en Processing

La interfaz del ejercicio propuesto fue programada en Processing. Se realizó mediante el planteamiento de los objetivos que el usuario debe obtener para completar adecuadamente el ejercicio.

Al inicio del programa se inicializaron las variables requeridas para obtener los datos de posición del mecanismo y el tiempo, así como las variables auxiliares correspondientes al cálculo de la cinemática directa y a la comunicación serial.

Es importante resaltar que al igual que se hizo con el Entorno de Desarrollo Integrado del Arduino, también en el programa elaborado en Processing se configuró la velocidad de transmisión serial en 115200 bps.

Además, se procedió a la creación del documento de texto (incluyendo sus encabezados) donde posteriormente se guardará la información de cada prueba realizada con la fecha y hora correspondiente a su realización.

Para ir manejando el diseño del juego por etapas se emplearon cuatro pantallas del juego independientes: una de inicio, una del juego como tal (donde el usuario debe seguir los objetivos), una de término del juego y finalmente, una de salida cuando no se terminó el ejercicio.

En la pantalla de inicio se pretende que el usuario conozca las instrucciones de juego y calibre la posición del mecanismo a la más adecuada para que realice su ejercicio correctamente, para ello se muestra la espiral de puntos a seguir.

Cuando el usuario indica que está listo para jugar en la primera pantalla, se hace el cambio de pantalla a la pantalla de juego, la cual permite al usuario verificar cuando ha alcanzado los puntos de la espiral siguiendo el orden correcto de los mismos, así como el tiempo total transcurrido de juego. Esto continuará así hasta que el usuario logre alcanzar los 15 objetivos, lo cual lo llevará inmediatamente a la pantalla de término del juego.

Sin embargo, si el usuario desea salir del juego sin cumplir los 15 objetivos puede indicar su salida y a continuación, cambiará a la pantalla de salida sin terminar el ejercicio. Esta última pantalla despliega un mensaje de motivación al usuario y le da la oportunidad de reintentar el juego, o bien, de salir completamente del mismo.

Por otro lado, la pantalla de término de juego muestra un texto de felicitación al usuario, así como las instrucciones para salir del juego completamente o reintentar.

Las siguientes imágenes ilustran las pantallas: inicial, de juego y final.



Figura 56. Pantalla de inicio



Figura 57. Pantalla de juego



Figura 58. Pantalla final

Finalmente, se programaron diferentes subrutinas para ir actualizando la información de las pantallas del juego, lo cual incluye el tiempo y el marcar gráficamente los objetivos que ha alcanzado el usuario. También se utilizaron subrutinas para la detección de los comandos del usuario, para la creación de la espiral de puntos y para la actualización de la información recibida de la posición del mecanismo, todo ello para su posterior procesamiento y ajuste a la pantalla de juego, y finalmente para ir almacenando los datos en el archivo de texto.

Es importante mencionar que al programar la cinemática directa se decidió rotar el sistema de referencia al intercambiar las posiciones en "X" y "Y" con el objetivo de hacerlas coincidir con las coordenadas de la pantalla de Processing.

Finalmente, los diagramas de flujo y el código utilizados para llevar a cabo la programación de la interfaz pueden ser consultados en el [Apéndice B](#).

8. Procesamiento de Datos Obtenidos

Para la realización del procesamiento de los datos obtenidos de cada prueba realizada por un usuario se optó por realizar un programa que pudiera acceder a los datos almacenados en los archivos de texto para posteriormente realizar sus gráficas correspondientes.

a) Obtención de gráficas

Para la realización de cada prueba se obtuvo una gráfica mostrando la trayectoria a seguir y la trayectoria realizada.

Para corroborar la obtención de las gráficas deseadas se realizó una prueba de funcionamiento en la cual se completó el recorrido con el brazo derecho.

A continuación, en la imagen de la página siguiente se muestra el ejemplo de gráfica obtenida de la prueba de funcionamiento.

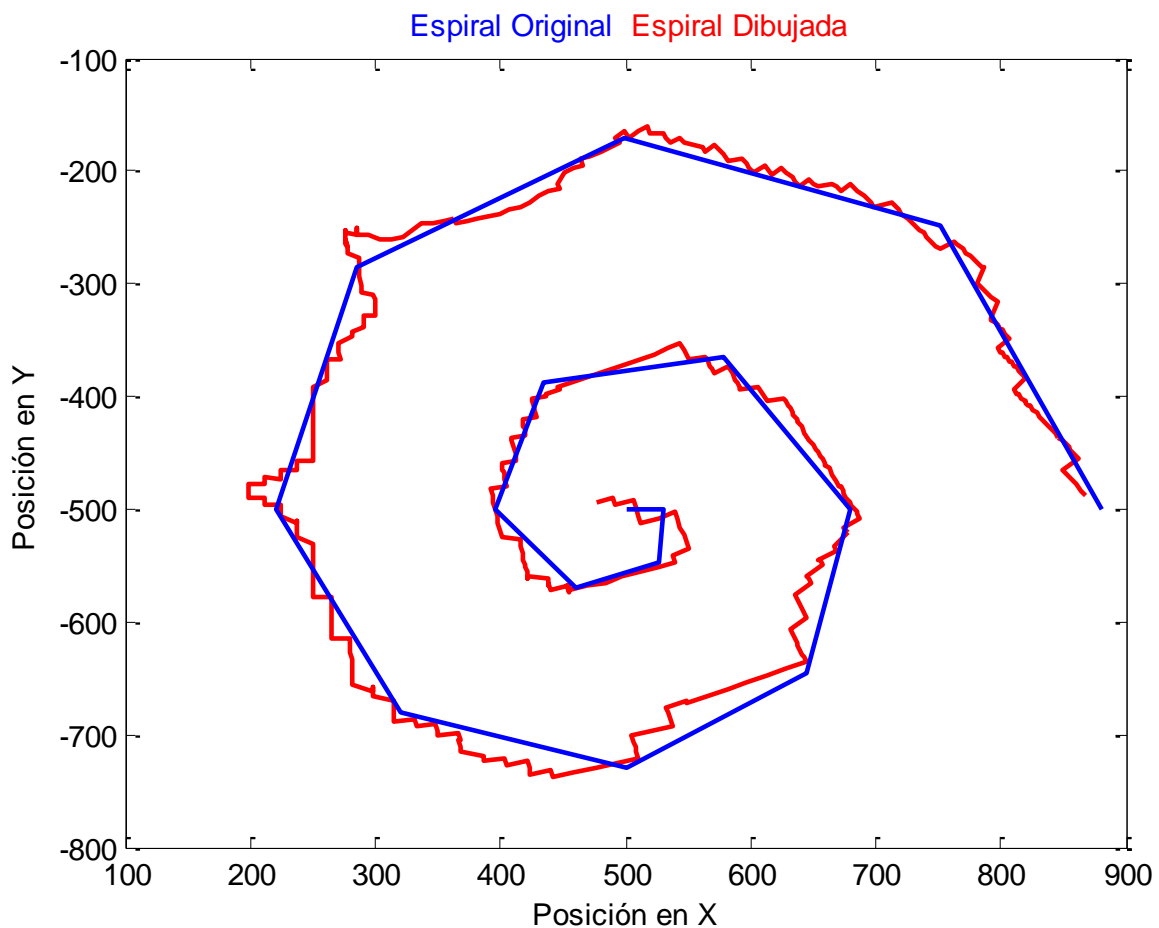


Figura 59. Gráfica de la espiral trazada en la prueba de funcionamiento

En adición a la gráfica correspondiente al trazo de la espiral, se obtiene una gráfica cuya información consiste en la relación entre el tiempo total transcurrido y el número de objetivo que se alcanzó.

En la siguiente página se muestra la gráfica obtenida tras la realización de la prueba de funcionamiento que corresponde al tiempo en alcanzar los objetivos de la espiral trazada.

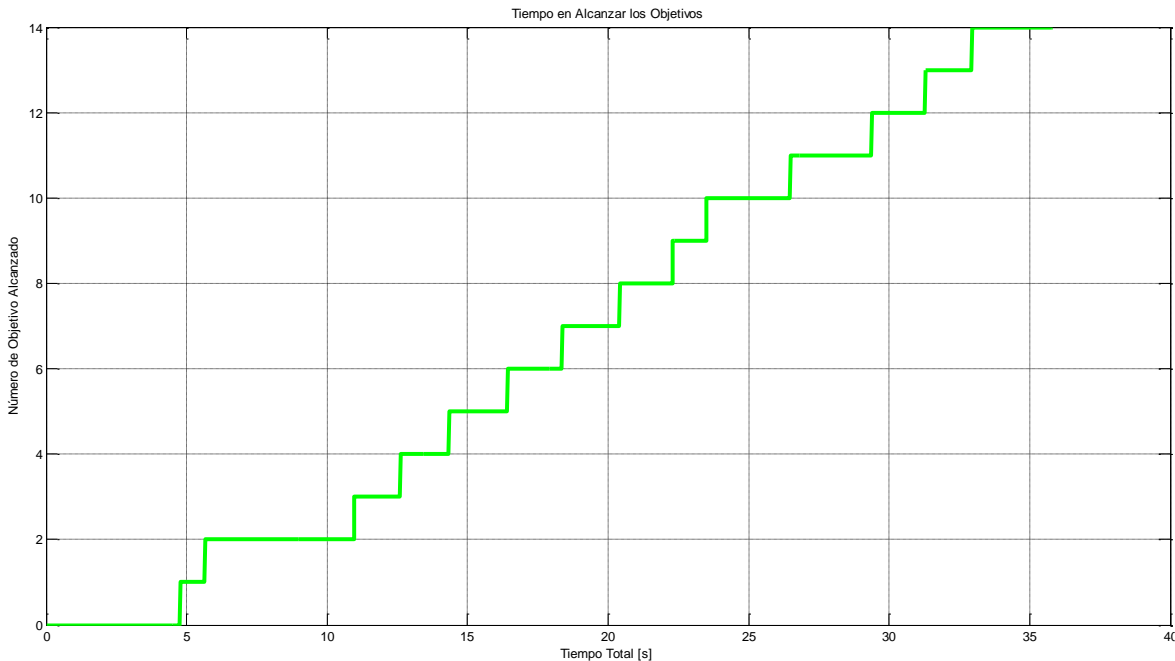


Figura 60. Gráfica del tiempo en alcanzar los objetivos de la prueba de funcionamiento

Además, se realizó el trazo de dos gráficas modelo cuyo objetivo es mostrar el comportamiento esperado en el tiempo del trazo de la trayectoria en las coordenadas 'X' y en las coordenadas 'Y' de manera independiente.

Sin embargo, es importante mencionar que, aunque la forma de cada trazo es casi la ideal, es decir, la que se obtendría de trazar perfectamente la trayectoria, el tiempo en que se realizó corresponde a un tiempo modelo, por lo que no es necesario para cada voluntario cumplir con dicho tiempo total, ni entre objetivos.

A continuación, se muestran ambos gráficos modelos obtenidos.

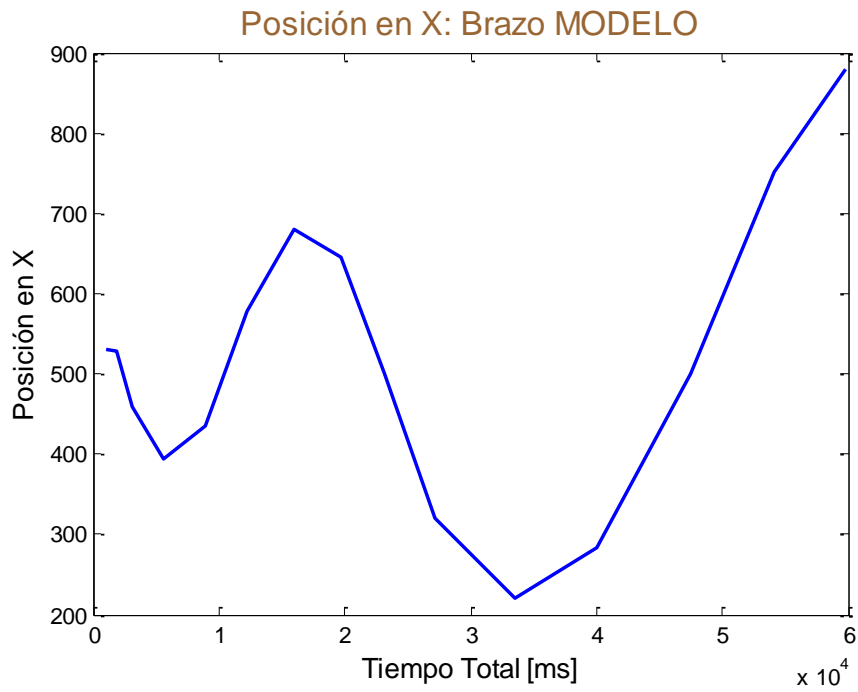


Figura 61. Comportamiento en 'X' Brazo modelo

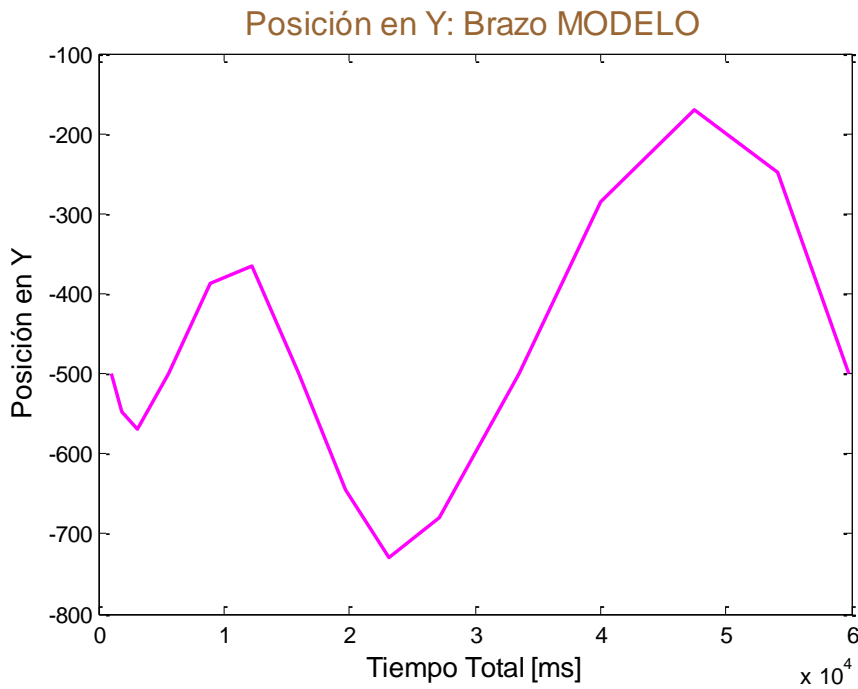


Figura 62. Comportamiento en 'Y' Brazo modelo

VIII) EXPERIMENTACIÓN CON EL SISTEMA MECATRÓNICO

1. Realización del Experimento Preliminar con Sujetos Sanos

Para la ejecución del experimento se tomaron en consideración los siguientes elementos:

a) Objetivo del estudio

Verificar el correcto funcionamiento y adquisición de datos del sistema mecatrónico desarrollado para la rehabilitación.

b) Criterios de inclusión

- Estar clínicamente sano.

c) Criterios de exclusión

- Tener lesionado el brazo.

d) Criterios de eliminación

- Adquirir algún tipo de lesión que provoque dolor al usuario durante la realización del ejercicio.
- Participantes que deseen abandonar el estudio por algún motivo.

e) Realización de la convocatoria

Inicialmente se realizará una convocatoria en la Facultad de Estudios Superiores Plantel Aragón, en donde se les invitará a los estudiantes a formar parte del estudio preliminar.

f) Entrega de documentación

A cada una de las personas que cumplan con los criterios descritos anteriormente se les dará la invitación para participar en el estudio. Es necesario informar a los participantes acerca de los fundamentos del estudio y su objetivo a alcanzar, así como los derechos con los que cuenta, si se le dará alguna compensación por su participación, y los beneficios y riesgos que el estudio podría implicar. Es por esta razón que se hará entrega de un documento a cada participante que contenga la información descrita anteriormente. Además, se le responderán todas las dudas que pudiera tener al respecto antes de proceder a obtener el consentimiento por escrito de la participación, el cual se dará mediante la firma de la Carta de Consentimiento Informado para Participar en una Investigación, la cual puede consultarse en el [Apéndice D](#).

Por otro lado, si el participante deseara retirarse del estudio en cualquier momento del transcurso del mismo, podrá hacerlo sin ninguna consecuencia negativa.

g) Realización de la entrevista

En cuanto se obtenga el consentimiento del participante, como parte del estudio se solicitará a cada uno de los voluntarios responder un cuestionario con la finalidad de conocer información que pudiera ser relevante para el estudio. El cuestionario aplicado se puede consultar en el **Apéndice E**.

h) Instrucciones

A cada participante se le explicará la manera en que se realizarán las pruebas, así como se resolverán todas las dudas referentes a su ejecución que pudieran surgirle.

Es importante resaltar que la realización de la prueba consistirá en una sola sesión compuesta de dos partes. Primeramente, se realizará el recorrido de la espiral con el brazo izquierdo, y después, al concluir satisfactoriamente dicha trayectoria, se procederá a realizarse el recorrido con el brazo derecho. Para ambos casos el participante tendrá la oportunidad de acomodarse en una posición cómoda y de probar brevemente la manipulación del brazo antes de realizar los recorridos que serán registrados.

Parte de las instrucciones del funcionamiento del sistema que deben explicarse a los voluntarios se encuentran descritas en el siguiente apartado, es por ello que el aplicador debe conocerlas antes de aplicar las pruebas a los participantes.

2. Configuración Física del Experimento

Para la realización del experimento se requiere tener una persona auxiliar o aplicador de la prueba que indique al usuario la posición adecuada para realizar el ejercicio, la cual será de pie frente al mecanismo, o bien, si el usuario es incapaz de mantenerse de pie durante un tiempo prolongado se le requerirá sentarse de tal manera que la silla o el asiento utilizado no le sea un impedimento para el movimiento completo del brazo ni le provoque incomodidad al momento de seguir con la vista la pantalla. De ser necesario, la persona que auxilie al usuario deberá cambiar de posición la pantalla de visualización de tal manera que no represente un obstáculo para la realización del ejercicio, y facilite al usuario el cumplimiento de la trayectoria.

Para la ubicación del mecanismo se recomienda que la base del mismo se encuentre a la altura del plano del codo de la extremidad que se desea realice el ejercicio de la espiral, de tal manera que se asegure que se trabajará en dicho plano. Además, el mecanismo se deberá colocar en una posición inicial antes de iniciar el programa del juego, la cual consiste en la extensión completa en el plano de su base con dirección al lado derecho del voluntario. En la imagen siguiente puede verificarse dicha posición inicial.

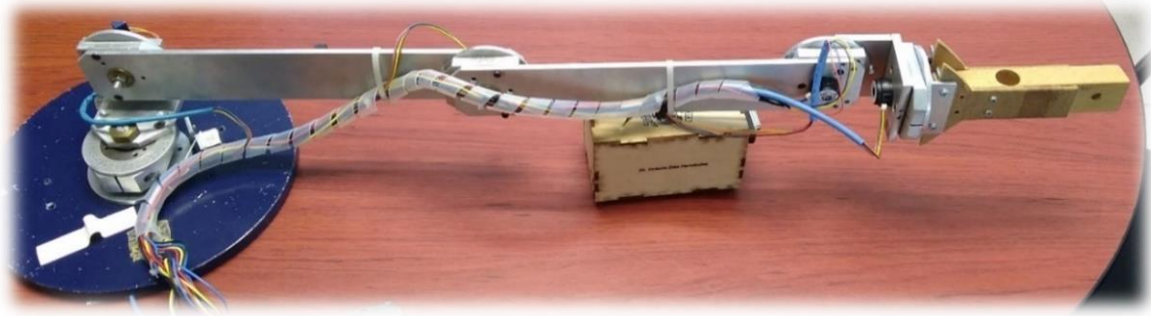


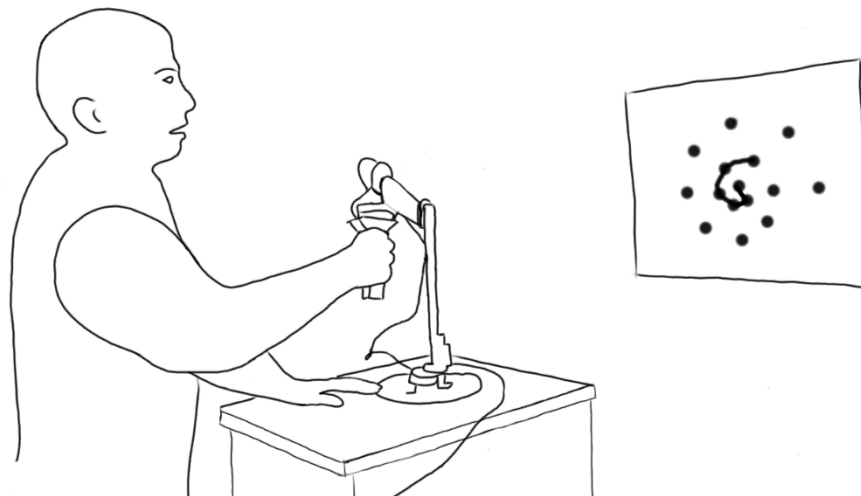
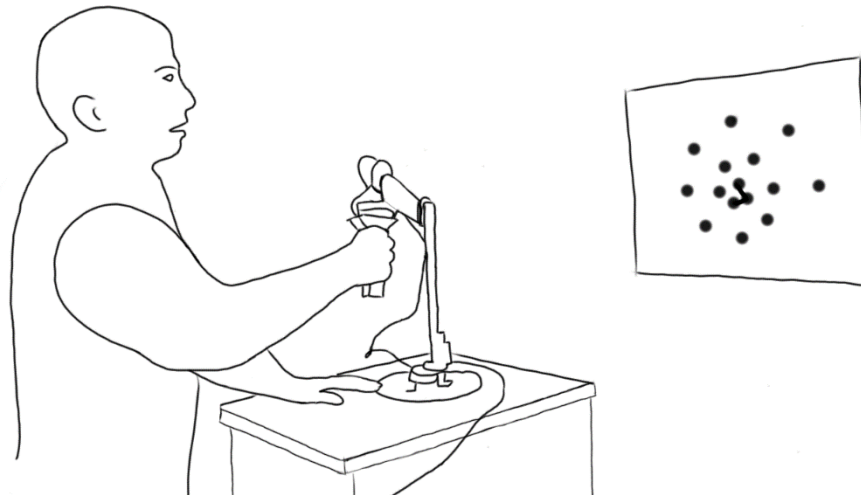
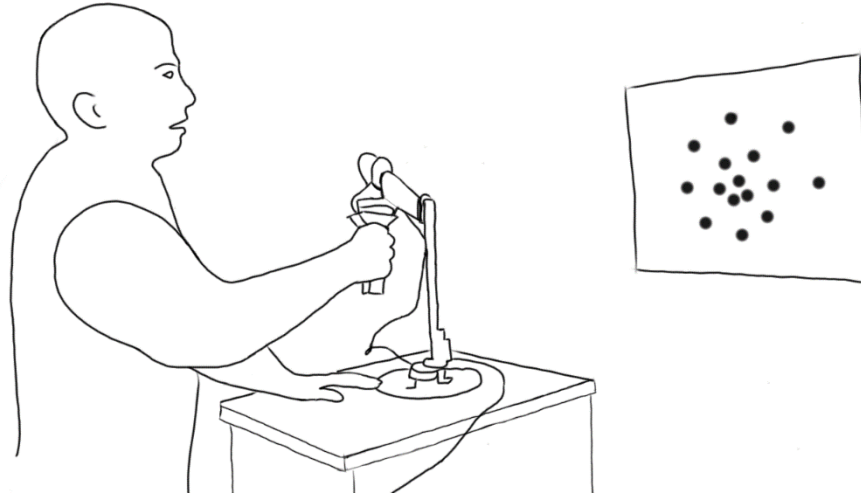
Figura 63. Posición inicial del mecanismo

Para conectar el brazo robótico con la interfaz de usuario se debe conectar el conector de cable DB con la caja que contiene el Arduino, y este a su vez, mediante el uso de un cable USB se deberá conectar a la computadora donde se tenga el programa del juego.



Figura 64. Conexión del mecanismo al Arduino DUE y a la computadora

A continuación, se muestra un esquema de la posición del usuario sugerida para la realización del ejercicio, así como el recorrido que se espera completar.



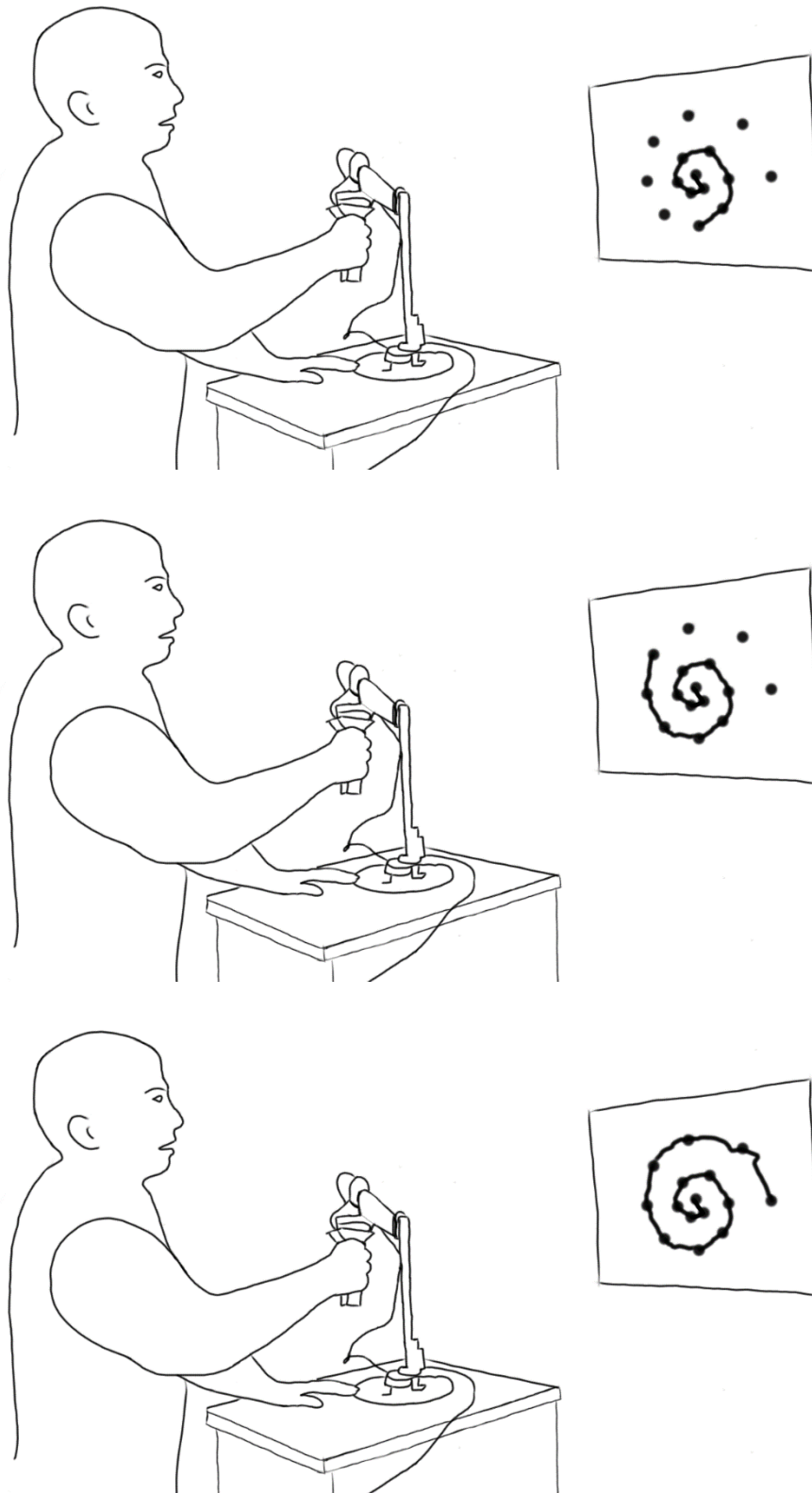


Figura 65. Esquema del usuario realizando el ejercicio. Elaboración propia

3. Configuración de los Componentes Informáticos

a) Programación del Arduino DUE

Para poder realizar la lectura de los datos recibidos por los encoders es necesario programar el Arduino DUE. Para ello se debe abrir el programa del Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino y en el menú herramientas seleccionar en Placa la opción Arduino DUE (Programming Port). Posteriormente, en el mismo menú Herramientas se debe seleccionar en Puerto el número de puerto COM que le fue asignado por la computadora al conectarlo.

Una vez configurados la placa y el puerto, se procederá a verificar el programa, y al compilarse exitosamente se deberá dar la opción de subir hasta que indique que fue subido a la placa de manera correcta.

Este proceso solo debe realizarse una vez si no se pretende modificar la programación del Arduino DUE para otros fines, de ser así, se requerirá realizarlo cada vez que se utilice.

b) Ejecución del programa en Processing

Para ejecutar el programa del juego se debe abrir el archivo con terminación “.pde”, que en este caso se llama Espiral_Brazo, el cual contiene las instrucciones del programa del juego. Instantáneamente se abrirá una pantalla donde se debe seleccionar la opción de ejecutar el programa, cuyo símbolo consiste en una flecha. Esta acción abrirá la aplicación del juego mostrando la primera pantalla de juego. Es importante recordar que antes de ejecutar el programa se debe tener el mecanismo en la posición de inicio anteriormente descrita.

4. Realización del Ejercicio por el Usuario

Una vez que se siguieron las configuraciones físicas y se ejecutó el programa, la primera pantalla del juego mostrará la espiral que se desea seguir, así como las instrucciones pertinentes para comenzar.

Durante la visualización de esta primera pantalla el usuario debe calibrar la posición del brazo robótico en el centro de la espiral, esto para comenzar el recorrido desde dicho punto. Esto lo realizará tomando con la mano el efector final del mecanismo y moviéndolo en el plano de la base del mismo.

En cuanto el usuario se encuentre localizado en la posición esperada, debe avisar al aplicador para que éste presione la barra espaciadora y con ello de inicio el juego.

La primera pantalla del juego es la ilustrada en la página siguiente.

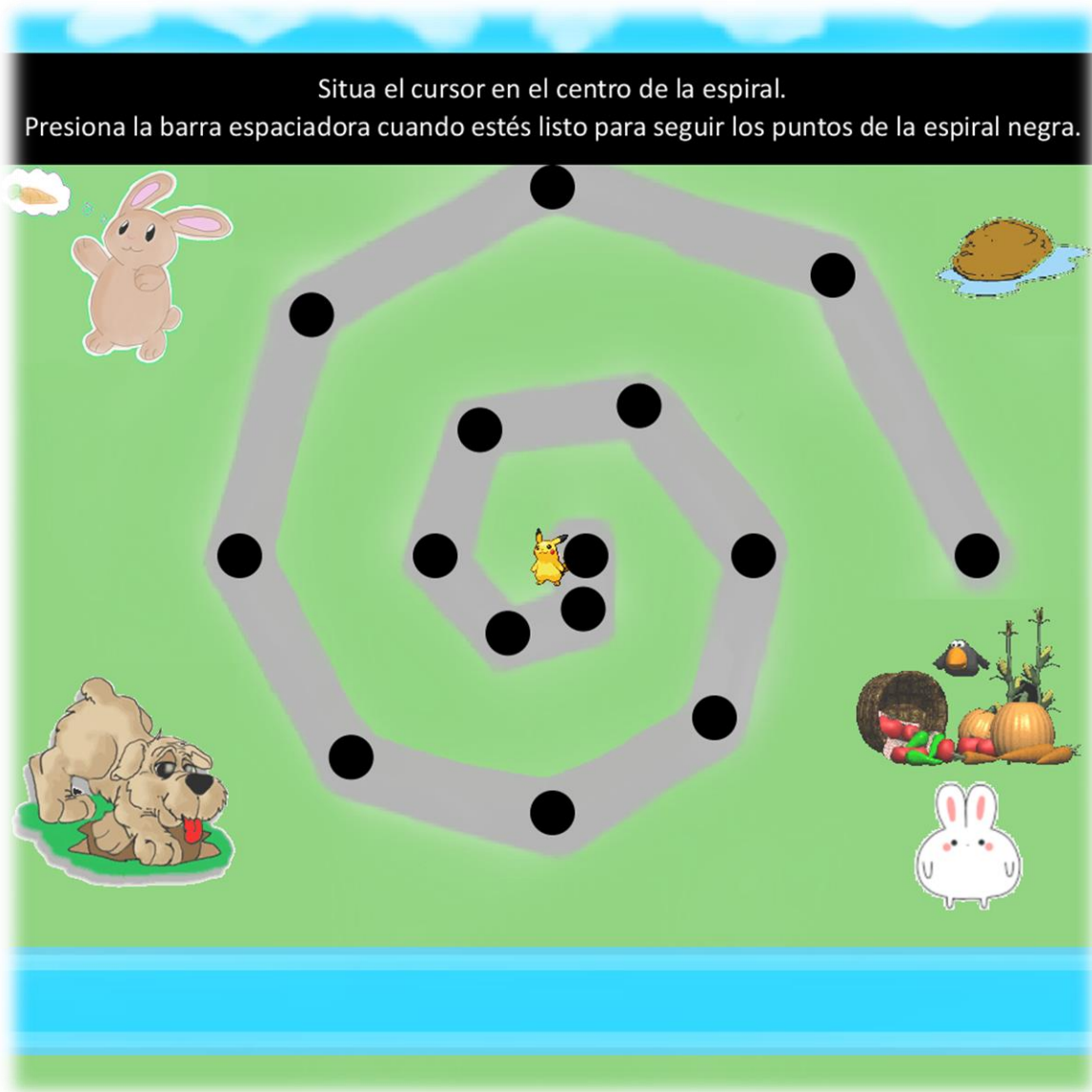


Figura 66. Primera pantalla del juego

En cuanto el aplicador presione la barra espaciadora se pasará a la pantalla principal del juego en donde se realiza el seguimiento de la espiral, de tal manera que el usuario debe ir activando cada uno de los objetivos (puntos de la espiral) siguiendo el camino trazado mediante la manipulación del mecanismo con el brazo.

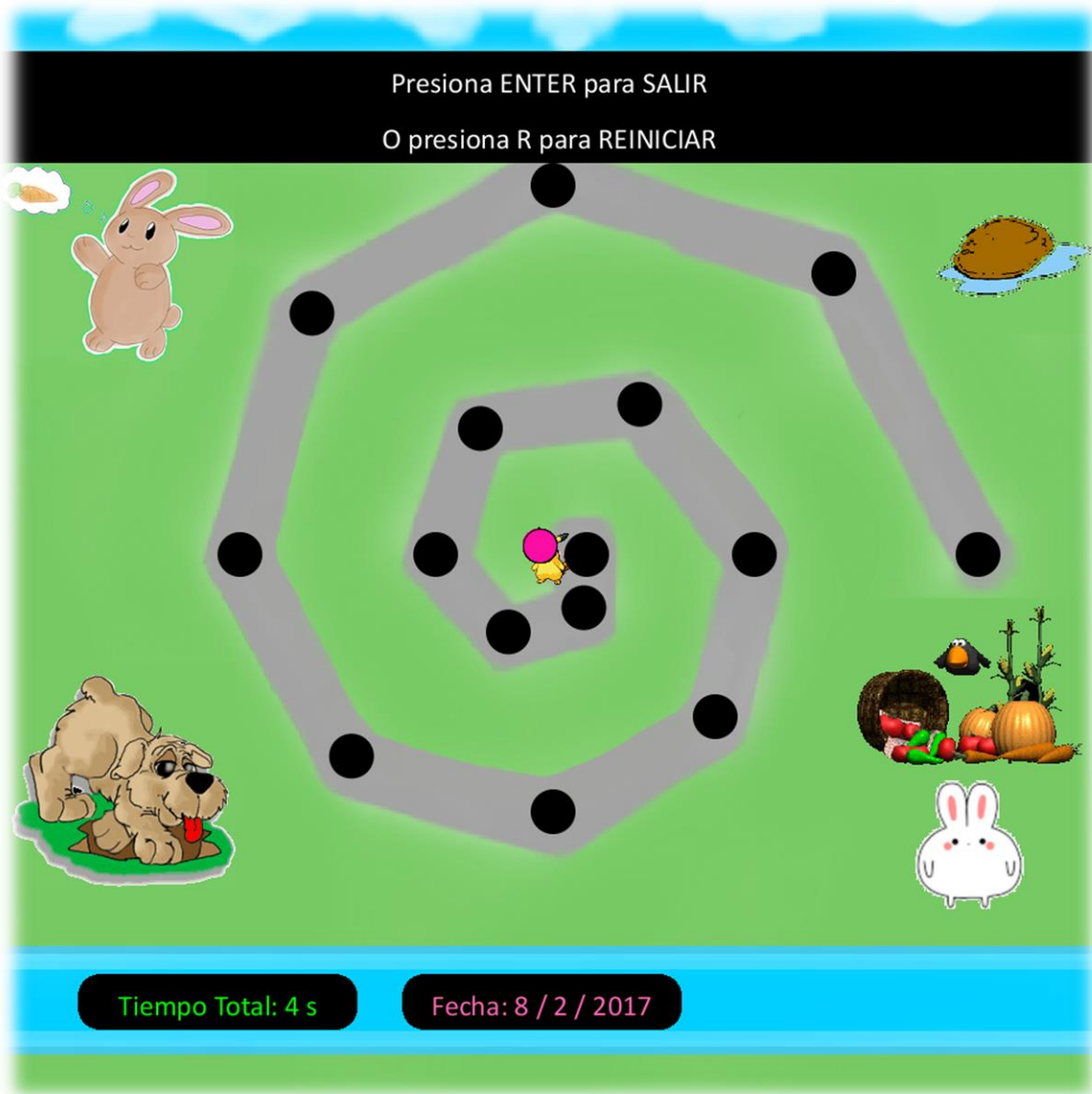


Figura 67. Pantalla principal del juego

Durante la realización del recorrido de la espiral, el usuario podrá ir observando el camino que ha ido siguiendo y su progreso alcanzando los objetivos, así como el tiempo que tardó en alcanzar el último objetivo alcanzado y el tiempo total transcurrido en tiempo real.

Además, el usuario también podrá observar la fecha de realización de su prueba.

La imagen que se muestra a continuación ejemplifica lo descrito anteriormente.



Figura 68. Recorrido de la espiral activando los objetivos

Una vez que se alcance el último objetivo el juego automáticamente procederá a cambiar a la pantalla de término. En la pantalla de término el usuario podrá salir de su sesión indicándole al aplicador que así lo desea, así el aplicador deberá presionar la tecla "S". Por otro lado, si el usuario desea realizar nuevamente la prueba, ya sea a modo de entrenamiento o por algún inconveniente durante la realización, le podrá indicar al aplicador la opción de reintentar, para lo cual el aplicador presionará la tecla "R" que inmediatamente lo regresará a la pantalla de inicio del juego.



Figura 69. Pantalla de término

Por otro lado, si durante la ejecución del juego el usuario decide abandonarlo deberá solicitarle al aplicador presionar la tecla “ENTER”, que inmediatamente cambiará a la pantalla de término sin completar el ejercicio, que desplegará un mensaje al usuario y dará la opción de salir de la sesión o de reintentar el ejercicio. A continuación, se muestra dicha pantalla.



Figura 70. Pantalla de término sin completar el ejercicio

Con la salida del juego automáticamente se guardarán los datos obtenidos durante la prueba en un archivo de texto cuyo nombre podrá modificarse añadiendo números para evitar sobrescribir.

Finalmente, el usuario podrá dejar de manipular el mecanismo y retirarse si así lo desea, ya que ha concluido su prueba.

5. Procesamiento de Datos

Una vez finalizado el ejercicio se procede a realizar el análisis de los datos obtenidos del mismo, para lo cual se empleará de manera auxiliar el programa MATLAB, mediante el cual se obtendrán diferentes gráficas para realizar la interpretación de los datos recabados.

Es importante mencionar que, en este caso del experimento preliminar, el programa fue diseñado de tal manera que pudiera graficar las dos trayectorias obtenidas por la sesión de cada participante, es decir que, para graficar será necesario consultar el archivo de texto con la información del brazo izquierdo, y el archivo con la información del brazo derecho. Así pues, se podrá realizar la comparación entre el recorrido realizado por el brazo izquierdo y el recorrido realizado por el brazo derecho.

Para darle mayor objetividad a la comparación del desempeño de ambos brazos durante la realización del ejercicio, se dividió la espiral en los catorce segmentos que se muestran en la figura siguiente.

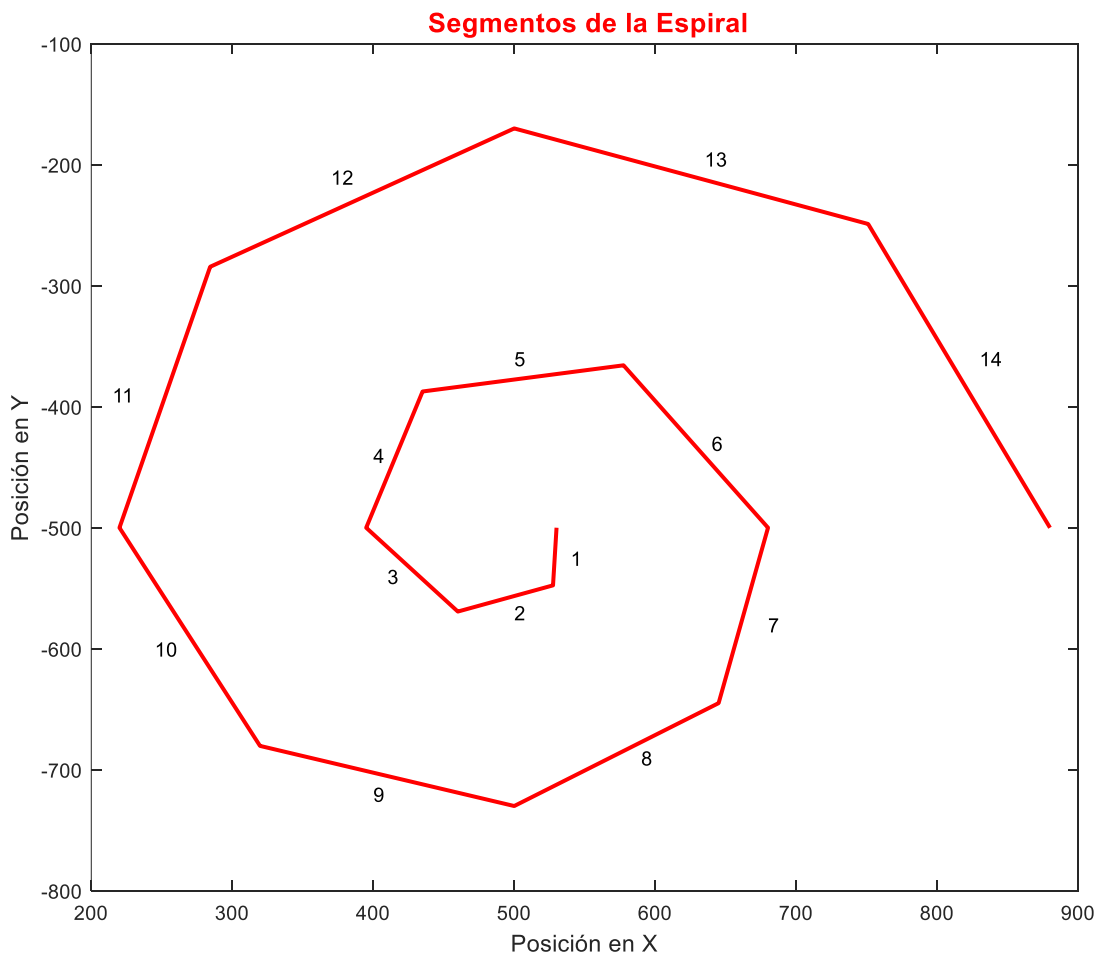


Figura 71. Segmentos de la espiral

El análisis que se aplicó requirió el cálculo de las distancias de alejamiento de cada uno de los puntos de la espiral trazada por el usuario con referencia al trazo de la espiral original.

El primer paso para realizar dicho cálculo consistió en obtener las ecuaciones individuales de las catorce rectas que forman la espiral. Esto se realizó empleando la ecuación de la recta que pasa por dos puntos¹:

$$y = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) + y_0 \quad \text{si } x_0 \neq x_1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 1}$$

La ecuación 1 se empleó para obtener el total de catorce rectas que componen la espiral completa a partir de las coordenadas de los quince puntos objetivos de la espiral que los voluntarios debían completar. Los puntos objetivo son los que se muestran en la figura siguiente.

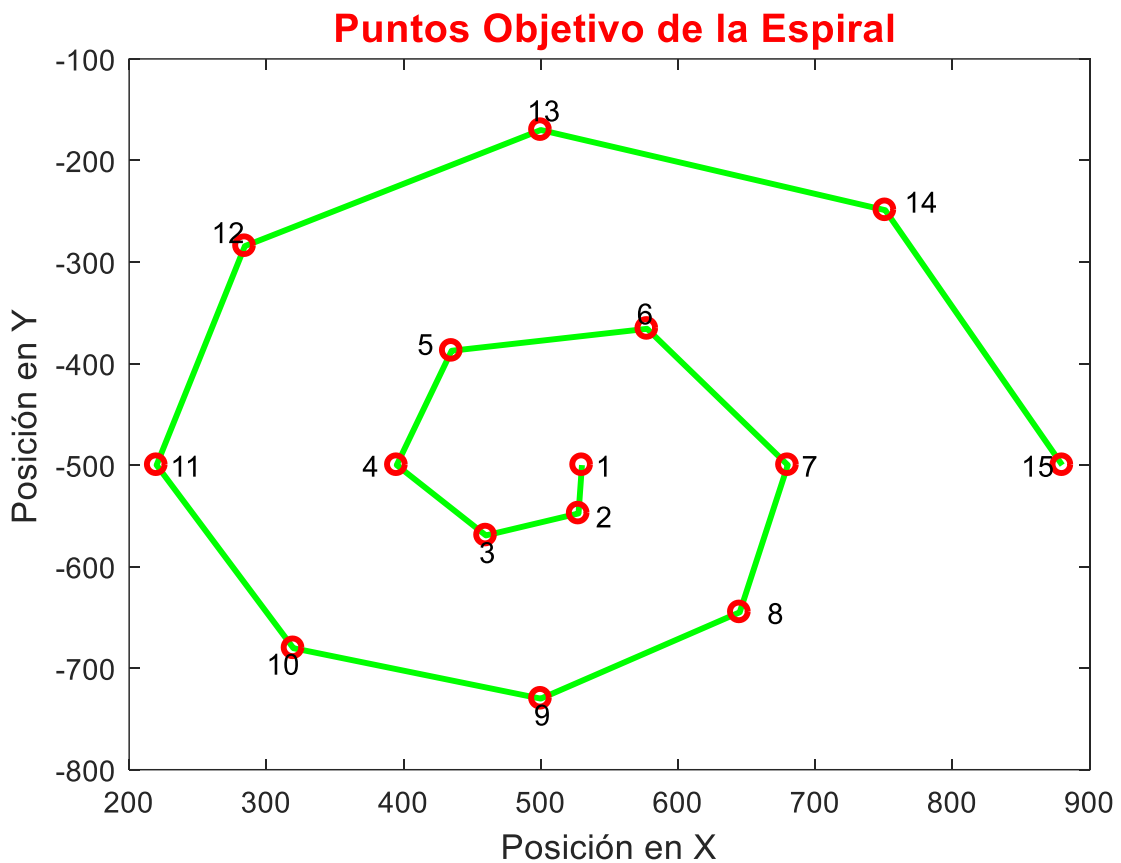


Figura 72. Puntos objetivo de la espiral

¹ Universidad Nacional de San Luis. (s.f.). *Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales*. Recuperado el 2 de Junio de 2017, de Ecuación de la recta que pasa por dos puntos: <http://webfcfmyun.unsl.edu.ar/wp-content/uploads/2012/05/cap6+prac-parte2.pdf>

Posteriormente, para realizar el cálculo de la distancia entre el trazo del voluntario y la espiral original se consideró que dicho trazo es una sucesión de puntos con coordenadas en los ejes “X” y “Y”, por lo que se utilizó la fórmula para la distancia no dirigida de una recta a un punto dado, donde la distancia “d” de un punto $P_1(x_1, y_1)$ a una recta cuya ecuación está dada por $L: Ax + By + C = 0$; se obtiene mediante la ecuación²:

$$d = \frac{|Ax_1 + By_1 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad \dots \quad \text{Ecuación 2}$$

Dado que las rectas obtenidas con la ecuación 1 son de la forma $y = mx + b$, fue necesario obtener su forma general realizando un despeje de la siguiente manera:

$$mx - y + b = 0$$

Así pues, sustituyendo en la ecuación 2 tenemos que:

$$d = \frac{|mx_1 + (-1)y_1 + b|}{\sqrt{m^2 + (-1)^2}} \quad \rightarrow \quad d = \frac{|mx_1 - y_1 + b|}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad \dots \quad \text{Ecuación 3}$$

Sin embargo, para realizar la comparación por segmentos fue necesario identificar las sucesiones de puntos que corresponden a cada uno de los segmentos de la espiral modelo. En aras de realizar esta distinción, se tomó como base una de las características de la programación del ejercicio, la cual no permite concluir de manera satisfactoria la sesión si no han sido marcados los objetivos de la espiral en el orden correcto, es por ello por lo que utiliza un indicador de objetivos alcanzados por el voluntario cuyo valor también es registrado en el archivo de texto.

La lectura del indicador de los objetivos alcanzados nos asegura que los puntos trazados por el voluntario con un determinado valor de punto objetivo de la espiral corresponden al trazo del segmento de recta inmediato al punto objetivo en cuestión. Es decir, si el indicador del objetivo alcanzado tiene el valor de 13 significa que, el punto registrado corresponde al trazo del segmento número trece de la espiral, el cual se encuentra definido por la recta que atraviesa los puntos objetivo números 13 y 14 (véase la figura 73).

Finalmente, se realizó el cálculo del promedio de todos los valores correspondientes a cada segmento de la espiral, obteniendo 14 promedios diferentes por espiral. Estos promedios corresponden a los errores absolutos dado que el valor esperado es el de cero.

En el **Apéndice C** se puede consultar el código del programa de análisis de los datos.

² Bravo Febres, J. (s.f.). *Sector matemática*. Recuperado el 2 de Junio de 2017, de Ecuaciones de la Recta en el Plano Cartesiano: <http://www.sectormatematica.cl/media/NM2/ECUACIONES%20DE%20LA%20RECTA%20EN%20EL%20PLANO%20CARTESIANO.pdf>

IX) RESULTADOS

A partir de la información obtenida con la realización de las pruebas preliminares, se pudo realizar la comparación entre las pruebas realizadas con ambos brazos, de tal manera que se puede observar el desempeño de cada brazo de un mismo voluntario. Es importante mencionar que, de acuerdo con la información recabada mediante la encuesta aplicada, *todos los participantes presentaron dominancia en el brazo derecho*.

En las siguientes imágenes se pueden observar las gráficas obtenidas de la realización del ejercicio por cuatro de los voluntarios. Para facilitar su identificación e interpretación, fueron clasificadas en diferentes apartados que incluyen el mismo tipo de gráfica, así como la interpretación propuesta.

1. Trazo de la Espiral Brazos Izquierdo y Derecho

En este apartado se muestran las gráficas correspondientes al trazo de la espiral con el brazo izquierdo y el derecho.

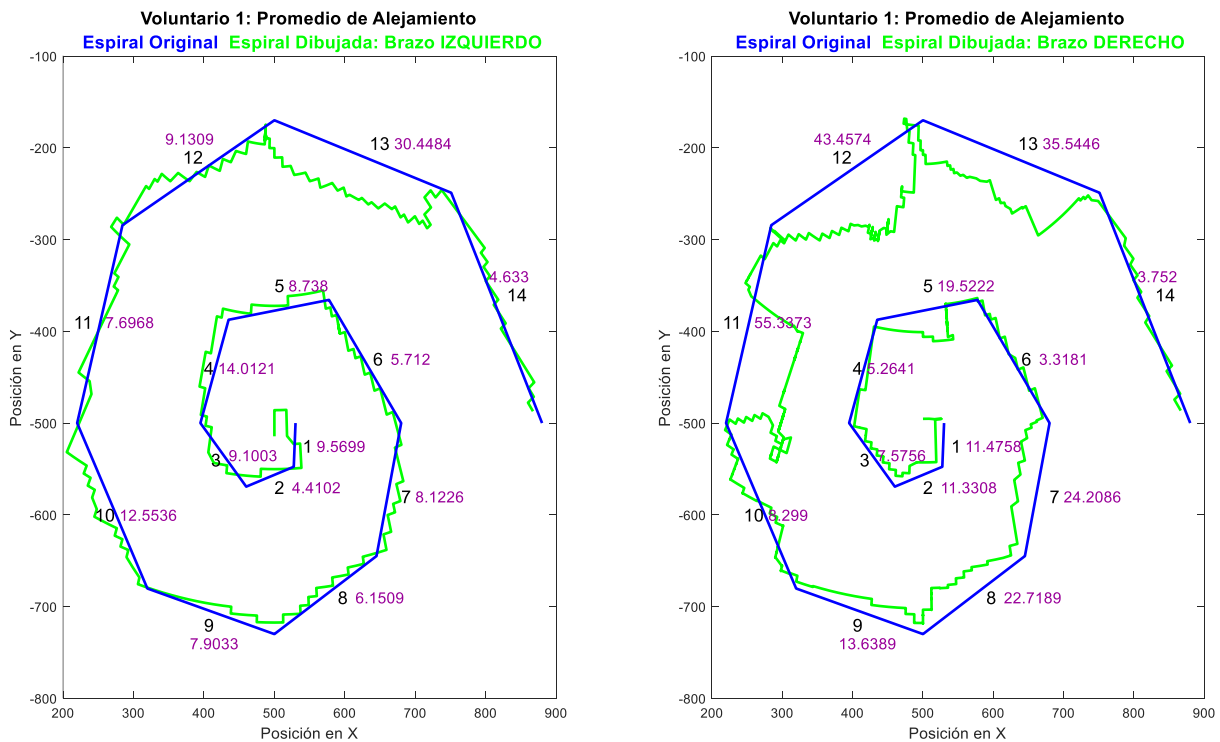


Figura 73. Espirales trazadas por el voluntario 1

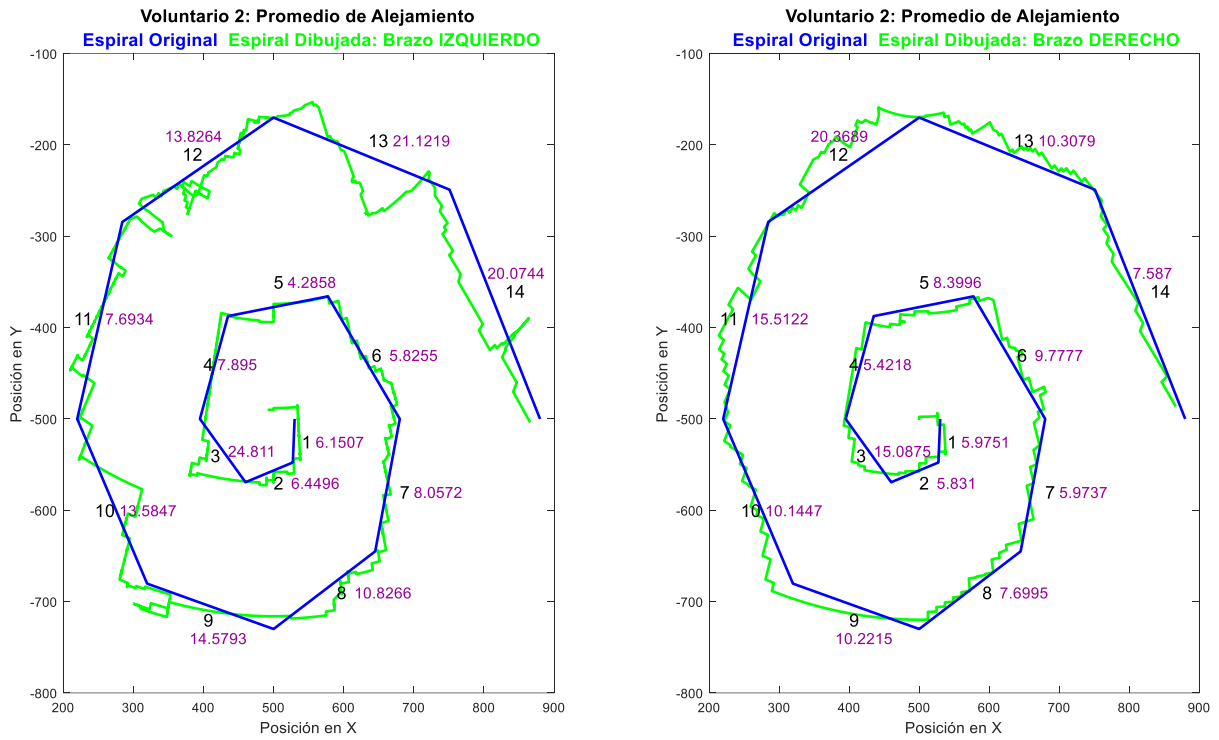


Figura 74. Espirales trazadas por el voluntario 2

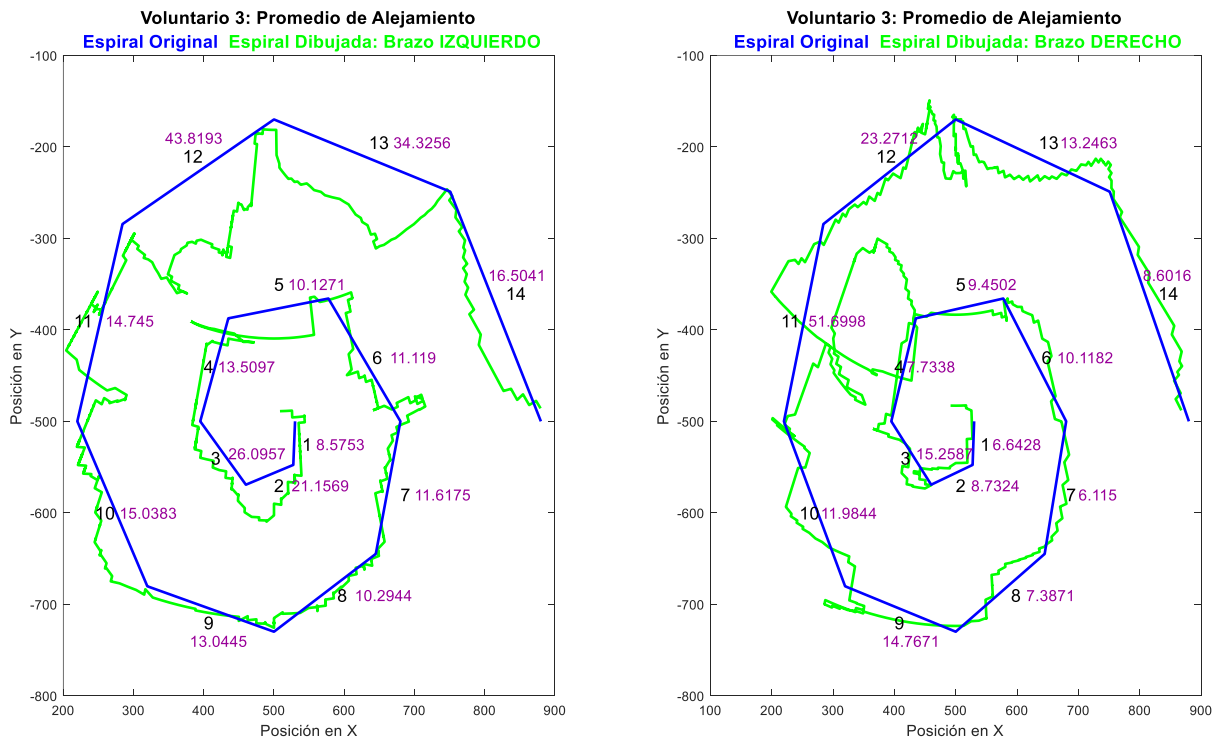


Figura 75. Espirales trazadas por el voluntario 3

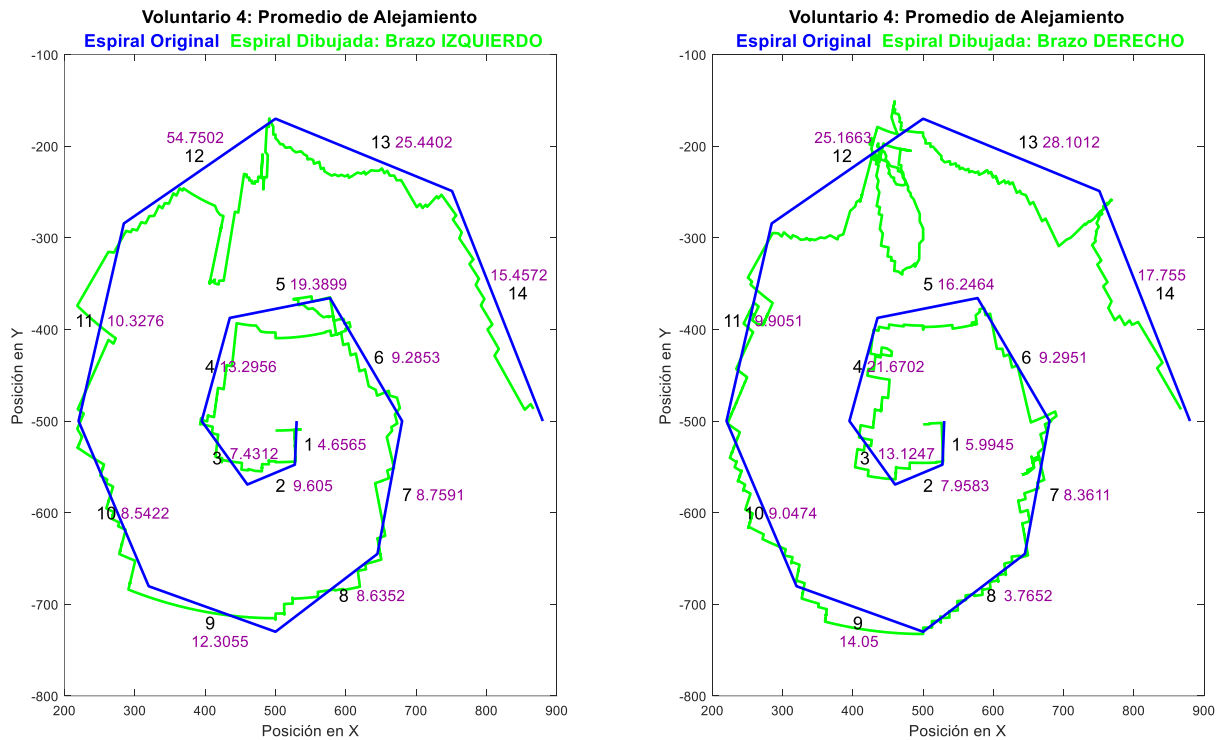


Figura 76. Espirales trazadas por el voluntario 4

Se debe mencionar que solamente se realizó una iteración del trazo de la espiral por brazo, iniciando con el brazo derecho. Esto es importante de considerar dado que la realización del ejercicio con el brazo derecho fue la primera interacción que tuvieron los voluntarios con el sistema, por lo que, al no estar familiarizados con el mecanismo, el seguimiento de la espiral pudo resultar ser más complicado.

Por otro lado, al realizar el ejercicio con el brazo izquierdo los voluntarios tenían un poco más de práctica y, por lo tanto, mayor conocimiento de las limitaciones de movimiento del mecanismo, así como de los segmentos de la espiral en que se pueden presentar más dificultades.

A partir de la observación de estas gráficas se puede realizar una simple comparación de los trazos de las trayectorias realizadas por el voluntario con ambos brazos y la espiral original.

Entre las características de los trazos se destaca notoriamente una dificultad para seguir los segmentos 12 y 13 de la parte superior de la espiral, lo cual se ve reflejado en grandes alejamientos del trazo original. Esto se puede corroborar al observar que para el brazo izquierdo en el segmento 12 se tiene un rango de error absoluto de entre 9 y 54, y de entre 21 y 34 para el segmento 13; mientras que para el brazo derecho segmento 12 de entre 20 y 43, y para el segmento 13 de entre 10 y 35. Esto

significa que el **segmento 12** es el que representó tener mayor dificultad, ya que se tuvo menor precisión durante su trazo con un error aproximado de **29.22**, mientras que el trazo del **segmento 13** (el cual seguiría en dificultad) obtuvo un error promedio de **24.81**. Seguidos por el **segmento 11** situado del lado izquierdo de la espiral con un error aproximado de **21.61**.

Estos promedios hacen contraste con los promedios de los **segmentos 1 y 6**, los cuales tuvieron mayor precisión que los demás segmentos con un error aproximado de **7.38** y **8.05** respectivamente.

Estas diferencias entre errores pueden atribuirse a fallas mecánicas, ya que se pudo notar que durante el trazo de los segmentos 12 y 13 el mecanismo presentaba algunas dificultades para la realización del ejercicio.

Para facilitar la observación de estas diferencias se realizó una tabla que incluye los errores de cada voluntario por segmento de la espiral, así como los promedios generales por voluntario, por segmento y para cada uno de los brazos.

Tabla 3. Promedios de error calculados

Segmento	BRAZO IZQUIERDO					AMBOS BRAZOS	Promedio segmento	BRAZO DERECHO			
	Error Voluntario 1	Error Voluntario 2	Error Voluntario 3	Error Voluntario 4	Promedio segmento			Error Voluntario 1	Error Voluntario 2	Error Voluntario 3	Error Voluntario 4
1	9.5699	6.1507	8.5753	4.6565	7.2381	7.38008	7.52205	11.4758	5.9751	6.6428	5.9945
2	4.4102	6.4496	21.1569	9.605	10.4054	9.43428	8.46313	11.3308	5.831	8.7324	7.9583
3	9.1003	24.811	26.0957	7.4312	16.8596	14.8106	12.7616	7.5756	15.0875	15.2587	13.1247
4	14.0121	7.895	13.5097	13.2956	12.1781	11.1003	10.0225	5.2641	5.4218	7.7338	21.6702
5	8.738	4.2858	10.1271	19.3899	10.6352	12.0199	13.4046	19.5222	8.3996	9.4502	16.2464
6	5.712	5.8255	11.119	9.2853	7.98545	8.05636	8.12728	3.3181	9.7777	10.1182	9.2951
7	8.1226	8.0572	11.6175	8.7591	9.1391	10.1519	11.1646	24.2086	5.9737	6.115	8.3611
8	6.1509	10.8266	10.2944	8.6352	8.97678	9.68473	10.3927	22.7189	7.6995	7.3871	3.7652
9	7.9033	14.5793	13.0445	12.3055	11.9582	12.5638	13.1694	13.6389	10.2215	14.7671	14.05
10	12.5536	13.5847	15.0383	8.5422	12.4297	11.1493	9.86888	8.299	10.1447	11.9844	9.0474
11	7.6968	7.6934	14.745	10.3276	10.1157	21.6147	33.1136	55.3373	15.5122	51.6998	9.9051
12	9.1309	13.8264	43.8193	54.7502	30.3817	29.2238	28.066	43.4574	20.3689	23.2712	25.1663
13	30.4484	21.1219	34.3256	25.4402	27.834	24.817	21.8	35.5446	10.3079	13.2463	28.1012
14	4.633	20.0744	16.5041	15.4572	14.1672	11.7955	9.4239	3.752	7.587	8.6016	17.755
General	9.87014	11.7987	17.8552	14.8486	13.5932	13.843	14.0929	18.9602	9.87915	13.9292	13.6029

Además, realizando la comparación de los promedios entre los errores calculados para el brazo izquierdo y el derecho se encontró que, en general, el brazo izquierdo resultó ser más preciso en los segmentos 1, 5, 6, 7, 8, 9 y 11; mientras que el derecho fue más preciso en los segmentos 2, 3, 4, 10, 12, 13 y 14.

2. Tiempo en Alcanzar los Objetivos

Las siguientes imágenes representan el tiempo que tardó cada participante en llegar a cada uno de los objetivos de la espiral con ambos brazos.

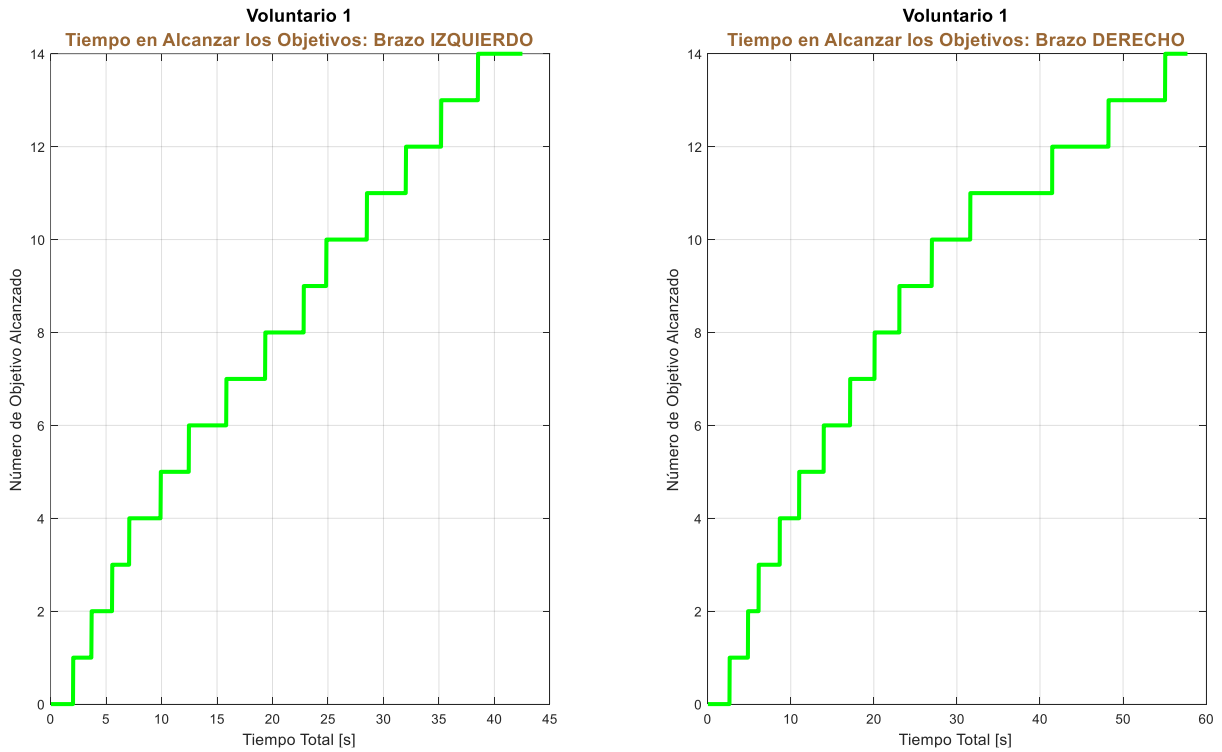


Figura 77. Tiempo en alcanzar los objetivos del voluntario 1

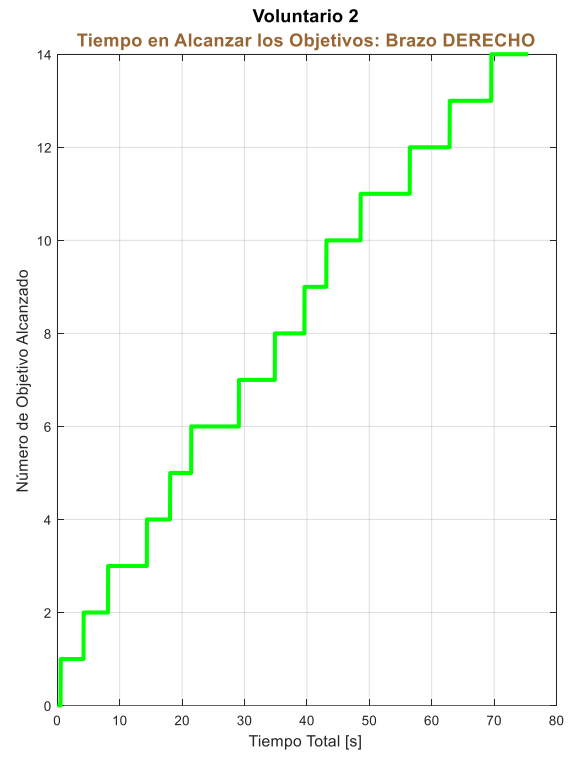
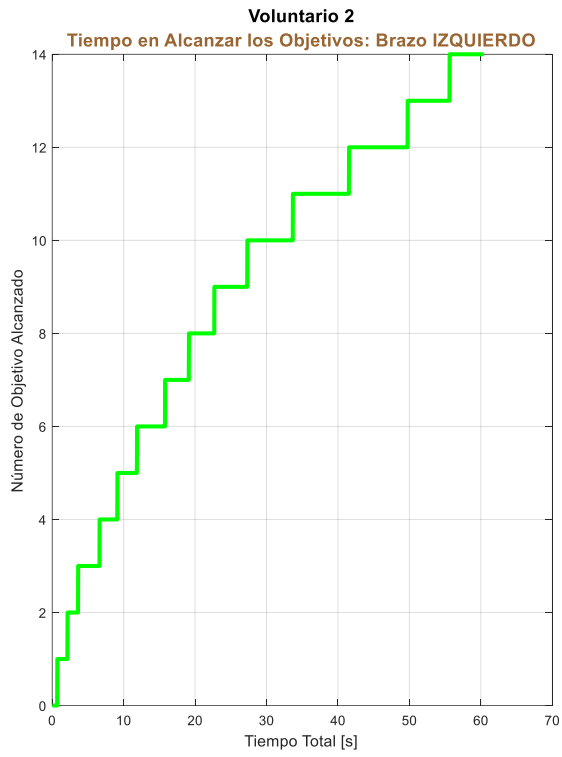


Figura 78. Tiempo en alcanzar los objetivos del voluntario 2

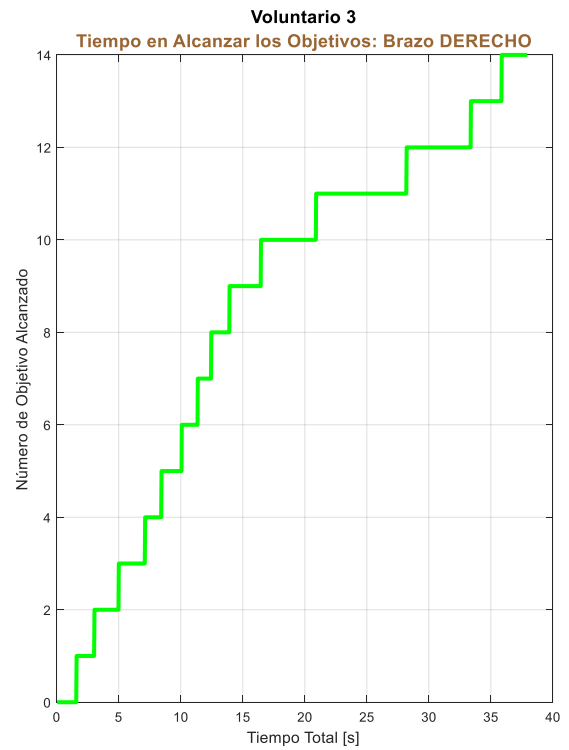
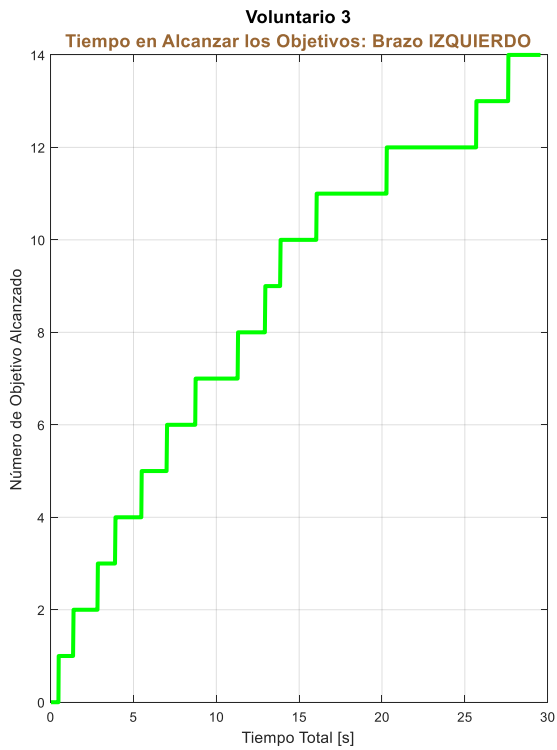


Figura 79. Tiempo en alcanzar los objetivos del voluntario 3

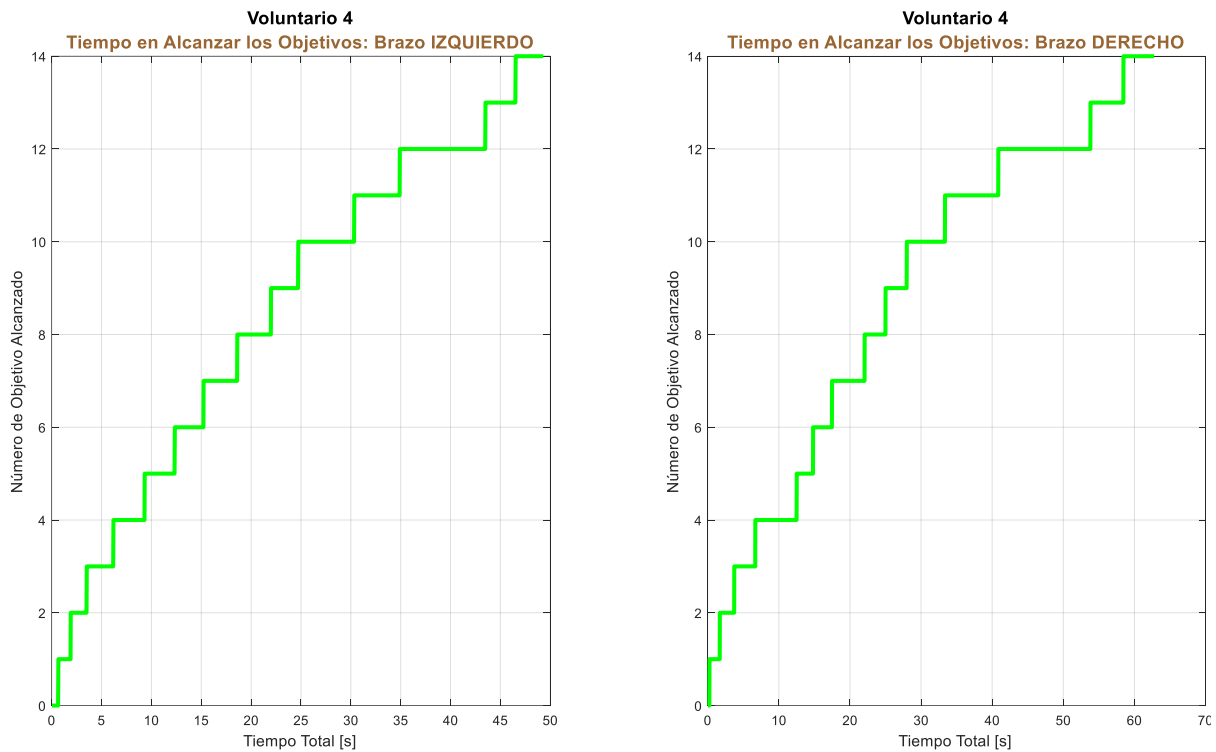


Figura 80. Tiempo en alcanzar los objetivos del voluntario 4

De las gráficas anteriores, en general, para el caso del brazo izquierdo se puede describir que los voluntarios tardaron un menor tiempo en alcanzar los primeros objetivos del 1 al 8, los cuales fueron alcanzados en menos de 20 segundos. Además, los últimos objetivos a partir del 9 tardaron en ser completados entre 15 y 30 segundos dependiendo del participante. Además, el promedio general del tiempo en completar la trayectoria con el brazo izquierdo es de **45.452 segundos**.

Por otro lado, para la realización del ejercicio con el brazo derecho se puede describir el mismo comportamiento en donde la primera mitad de los objetivos (del 1 al 8) se completa en un menor tiempo que la segunda mitad, siendo los primeros completados en promedio en 22.375 segundos. Mientras que, los últimos objetivos (a partir del 9) tardan en ser completados entre 25 y 40 segundos dependiendo del participante. Finalmente, el promedio general del tiempo en completar la trayectoria con el brazo derecho es de **58.482 segundos**.

Estos resultados sugieren que los voluntarios dedicaron un mayor tiempo al trazo de la espiral con el brazo derecho, esto podría deberse a que fue su primera interacción con el sistema.

3. Comportamiento Posición en 'X'

Entre estos resultados se incluyen las gráficas del comportamiento en las coordenadas 'X' obtenidas de las pruebas completadas con ambos brazos de los voluntarios.

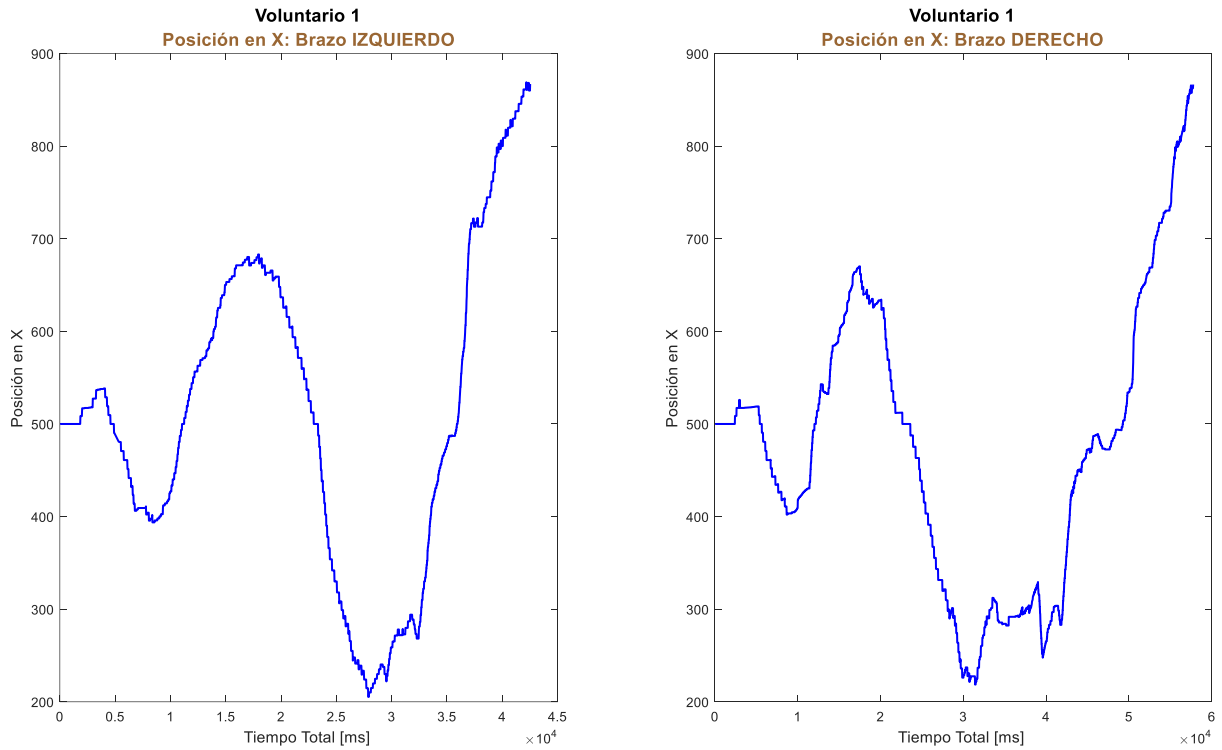


Figura 81. Comportamiento en 'X' del voluntario 1

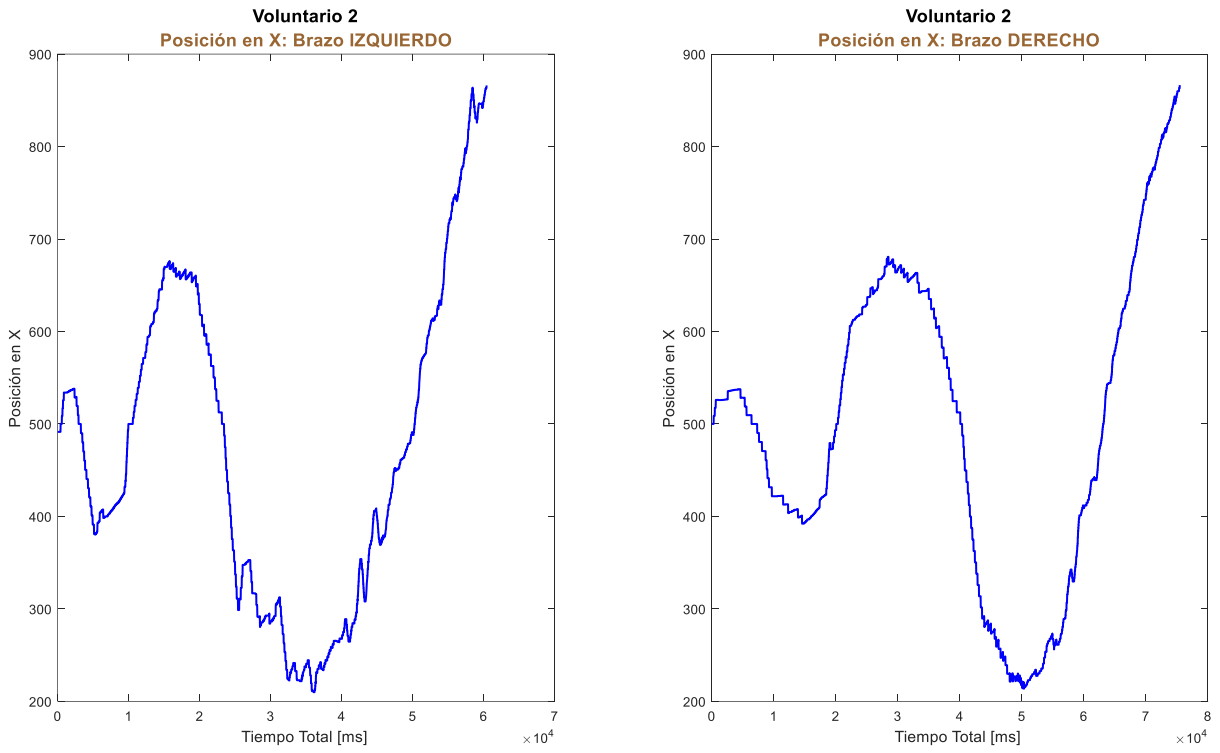


Figura 82. Comportamiento en 'X' del voluntario 2

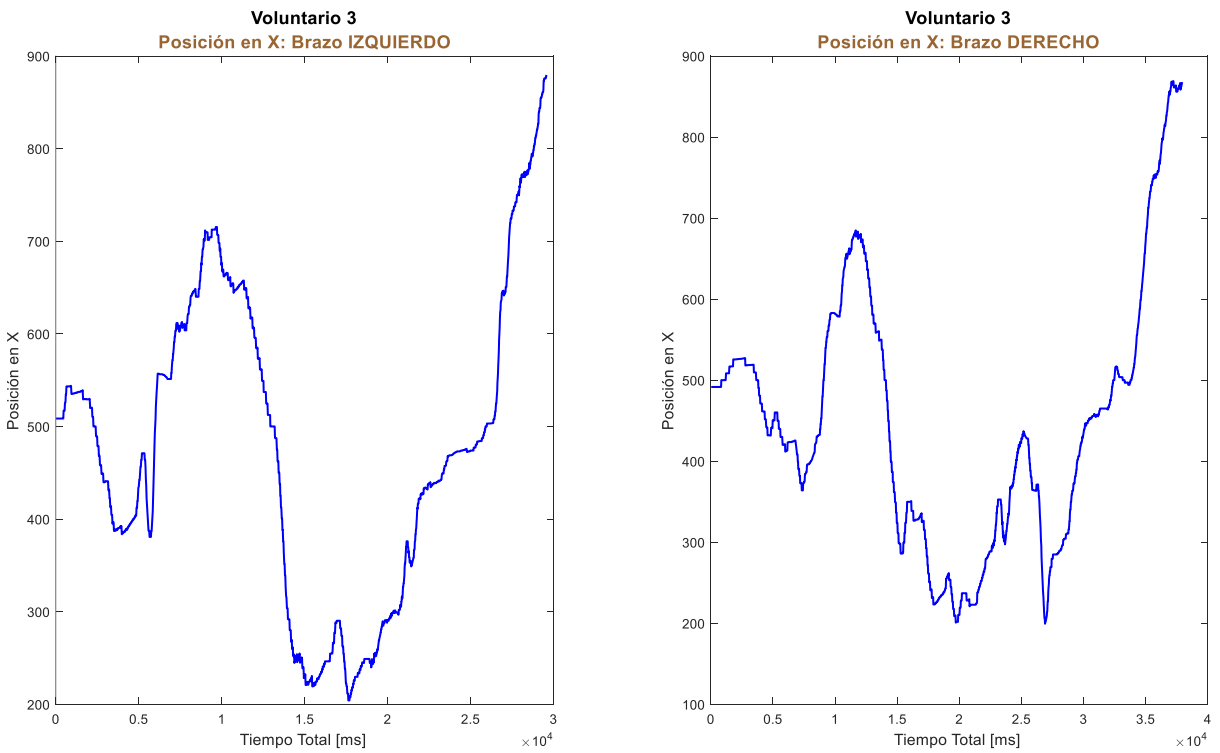


Figura 83. Comportamiento en 'X' del voluntario 3

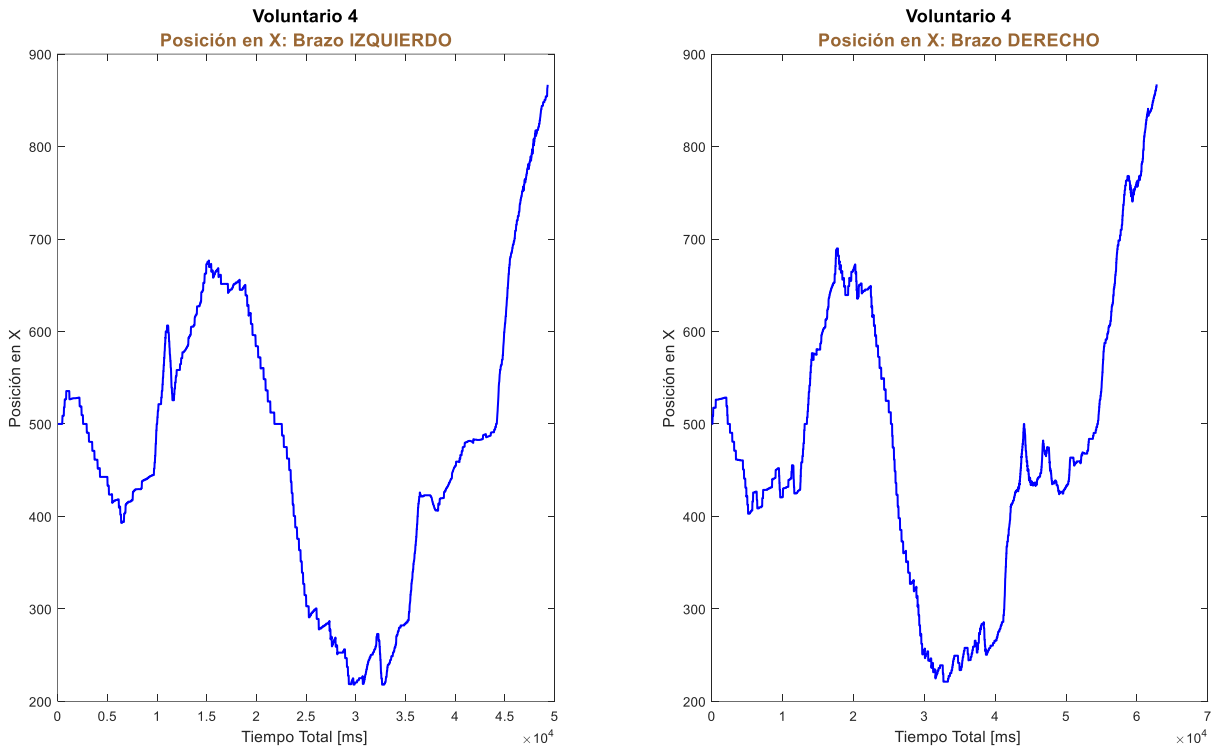


Figura 84. Comportamiento en 'X' del voluntario 4

Tras observar las gráficas anteriores de la posición del brazo en las coordenadas en 'X', se puede destacar que existe un mayor alejamiento del comportamiento modelo de la *Figura 61* en los valores más pequeños de 'X' obtenidos tanto con el trazo realizado por el brazo izquierdo, como con el trazo del brazo derecho.

Esto sugiere que hubo mayores dificultades durante el trazo del lado izquierdo de la espiral en comparación con las que hubo para el trazo del lado derecho de la misma. Además, esto también se ve reflejado en el tiempo, donde en general, el trazo con el lado derecho tomó más tiempo en dichas zonas que el trazo con el lado izquierdo.

4. Comportamiento Posición en 'Y'

Con referencia al comportamiento en las coordenadas 'Y' del trazo de la espiral con ambos brazos de los participantes, se obtuvieron las siguientes gráficas.

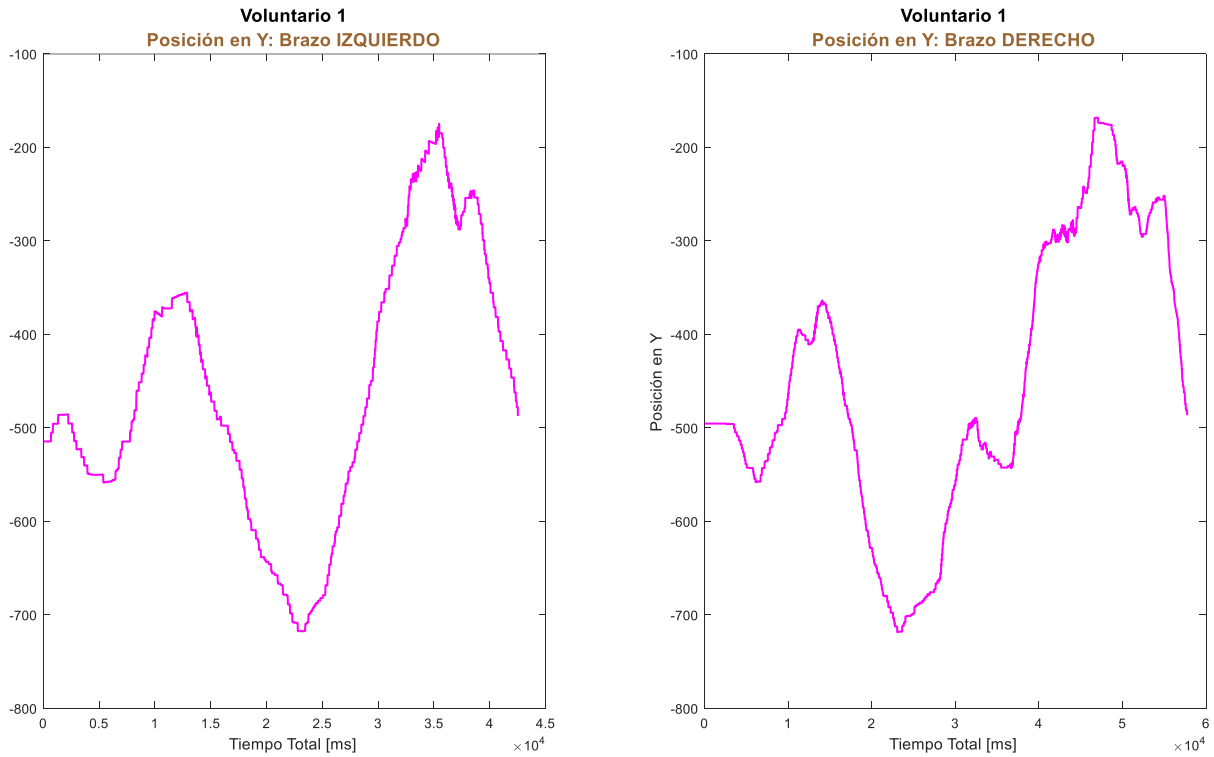


Figura 85. Comportamiento en 'Y' del voluntario 1

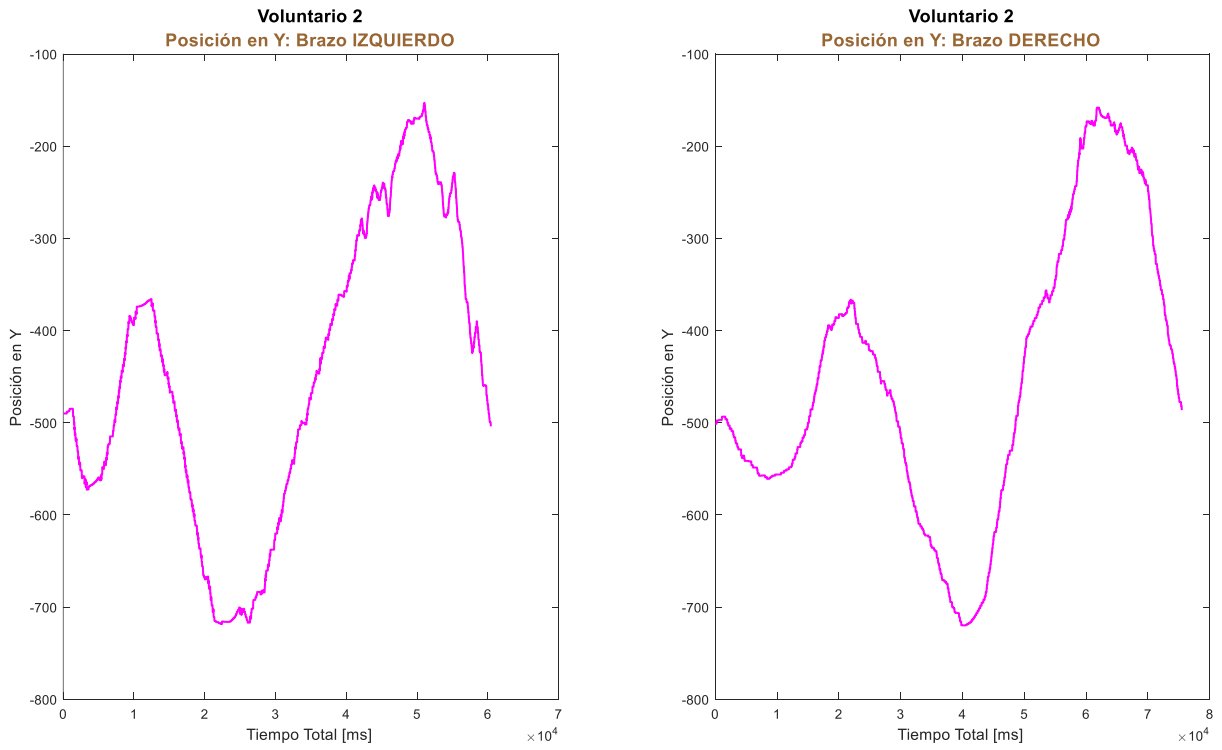


Figura 86. Comportamiento en 'Y' del voluntario 2

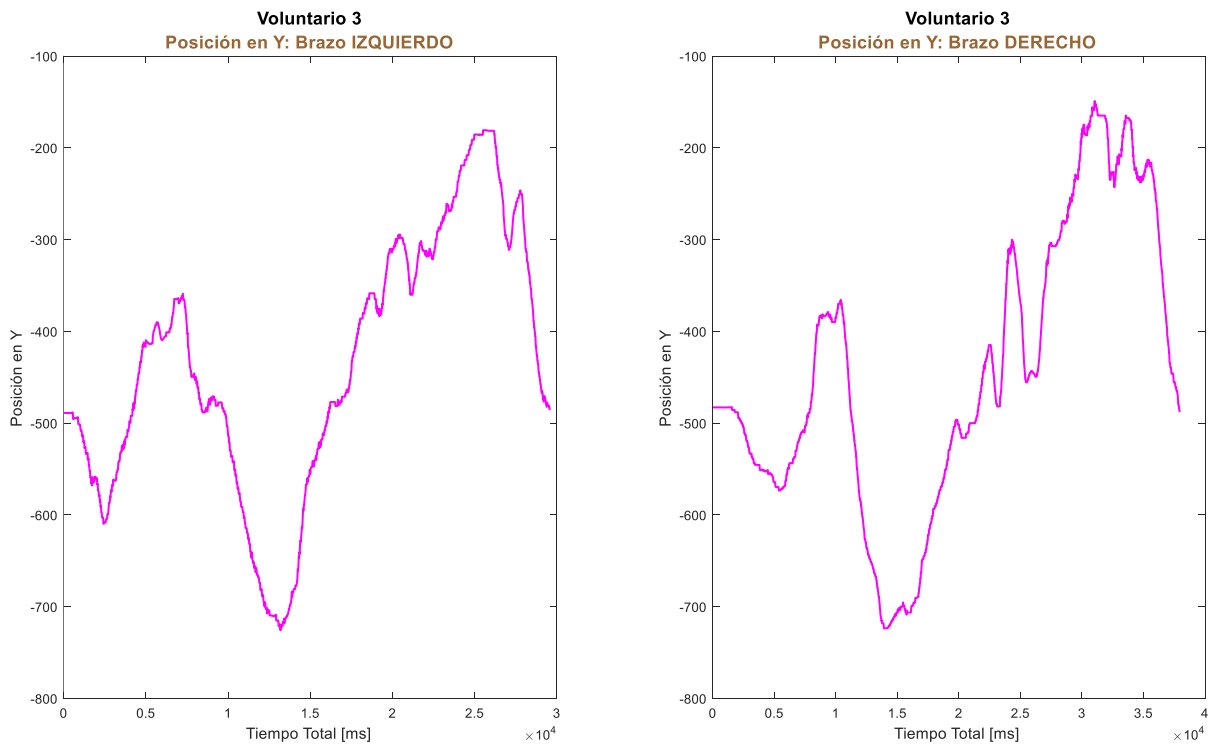


Figura 87. Comportamiento en 'Y' del voluntario 3

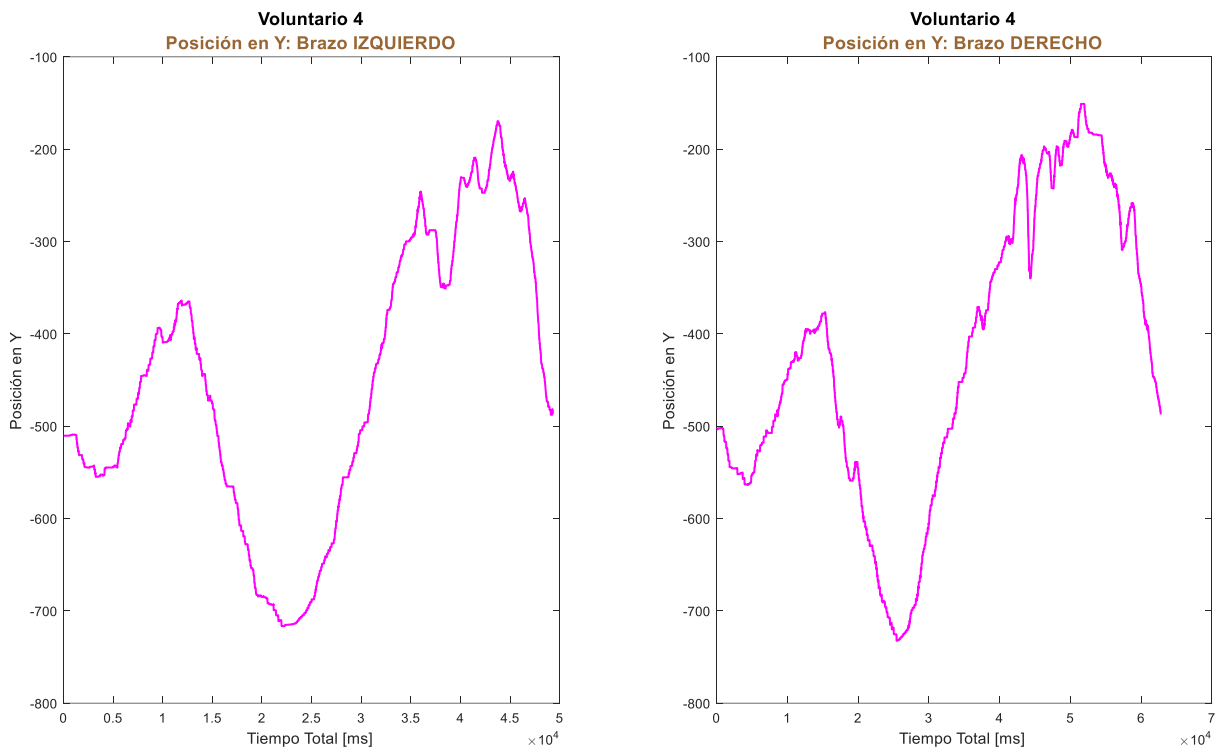


Figura 88. Comportamiento en 'Y' del voluntario 4

Basados en las gráficas anteriores de la posición obtenida de la manipulación del mecanismo en las coordenadas en 'Y', se puede destacar que al realizar el trazo con el brazo izquierdo existe un mayor alejamiento del comportamiento modelo de la *Figura 62* en los valores superiores de 'Y' obtenidos.

Además, en general se observa una dificultad para realizar el trazo de la parte superior de la espiral, es por ello que los voluntarios tomaron más tiempo para completar dichos recorridos, tardando aún más tiempo con el brazo derecho que con el izquierdo.

X) CONCLUSIONES

En la realización de este proyecto se cumplió de manera satisfactoria con el objetivo principal del mismo, ya que se logró la implementación conjunta de los elementos mecánicos como el mecanismo a manipular, el uso de elementos electrónicos tales como los sensores para definir la posición del mecanismo y una tarjeta de desarrollo para la lectura de las señales; así como el uso de elementos informáticos como fue la programación de la interfaz de usuario para interpretar la información recopilada y permitir la interacción con los usuarios. A partir de ello se pudo comprobar que el uso y trabajo conjunto de estos elementos permite el cumplimiento de una tarea particular que, en este caso, consistió en la realización de una herramienta de apoyo en la rehabilitación activa de pacientes con discapacidad neuromotora de brazo tras padecer un Accidente Cerebrovascular.

Para validar el cumplimiento del objetivo general del proyecto se comenzó por realizar la propuesta de un ejercicio de coordinación neuromotora para que el paciente que se rehabilite pueda llevar a cabo. Esta propuesta se basó en un ejercicio encontrado en la literatura del seguimiento de una espiral, la cual fue modificada y programada como parte de la interfaz del juego, cumpliendo con uno de los objetivos particulares del proyecto.

A partir del diseño y programación del ejercicio se realizó un estudio preliminar con sujetos sanos que consistió en la aplicación del mismo a diferentes voluntarios. De la realización de este estudio preliminar se obtuvieron como resultado diferentes gráficas de la información recopilada para cada uno de los participantes. La obtención de estas gráficas por sí mismas logró el cumplimiento de otro de los objetivos particulares del proyecto, el cual se conformó de dos partes principales: la interfaz del juego y la obtención de las gráficas. En lo que a la interfaz se refiere, a manera de un juego se logró la interacción del usuario mediante la manipulación de un mecanismo con los datos mostrados en pantalla, los cuales fueron almacenados de manera exitosa en un documento de texto disponible para su consulta posterior para la realización de las gráficas.

Dado que el objetivo principal del estudio preliminar consistió en verificar el correcto funcionamiento y adquisición de datos del sistema mecatrónico desarrollado, fue necesario plantear la realización del ejercicio con ambos brazos para identificar las posibles diferencias entre comportamientos de los trazos realizados con el brazo izquierdo y con el brazo derecho. En general, y considerando que todos los participantes presentaron dominancia del brazo derecho, con el análisis de los resultados se encontró que el desempeño del brazo izquierdo resultó tener ligeramente una mayor precisión durante la realización del trazo de la espiral, presentando un menor alejamiento de la misma con un error promedio de 13.59, por lo que se puede interpretar que los movimientos realizados con el brazo izquierdo son ligeramente más precisos o coordinados que los realizados con el brazo derecho, el cual obtuvo un promedio de 14.09.

Además, también se pudo observar una diferencia importante en los tiempos de realización del ejercicio completo, obteniendo un tiempo promedio total para el brazo izquierdo de **45.452 segundos**, mientras que, para el brazo derecho se obtuvo un tiempo promedio total de **58.482 segundos**, por lo que se puede deducir que, a pesar de tenerse prácticamente la misma precisión con ambos brazos, el tiempo total de realización del ejercicio es mayor con el brazo derecho al obtenido con el brazo izquierdo. Sin embargo, es necesario considerar otros factores como el hecho de que el trazo de la espiral con el brazo derecho fue la primera interacción de los voluntarios con el sistema, por lo que el reconocimiento de sus limitaciones pudo influir en una mayor fluidez del posterior trazo de la espiral con el brazo izquierdo. Es por esto que, de desearse tener unos resultados con validez para diferenciar la precisión de ambos brazos, sería necesario repetir el estudio controlando otras variables como la primera interacción con el sistema, o incluyendo entre los voluntarios personas zurdas, características que podrían considerarse para una investigación futura.

La recopilación de toda esta información puede dar paso a la realización de una comparación entre diferentes sesiones de realización del ejercicio por un paciente, las cuales podrían ser definidas de tal manera que permitan la obtención de una idea general del progreso del paciente a lo largo de su rehabilitación. Para ello se puede profundizar más en el análisis de la forma de los trazos y la distancia a la que se localizan de la espiral original, así como del tiempo total en que se completó el ejercicio, lo cual permitirá observar de manera gradual el progreso en la capacidad para realizar este tipo de movimiento de manera más precisa, es decir, que se esperaría tener una menor distancia de la espiral trazada a la espiral objetivo. Además, se espera notar una reducción de tiempo entre el paso de un objetivo a otro, y por consiguiente, la reducción del tiempo total de la realización del ejercicio. Por lo que esta propuesta de ejercicio cumple con el último de los objetivos particulares: la posibilidad de auxiliar a los pacientes con discapacidad neuromotora a recuperar la capacidad de mover el brazo de manera coordinada.

Ahora bien, es importante considerar que durante la realización de las pruebas se encontraron algunas limitaciones mecánicas al momento de mover el mecanismo, lo cual se ve reflejado de forma notoria en las gráficas obtenidas, ya que se puede observar que en la parte superior de la espiral los trazos correspondientes a los segmentos 12 y 13 presentan un mayor alejamiento o error, situación que coincide con los momentos en que el mecanismo presentaba las limitaciones. En este punto es importante notar que los errores son prácticamente el triple comparados con los de los otros segmentos, lo que sugiere notoriamente la atribución a un error sistemático.

Finalmente, se puede destacar la importancia de aplicar los conocimientos de la ingeniería mecatrónica en el desarrollo de diferentes elementos para la resolución de problemas de salud pública tan relevantes para nuestro país y el mundo como lo es el accidente cerebrovascular. Ya sea mediante el diseño de sistemas, dispositivos, herramientas o ayudas técnicas, la aplicación de la ingeniería en el campo de la salud resulta ser de gran apoyo para la sociedad, ya que el uso de estos elementos aumenta las posibilidades de la población de recibir atención médica de calidad y a un menor costo, mejorando con ello, nuestra calidad de vida.

XI) TRABAJO A FUTURO

Como parte de la retroalimentación obtenida de la realización del estudio preliminar, así como del análisis de los datos obtenidos del mismo, se encontró necesario mejorar los elementos mecánicos del sistema dado que presentaron algunas limitantes durante la ejecución de los ejercicios. Además, se desea mejorar el mecanismo de tal manera que permita implementar y controlar una fuerza que se oponga al movimiento generado por el usuario para aplicarse también para la rehabilitación activa-resistiva.

Por otro lado, se desean implementar nuevos y diferentes ejercicios que se ajusten a diferentes necesidades de los pacientes, por lo que también se ha propuesto trabajar con un modelo en tercera dimensión que permita realizar movimientos más definidos que podrían inclusive simular actividades cotidianas más específicas como comer o beber.

Se debe agregar que, dado que para la realización del presente trabajo se optó por aplicar el estudio a usuarios clínicamente sanos, y considerando que el objetivo de la investigación recae en apoyar al proceso de rehabilitación de pacientes tras haber sufrido un accidente cerebrovascular, se pretende realizar un estudio enfocado particularmente en esta sección de la población.

Para proceder de manera adecuada con la realización del nuevo estudio se realizó el planteamiento de un protocolo de investigación, el cual puede ser consultado con mayor detalle en el **Apéndice F**.

Como parte del protocolo planteado, a las personas que cumplan con los criterios de inclusión además de informarles los objetivos, fundamentos y riesgos del mismo, se les pedirá de manera formal su consentimiento para formar parte del grupo de estudio, por lo cual se requiere que firmen la *Carta de Consentimiento Informado para Participar en un Estudio de Ingeniería* que se puede consultar en el **Apéndice G**, y que, además, representa también la confidencialidad bidireccional necesaria para el cumplimiento del proyecto de investigación. Es importante mencionar que el voluntario también tendrá derecho de abandonar el estudio en cualquier momento de la investigación por las razones que considere adecuadas sin necesidad de exponerlas. Para realizar su salida del estudio, será necesario que firme la *Carta de Revocación del Consentimiento*, la cual puede ser consultada en el **Apéndice H**.

El diseño y escritura de los documentos anteriores, así como de los aplicados para este proyecto, fue realizado tomando como base la estructura de los formatos para protocolo de investigación y carta de consentimiento informado publicados por la Facultad de Medicina de la UNAM [77, 78].

Si un voluntario acepta participar, tras obtener su consentimiento se le entregará un cuestionario que se pedirá responda sinceramente con la finalidad de obtener mayor información referente a su

condición y datos personales. El cuestionario a aplicarse es el que se encuentra ejemplificado en el Apéndice I.

Una vez contestado el cuestionario el voluntario podrá comenzar la realización de sus pruebas para dar paso al estudio, las cuales se realizarán de la manera indicada por el protocolo anteriormente mencionado.

Finalmente, con la obtención de los recorridos completados por el voluntario, se tendrá una base de datos en donde se podrá consultar toda la información concerniente a su progreso, la cual podrá ser consultada con fines estadísticos durante y al final del estudio con el objetivo de obtener una valoración referida a la recuperación de la capacidad de movilidad del brazo del voluntario. Esta valoración permitirá determinar si el dispositivo diseñado es o no de utilidad para los pacientes que sufrieron un accidente cerebrovascular, así como su capacidad para adaptarse a las necesidades de los pacientes o de los médicos rehabilitadores.

XII) REFERENCIAS

- [1] E. M. Garzas Cejudo, *Accidentes Cerebrovasculares Qué, Cómo y Por qué*, 3 ed. Alcalá la Real: Formación Alcalá, 2006.
- [2] Instituto Mexicano del Seguro Social, "Vigilancia y Prevención Secundaria de la Enfermedad Vascular Cerebral en el Primer Nivel de Atención," ed. México: CENETEC, 2015.
- [3] E. D. B. Díez Tejedor, O.; Álvarez Sabín, J.; Muñoz, M.; Abiusi, G., "Clasificación de las enfermedades cerebrovasculares. Sociedad Iberoamericana de Enfermedades Cerebrovasculares," *Revista Médica de Neurología*, vol. 33 pp. 455-464, 2001.
- [4] M. Muñoz. (2015, Septiembre 20). *Accidentes cerebrovasculares*. Available: <http://acvudea.blogspot.mx/p/antes-un-breve-recuento.html>
- [5] N. C. Institute. (Abril). *Childhood Brain Stem Glioma Treatment (PDQ®)–Patient Version (Mayo 18, 2016 ed.)*. Available: <https://www.cancer.gov/types/brain/patient/child-glioma-treatment-pdq>
- [6] C. Valencia. (2015, Abril). *Neuropsicología: El Cerebro y la Conducta*. Available: <http://psicologiaclinicaunab.blogspot.mx/2015/10/hemisferios-cerebrales-y-personalidad.html>
- [7] N. A. Foundation. (Abril). *Ataxia y Atáxicos*. Available: <http://www.ataxia-y-ataxicos.es/YATX3.htm>
- [8] MedlinePlus. (2015, Abril). *Función del Tronco del Encéfalo*. Available: https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/18007.htm
- [9] Grupo de Trabajo de la Guía de Práctica Clínica para el Manejo de Pacientes con Ictus en Atención Primaria, *Guía de Práctica Clínica para el Manejo de Pacientes con Ictus en Atención Primaria. Plan de Calidad para el Sistema Nacional de Salud del Ministerio de Sanidad y Política Social* Unidad de Evaluación de Tecnologías Sanitarias de la Agencia Laín Entralgo de la Comunidad de Madrid, 2009.
- [10] LibrosOnline. (2014, Septiembre 5). *Funciones de las partes del cerebro*. Available: <http://www.youbioit.com/es/article/informacion-compartida/20969/funciones-de-las-partes-del-cerebro>
- [11] World Health Organization. (2017, Mayo). *The top 10 causes of death worldwide*. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/en/>
- [12] S. Association. (2017, State of the Nation Stroke statistics. 2017(Mayo)). Available: https://www.stroke.org.uk/sites/default/files/state_of_the_nation_2017_final_1.pdf
- [13] M. D. Morfín Balboa. (2014, Protocolo Asociación de las cifras de presión arterial con el pronóstico funcional en pacientes con enfermedad vascular cerebral aguda en el IMSS, UMAE N° 14, Veracruz, Veracruz.
- [14] Stroke Association. (2013, Stroke statistics).
- [15] I. M. G. Devesa Gutiérrez, María Elena; Baldomero Hernández Hernández, Miguel Ángel; Mancera Cruz, Héctor Antonio, "Rehabilitación del paciente con enfermedad vascular cerebral (EVC)," *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 26 pp. 94-108, 2014.
- [16] O. F. S. Castañeda Sánchez, Sergio; Aguilar Zepeda, Vianey, "Utilidad pronóstica de la escala neurológica para evaluación de la enfermedad vascular cerebral," *Med Int Mex*, vol. 27 pp. 343-348, 2011.
- [17] M. Parra Otárola, "Correlación clínico tomográfica entre la capacidad funcional y localización topográfica de la enfermedad vascular cerebral isquémica en pacientes del HNGAI de junio del 1999 a junio del 2001," Unidad de Post Grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2004.

- [18] D. P. Braga, "Ataque cerebrovascular: un estudio epidemiológico prospectivo en el Hospital de Clínicas de Montevideo," *Revista Cubana de Medicina Física y Rehabilitación*, 2001.
- [19] LibrosOnline. (2014, Abril). *Funciones de las Partes del Cerebro*. Available: <http://www.youbioit.com/es/article/informacion-compartida/20969/funciones-de-las-partes-del-cerebro>
- [20] Centre for Neuro Skills. (Septiembre 9). *Lóbulos parietales*. Available: <http://www.neuroskills.com/espanol/lobulos-parietales.php>
- [21] Organización Mundial de la Salud, "Comité de Expertos de la OMS en Rehabilitación Médica," Ginebra1969.
- [22] D. H. B. V. Sabater Hernández, Dra. Liliana; Toca Smith, Dra. Silvia, "Rehabilitación del ictus. Primera parte," *Revista Cubana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 7 pp. 84-95, 2015.
- [23] P. De Santiago, "Valoración neurológica tras sufrir un ICTUS y tratamiento de fisioterapia," ed: Fisiosite, 2016.
- [24] Á. Moyano Vera, "El accidente cerebrovascular desde la mirada del rehabilitador," *Revista Hospital Clínico Universidad de Chile*, vol. 21 2010.
- [25] A. A. R. Blanco Ortega, H.R.; Vela Valdés, L.G.; Vázquez Bautista, R.F., "Prototipo virtual de un rehabilitador de tobillo," IX Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca Morelos, México2011.
- [26] R. C. Tunja, "Enfermedad Cerebrovascular y su Rehabilitación," ed: Blogspot, 2016.
- [27] L. R. p. C. d. Tratamientos. (Abril). *Rehabilitación Domiciliaria*. Available: <http://www.parkinsonlaroda.com/web/index.php/servicios/rehabilitacion-a-domicilio>
- [28] L. Solano Trullenque, "Terapia Ocupacional en el Tratamiento Temprano del Daño Cerebral Adquirido," Grado en Terapia Ocupacional, Escuela de Ciencias de la Salud, Universidad de Zaragoza, 2012.
- [29] Profesionales del CRE de Daño Cerebral del IMSERSO, "Guía de Orientación en la Práctica Profesional de la Valoración Reglamentaria de la Situación de Dependencia en Personas con Daño Cerebral Adquirido," ed. España: Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad.
- [30] Á. Arias Cuadrado, "Rehabilitación del ACV: evaluación, pronóstico y tratamiento," *Galicia Clínica*, vol. 70 pp. 25-40, 2009.
- [31] Clínica Ruc, "Fisioterapia infantil," in *Fisioterapia Ruc*, ed, 2017.
- [32] T. Física. (Mayo). *FNP*. Available: <http://www.terapia-fisica.com/fnp.html>
- [33] M. Moreno, "Movimiento orientado a tareas," in *Diario de una terapeuta Ocupacional*, ed. Blogspot, 2013.
- [34] Hospital Nisa Valencia al Mar, "Recuperando la funcionalidad del miembro superior con la TMIR," in *Blog de Daño Cerebral*, ed: Hospitales NISA, 2015.
- [35] wikiHow. (Mayo). *Cómo hacer ejercicios de recuperación de un accidente cerebrovascular*. Available: <http://es.wikihow.com/hacer-ejercicios-de-recuperaci%C3%B3n-de-un-accidente-cerebrovascular>
- [36] H. Greuel, "¿Mejora la movilidad escapular con biofeedback EMG?," ed. *Shoulder: Anatomy Physiotherapy*, 2016.
- [37] BIOLaster. (Mayo). *Electroestimulación Muscular*. Available: <https://www.biolaster.com/productos/electroestimulacion-muscular/>
- [38] N. Center. (2001, Mayo). *Estimulación Eléctrica Funcional de miembro inferior: Sistema de Rehabilitación del Pie Caído*. Available: <http://www.neurotraumacenter.org/nuestra-tecnologia/30-estimulacion-electrica-funcional-de-miembro-inferior-sistema-de-rehabilitacion-del-pie-caido-xft-2001.html>

- [39] S. Inc. (2017, Mayo). *Reciprocal EMG-Triggered Stimulation. A radically new approach to managing spasticity*. Available: <https://www.saebo.com/saebo-myotrac-infinity/>
- [40] M. T. Flores García, "Intervenciones para mejorar la función motora en el paciente con ictus," *Rehabilitación (Madrid)*, vol. 34 pp. 423-437, 2000.
- [41] M. A. Buide, "Grado de eficacia del tratamiento kinésico frente a las AVD en pacientes con hemiplejía post ACV," Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad FASTA, 2012.
- [42] S. C. N. Cramer, Randolph J., *Brain Repair After Stroke*, 1 ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 2010.
- [43] E. H. A. Acosta Arámburo, Hermelinda; Devesa Gutiérrez, Ignacio, "Eficacia de la neurorrehabilitación de miembro torácico mediante terapia robótica en enfermedad vascular cerebral. Revisión sistemática," *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 27 pp. 17-23, 2015.
- [44] S. Franco Domínguez, "Otra de exoesqueletos: PANASONIC-ACTIVELINK Power Loader Light," in *Rehabilitación y medicina física*, ed: WordPress, 2010.
- [45] P. Loeza Magaña, "Introducción a la rehabilitación robótica para el tratamiento de la enfermedad vascular cerebral: revisión," *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 27 pp. 44-48, 2015.
- [46] C. P. P. Meneses Castaño, Yuly; Pinzón Bernal, Mónica Yamile; Castellanos Ruíz, Julialba "Aplicación de la terapia robótica para el tratamiento de la mano espástica del adulto con hemiplejía. Artículo de revisión," *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 27 pp. 80-85, 2016.
- [47] S. S. Q. Xie, *Advanced Robotics for Medical Rehabilitation Current State of the Art and Recent Advances* vol. 108: Springer, 2016.
- [48] D. E. L. Guzmán, J., "Rehabilitación de miembro superior con ambientes virtuales: revisión," *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 37 pp. 271-285, 2016.
- [49] ReActiv. (Mayo). *Discapacidad intelectual y autismo*. Available: <http://blog.reactiv.com.mx/discapacidad-intelectual-y-autismo/>
- [50] A. B. Frisoli, L.; Montagner, A.; Marcheschi, S.; Procopio, C.; Salsedo, F.; Bergamasco, M.; Carboncini, M.C.; Tolaini, M.; Rossi, B., "Arm rehabilitation with a robotic exoskeleton in Virtual Reality," presented at the International Conference on Rehabilitation Robotics, 2007.
- [51] J. N. G. Gutiérrez Martínez, Marco Antonio; Carrillo Mora, Paul, "Avances tecnológicos en neurorrehabilitación," *Revista de Investigación Clínica*, vol. 66 pp. s8-s23, 2014.
- [52] Massachusetts Institute of Technology. (2010, Septiembre 21). *Robotic therapy helps stroke patients regain function*. Available: <http://news.mit.edu/2010/stroke-therapy-0419>
- [53] R. A. Loureiro, Farshid; Topping, Michael; Driessen, Bart; Harwin, William, "Upper Limb Robot Mediated Stroke - Therapy GENTLE/s Approach," *Autonomous Robots*, vol. 15 pp. 35-51, 2003.
- [54] P. S. B. Lum, Charles G.; Van der Loos, Machiel; Shor, Peggy C.; Madjmundar, Matra; Yap, Ruth, "MIME robotic device upper-limb neurorehabilitation in subacute stroke subjects: A follow-up study," *The Journal of Rehabilitation Research and Development* vol. 43 pp. 631-642, 2006.
- [55] I. ROBOTS, "InMotion robot-assisted therapy Evidence-Based Neurorehabilitation," I. M. Technologies, Ed., ed, 2013.
- [56] Biodex, "S4 Introducing the New Biodex System 4," B. M. Systems, Ed., ed. New York.
- [57] Biodex. (21 Septiembre). *System 4 Pro*. Available: <http://www.biodex.com/physical-medicine/products/dynamometers/system-4-pro>
- [58] C. M. Solutions, "HUMAC NORM Testing and Rehabilitation System," ed, 2005.
- [59] CSMi. (2016, Septiembre 22). *HUMAC NORM*. Available: <http://www.csmisolutions.com/products/isokinetic-extremity-systems/humac-norm>

- [60] T. G. Nef, Marco; Klamroth-Marganska, Verena; Riener, Robert, "ARMin - Exoskeleton Robot for Stroke Rehabilitation," 2009, pp. 127-130.
- [61] S. C. Roderick, Craig, "Designing Safety Critical Rehabilitation Robots," in *Rehabilitation Robotics*, S. S. Kommu, Ed., ed, 2007.
- [62] C. T. Carignan, Jonathan; Roderick, Stephen; Naylor, Michael, "A Configuration-Space Approach to Controlling a Rehabilitation Arm Exoskeleton," in *10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2007.
- [63] Hocoma, "Armeo Therapy Concept," ed.
- [64] Hocoma, "Technical Data ArmeoPower," ed.
- [65] Hocoma. (Septiembre). *Armeopower*. Available: https://www.hocoma.com/uploads/pics/neuroinsights_1201_armeopower_big.jpg
- [66] Hocoma, "Technical Data ArmeoSpring with module ManovoSpring."
- [67] Hocoma. (Septiembre). *Neuroinsights*. Available: https://www.hocoma.com/uploads/pics/neuroinsights_1202_aofaq_007big.jpg
- [68] Hocoma. (Septiembre). *AOPE Hocoma*. Available: https://www.hocoma.com/fileadmin/user/Bilder/ArmeoSpring/AOPE_Hocoma_1603_6919.jpg
- [69] S. Kirsner. (2012, Septiembre). *Myomo, selling robotic devices to assist with stroke rehab, is engineering its own recovery*. Available: http://archive.boston.com/business/technology/innoeco/2012/02/myomo_selling_robotic_devices.html
- [70] M. Nova. (2014, Septiembre). *Stroke Hand Mentor Trial Now Offered at Emory*. Available: <http://motusnova.com/news/stroke-hand-mentor-trial-now-offered-at-emory/>
- [71] D. Beciri. (2009, Septiembre). *Cyberdyne HAL-5 – exoskeleton robot*. Available: <http://www.robaid.com/bionics/cyberdyne-hal-5-exoskeleton-robot.htm>
- [72] F. o. M. a. Health. (Septiembre). *iSIT – iPAM Stroke Intervention Trial (RCT)*. Available: http://medhealth.leeds.ac.uk/info/731/research_strategy/1456/isit_ipam_stroke_intervention_trial_rct
- [73] A. L. Bertomeu-Motos, Luis D.; Díez, Jorge A.; Catalan, Jose M.; Ezzquerro, Santiago; Badesa, Francisco J.; Garcia-Aracil, Nicolas, "Estimation of Human Arm Joints Using Two Wireless Sensors in Robotic Rehabilitation Task," *Sensors 2015*, vol. 15 pp. 30571-30583, 2015.
- [74] US Digital. E4P OEM Miniature Optical Kit Encoder. Available: http://cdn.usdigital.com/assets/datasheets/E4P_datasheet.pdf?k=636167294038276875
- [75] Arduino. (2016). *Getting started with the Arduino Due*. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue>
- [76] L.-W. Tsai, *Robot Analysis The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [77] División de Investigación de la Facultad de Medicina UNAM Carta de Consentimiento Informado para Proyectos de Investigación Educativa. Available: http://di.facmed.unam.mx/images/files/Consentimiento_invest_educativa.pdf
- [78] Comisión de Investigación de la Facultad de Medicina UNAM. (2016). Manual de procedimientos de la Comisión de Investigación. Available: http://di.facmed.unam.mx/images/files/c_manual-de-procedimientos_investigacion.pdf

XIII) APÉNDICES

APÉNDICE A. DIAGRAMAS Y CÓDIGO DE LA PROGRAMACIÓN EN ARDUINO

DIAGRAMA DE FLUJO

Programa para leer los encoders del robot con Arduino Due

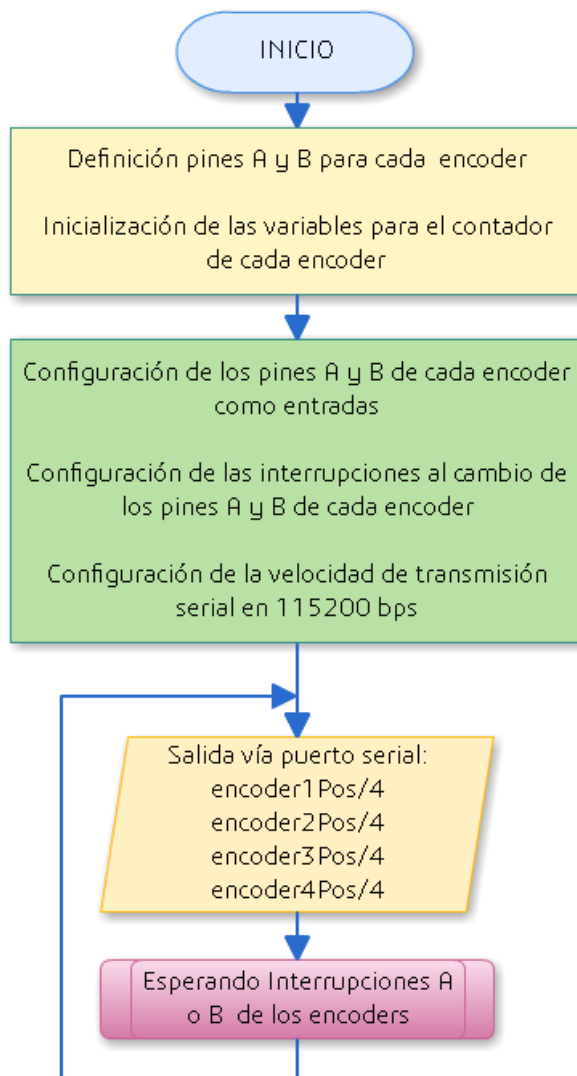
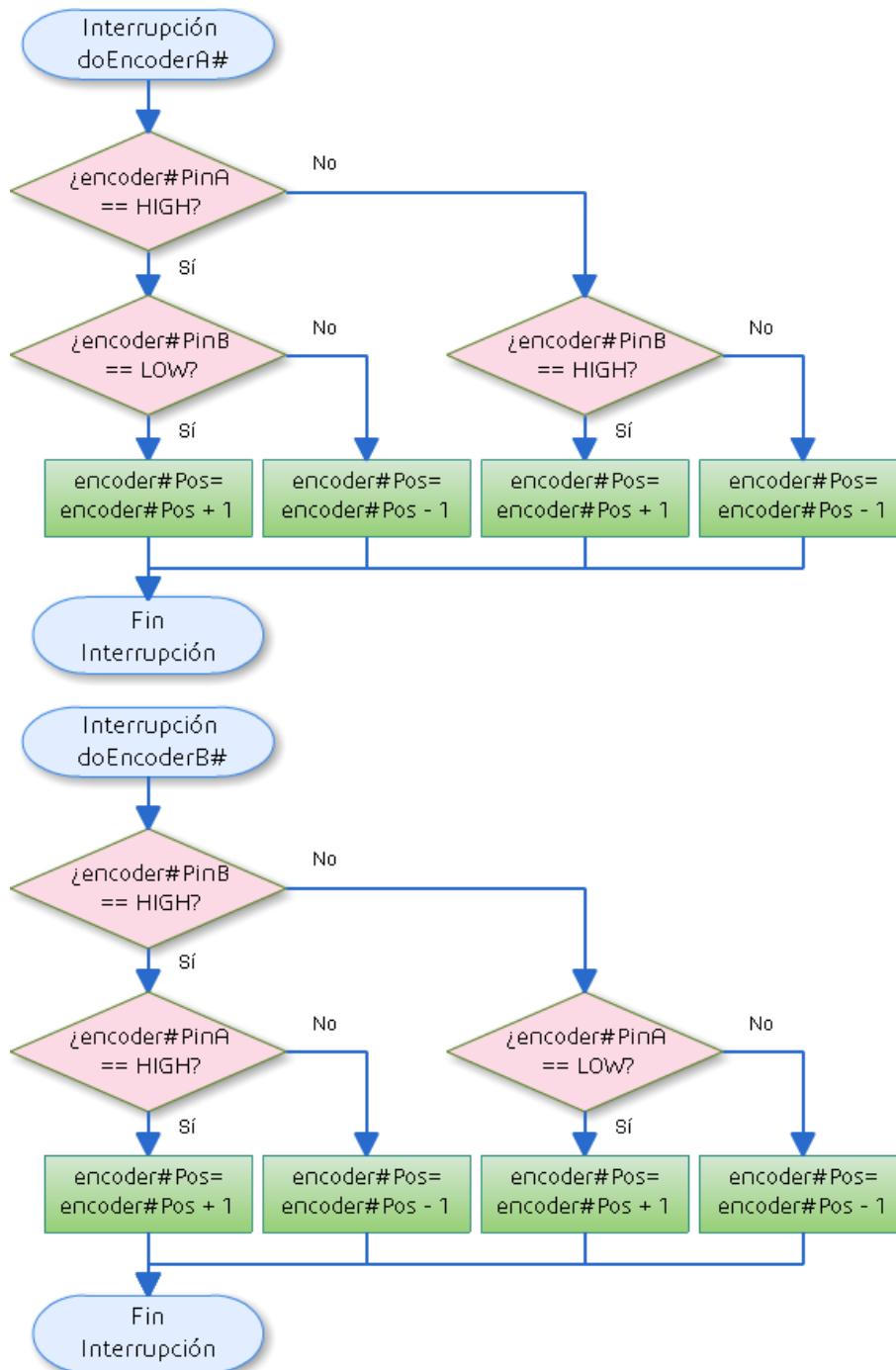


Figura 89. Diagrama de flujo del programa en Arduino. Elaboración propia

DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS INTERRUPCIONES



El símbolo # debe sustituirse por el número de encoder al que pertenece la interrupción.
El número de encoders va de 1 a 4.

Figura 90. Diagrama de flujo para las interrupciones en Arduino. Elaboración propia

CÓDIGO DEL PROGRAMA EN EL ARDUINO

```

/**Programa para leer los encoders**
#define encoder1PinA 24 //Encoder 1
#define encoder1PinB 25
#define encoder2PinA 26 //Encoder 2
#define encoder2PinB 27
#define encoder3PinA 28 //Encoder 3
#define encoder3PinB 29
#define encoder4PinA 30 //Encoder 4
#define encoder4PinB 31
int encoder1Pos = 0;
int encoder2Pos = 0;
int encoder3Pos = 0;
int encoder4Pos = 0;

void setup() {
  attachInterrupt(24, doEncoderA1, CHANGE);
  attachInterrupt(25, doEncoderB1, CHANGE);
  attachInterrupt(26, doEncoderA2, CHANGE);
  attachInterrupt(27, doEncoderB2, CHANGE);
  attachInterrupt(28, doEncoderA3, CHANGE);
  attachInterrupt(29, doEncoderB3, CHANGE);
  attachInterrupt(30, doEncoderA4, CHANGE);
  attachInterrupt(31, doEncoderB4, CHANGE);
  Serial.begin (115200);
}

void loop(){
  Serial.print(encoder4Pos/4, DEC); //Encoder4
  Serial.print("/");
  Serial.print(-(encoder3Pos/4), DEC); //Encoder3
  Serial.print("/");
  Serial.print(encoder2Pos/4, DEC); //Encoder2
  Serial.print("/");
  Serial.println(encoder1Pos/4, DEC); //Encoder1
}

//MÉTODOS PARA EL CONTEO DE LOS ENCODERS
void doEncoderA1(){
  if (digitalRead(encoder1PinA) == HIGH) {
    if (digitalRead(encoder1PinB) == LOW) {
      encoder1Pos = encoder1Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder1Pos = encoder1Pos - 1; //SA
    }
  }
  else
  {
    if (digitalRead(encoder1PinB) == HIGH) {
      encoder1Pos = encoder1Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder1Pos = encoder1Pos - 1; //SA
    }
  }
}

void doEncoderA2(){
  if (digitalRead(encoder2PinA) == HIGH) {
    if (digitalRead(encoder2PinB) == LOW) {
      encoder2Pos = encoder2Pos + 1//SH
    }
    else {
      encoder2Pos = encoder2Pos - 1; //SA
    }
  }
  else
  {
    if (digitalRead(encoder2PinB) == HIGH) {
      encoder2Pos = encoder2Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder2Pos = encoder2Pos - 1; //SA
    }
  }
}
}
}

```

```
void doEncoderA3(){
  if (digitalRead(encoder3PinA) == HIGH) {
    if (digitalRead(encoder3PinB) == LOW) {
      encoder3Pos = encoder3Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder3Pos = encoder3Pos - 1; //SA
    }
  }
  else
  {
    if (digitalRead(encoder3PinB) == HIGH) {
      encoder3Pos = encoder3Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder3Pos = encoder3Pos - 1; //SA
    }
  }
}

void doEncoderA4(){
  if (digitalRead(encoder4PinA) == HIGH) {
    if (digitalRead(encoder4PinB) == LOW) {
      encoder4Pos = encoder4Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder4Pos = encoder4Pos - 1; //SA
    }
  }
  else
  {
    if (digitalRead(encoder4PinB) == HIGH) {
      encoder4Pos = encoder4Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder4Pos = encoder4Pos - 1; //SA
    }
  }
}

void doEncoderB1(){
  if (digitalRead(encoder1PinB) == HIGH) {
    if (digitalRead(encoder1PinA) == HIGH) {
      encoder1Pos = encoder1Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder1Pos = encoder1Pos - 1; //SA
    }
  }
  else {
    if (digitalRead(encoder1PinA) == LOW) {
      encoder1Pos = encoder1Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder1Pos = encoder1Pos - 1; //SA
    }
  }
}

void doEncoderB2(){
  if (digitalRead(encoder2PinB) == HIGH) {
    if (digitalRead(encoder2PinA) == HIGH) {
      encoder2Pos = encoder2Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder2Pos = encoder2Pos - 1; //SA
    }
  }
  else {
    if (digitalRead(encoder2PinA) == LOW) {
      encoder2Pos = encoder2Pos + 1; //SH
    }
    else {
      encoder2Pos = encoder2Pos - 1; //SA
    }
  }
}

void doEncoderB3(){
  if (digitalRead(encoder3PinB) == HIGH) {
```

```
if (digitalRead(encoder3PinA) == HIGH) {
    encoder3Pos = encoder3Pos + 1; //SH
}
else {
    encoder3Pos = encoder3Pos - 1; //SA
}
}
}
}
}

void doEncoderB4(){
    if (digitalRead(encoder4PinB) == HIGH) {
        if (digitalRead(encoder4PinA) == HIGH) {
            encoder4Pos = encoder4Pos + 1; //SH
        }
        else {
            encoder4Pos = encoder4Pos - 1; //SA
        }
    }
    else {
        if (digitalRead(encoder4PinA) == LOW) {
            encoder4Pos = encoder4Pos + 1; //SH
        }
        else {
            encoder4Pos = encoder4Pos - 1; //SA
        }
    }
}
}
```

APÉNDICE B. DIAGRAMAS Y CÓDIGO DE LA PROGRAMACIÓN EN PROCESSING

DIAGRAMA DE FLUJO

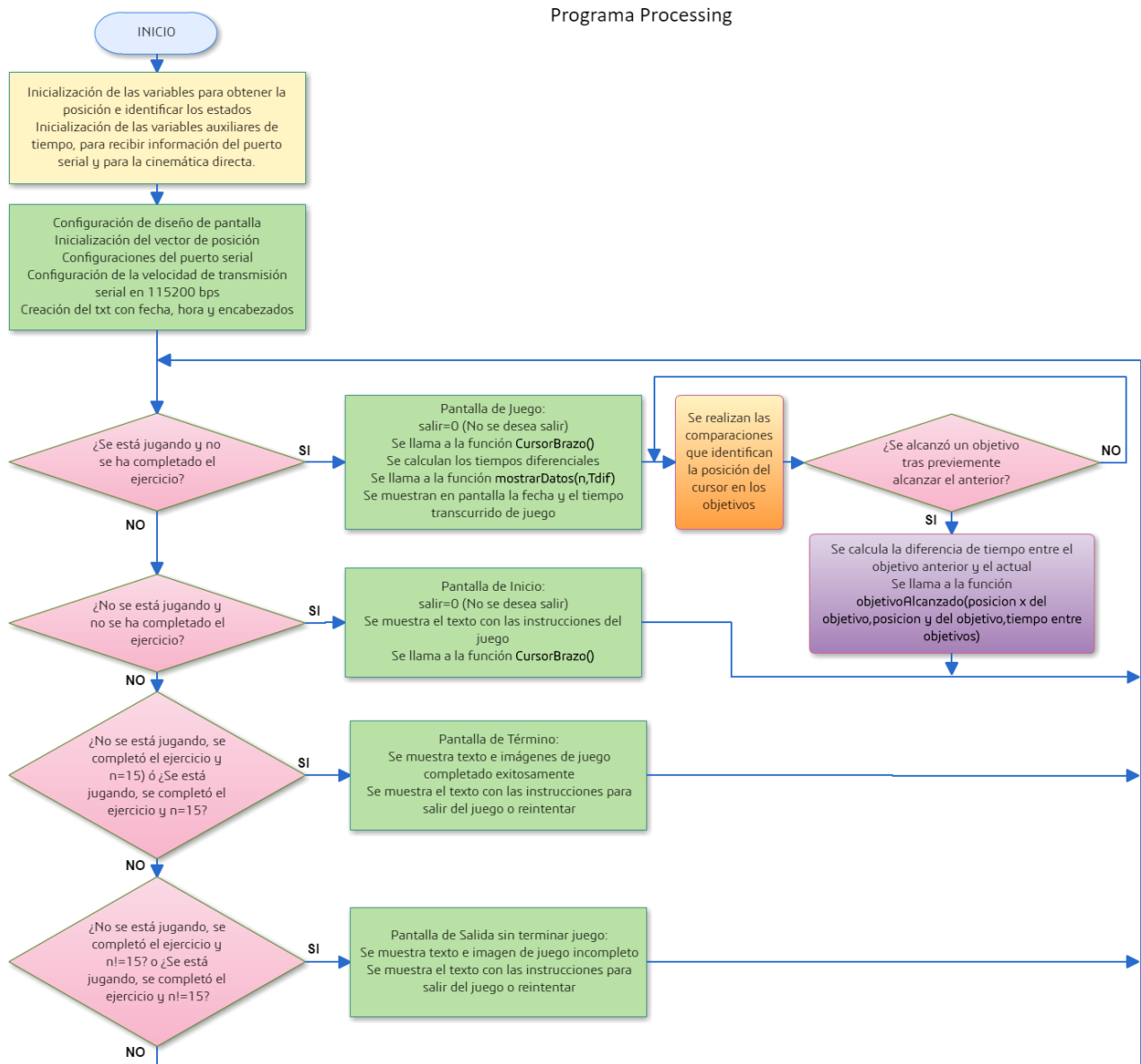


Figura 91. Diagrama de flujo para el programa en Processing. Elaboración propia

DIAGRAMAS DE FLUJO DE LAS SUBRUTINAS

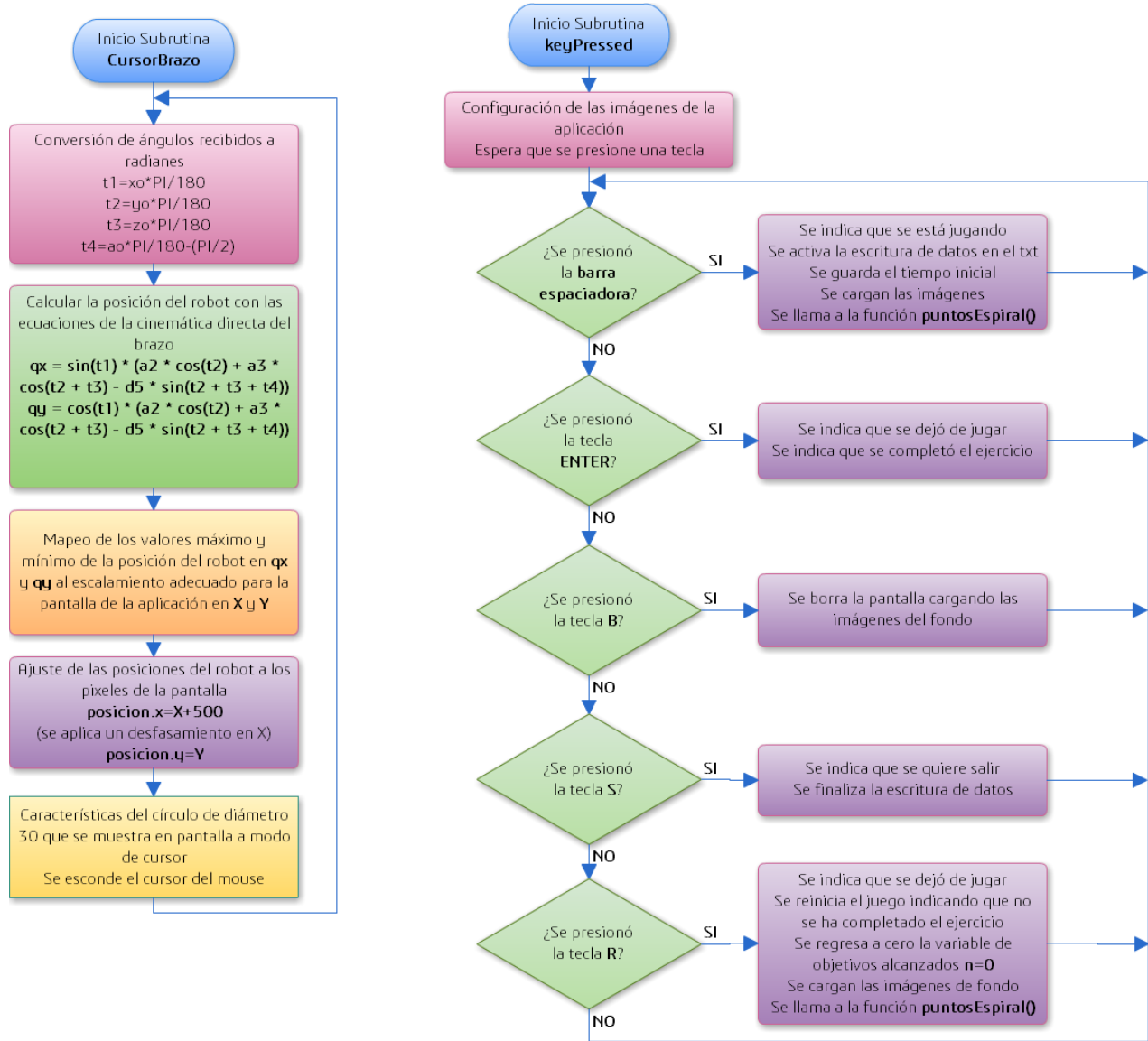


Figura 92. Diagrama de flujo para las subrutinas CursorBrazo y KeyPressed. Elaboración propia

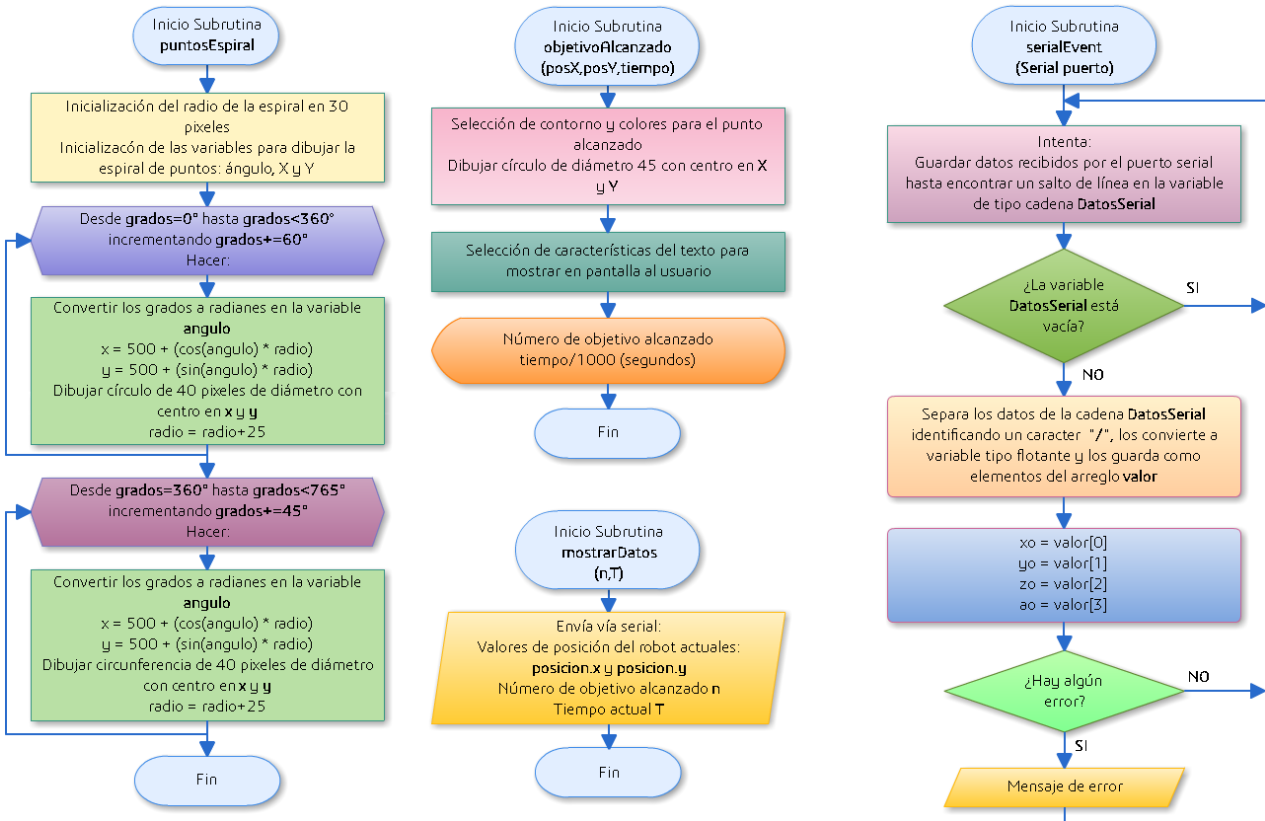


Figura 93. Diagrama de flujo para las subrutinas: puntosEspiral, objetivoAlcanzado, mostrarDatos y serialEvent. Elaboración propia

CÓDIGO DEL PROGRAMA EN PROCESSING

```
int valor=0; //Se está jugando o terminó el juego
int completo=0; //Se completó o no el ejercicio
int salir=0; //Se quiere o no salir
float x,y; //Variables de la espiral
PVector posicion; //Posición del cursor (float)
PrintWriter salida; //Archivo txt
int n = 0; //Objetivos alcanzados
//Tiempos
float T0,T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15 = 0;
float Ta0,Ta1,Ta2,Ta3,Ta4,Ta5,Ta6,Ta7,Ta8,Ta9,Ta10,Ta11,Ta12,Ta13,Ta14,Ta15 = 0;
float Tin, Tfin, Tdif = 0;
//COMUNICACIÓN SERIAL
import processing.serial.*; //Importa la librería de comunicación serial
Serial puerto; //Crea la variable para el puerto serial
float xo,yo;
float zo=0;
float ao=0;
//Dimensiones mecanismo
float a2 = 0.28;
float a3 = 0.25;
float d1 = 0.08;
float d5 = 0.20;
float t1,t2,t3,t4; //Ángulos
float qx,qy,qz; // Cinemática Directa
float X,Y; //Movimiento en pantalla

void setup()
{
  size(1000,1000);
  PImage fondoesp = loadImage("FondoPasto.png");
  background(fondoesp);
  fill(255,50);
  noStroke();
  rect(0, 0, 1000, 1000);
  smooth();

  textFont(createFont("Calibri",26));
  textAlign(CENTER,CENTER);
```

```
//Rectángulo para borrar el texto
fill(0);
noStroke();
rectMode(CENTER);
rect(500, 100, 1000, 100);

PImage pikachu = loadImage("pikachu.png");
imageMode(CENTER);
image(pikachu,500,500);

posicion=new PVector(500,500); //Inicializa posición

//VARIABLES DEL PUERTO SERIAL
printArray(Serial.list());
puerto = new Serial(this, Serial.list()[0], 115200);
puerto.bufferUntil('\n'); //Bytes por leer
puerto.clear(); //Limpia buffer

puntosEspiral(); //Dibuja los puntos de la espiral
}

void draw()
{
if(valor==1 && completo==0) //Pantalla de Juego
{
salir=0; //No se desea salir
//Características del rectángulo para borrar el texto
fill(0);
noStroke();
rect(500, 100, 1000, 100);
rectMode(CENTER);

fill(255); //Define color del texto
text("Presiona ENTER para SALIR ",500, 75);
text("O presiona R para REINICIAR ",500, 125);

CursorBrazo(); //Llama a la función del cursor del brazo

//Cálculo del tiempo diferencial
Tfin=millis()-T0;
```

```
Tdif =Tfin-Tin;
mostrarDatos(n,Tdif); //Muestra los datos

//MOSTRAR OBJETIVOS ALCANZADOS
if (posicion.x>=(530-15) && posicion.x<=(530+15) && posicion.y>=(500-15) && posicion.y<=(500+15) &&
n<1)
{
    n=1;
    Ta1 = millis(); //Tiempo actual
    T1 = Ta1-T0; //Cálculo de la diferencia de tiempo
    objetivoAlcanzado (530, 500.00012,T1); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(527.5-15) && posicion.x<=(527.5+15) && posicion.y>=(547.6314-15) &&
posicion.y<=(547.6314+15) && n==1)
{
    n=2;
    Ta2 = millis(); //Tiempo actual
    T2 = Ta2-Ta1; //Cálculo de la diferencia de tiempo
    objetivoAlcanzado (527.5, 547.6314,T2); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(460-15) && posicion.x<=(460+15) && posicion.y>=(569.28204-15) &&
posicion.y<=(569.28204+15) && n==2)
{
    n=3;
    Ta3 = millis(); //Tiempo actual
    T3 = Ta3-Ta2; //Cálculo de la diferencia de tiempo
    objetivoAlcanzado (460, 569.28204,T3); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(395-15) && posicion.x<=(395+15) && posicion.y>=(500-15) && posicion.y<=(500+15)
&& n==3)
{
    n=4;
    Ta4 = millis(); //Tiempo actual
    T4 = Ta4-Ta3; //Cálculo de la diferencia de tiempo
    objetivoAlcanzado (395, 500,T4); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(435-15) && posicion.x<=(435+15) && posicion.y>=(387.4167-15) &&
posicion.y<=(387.4167+15) && n==4)
{
    n=5;
```

```
Ta5 = millis(); //Tiempo actual
T5 = Ta5-Ta4; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (435, 387.4167,T5); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(577.5-15) && posicion.x<=(577.5+15) && posicion.y>=(365.76605-15) &&
posicion.y<=(365.76605+15) && n==5)
{
n=6;
Ta6 = millis(); //Tiempo actual
T6 = Ta6-Ta5; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (577.5, 365.76605,T6); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(680-15) && posicion.x<=(680+15) && posicion.y>=(500.00003-15) &&
posicion.y<=(500.00003+15) && n==6)
{
n=7;
Ta7 = millis(); //Tiempo actual
T7 = Ta7-Ta6; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (680, 500.00003,T7); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(644.9569-15) && posicion.x<=(644.9569+15) && posicion.y>=(644.9569-15) &&
posicion.y<=(644.9569+15) && n==7)
{
n=8;
Ta8 = millis(); //Tiempo actual
T8 = Ta8-Ta7; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (644.9569, 644.9569,T8); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(500.00003-15) && posicion.x<=(500.00003+15) && posicion.y>=(730-15) &&
posicion.y<=(730+15) && n==8)
{
n=9;
Ta9 = millis(); //Tiempo actual
T9 = Ta9-Ta8; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (500.00003, 730,T9); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(319.6878-15) && posicion.x<=(319.6878+15) && posicion.y>=(680.31226-15) &&
posicion.y<=(680.31226+15) && n==9)
{
n=10;
```

```
Ta10 = millis(); //Tiempo actual
T10 = Ta10-Ta9; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (319.6878, 680.31226,T10); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(220-15) && posicion.x<=(220+15) && posicion.y>=(500-15) && posicion.y<=(500) &&
n==10)
{
n=11;
Ta11 = millis(); //Tiempo actual
T11 = Ta11-Ta10; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (220, 500,T11); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(284.33252-15) && posicion.x<=(284.33252+15) && posicion.y>=(284.33237-15) &&
posicion.y<=(284.33237+15) && n==11)
{
n=12;
Ta12 = millis(); //Tiempo actual
T12 = Ta12-Ta11; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (284.33252, 284.33237,T12); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(499.9999-15) && posicion.x<=(499.9999+15) && posicion.y>=(170-15) &&
posicion.y<=(170+15) && n==12)
{
n=13;
Ta13 = millis(); //Tiempo actual
T13 = Ta13-Ta12; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (499.9999, 170,T13); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(751.02295-15) && posicion.x<=(751.02295+15) && posicion.y>=(248.9771-15) &&
posicion.y<=(248.9771+15) && n==13)
{
n=14;
Ta14 = millis(); //Tiempo actual
T14 = Ta14-Ta13; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (751.02295, 248.9771,T14); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
}
else if (posicion.x>=(880-15) && posicion.x<=(880+15) && posicion.y>=(500.00012-15) &&
posicion.y<=(500.00012+15) && n==14)
{
n=15;
```

```
Ta15 = millis(); //Tiempo actual
T15 = Ta15-Ta14; //Cálculo de la diferencia de tiempo
objetivoAlcanzado (880, 500,T15); //Llama a la función que marca el objetivo alcanzado
completo=1; //Objetivo cumplido
}

//TIEMPO TOTAL TRANSCURRIDO
fill(0); //Color del rectángulo (RGB,Opacidad)
noStroke(); //Sin contorno
rect(200, 900, 250, 50, 25); //Se dibuja un rectángulo
rectMode(CENTER); //Alineación
//Características del Texto
fill(0,255,0); //Define color del texto
text("Tiempo Total: " +int((millis()-T0)/1000)+" s", 200, 900);

//FECHA
fill(0); //Color del rectángulo
rect(490, 900, 250, 50, 40); //Se dibuja un rectángulo
rectMode(CENTER); //Alineación
//Características del Texto
fill(255,102,178); //Define color del texto
text("Fecha: "+day()+" / "+month()+" / "+year(), 490, 900);

Tin=Tfin; //Reasignando valor del tiempo
}

else if(valor==0 && completo==0) //Pantalla de Inicio
{
  salir=0; //No se desea salir
  //Características del rectángulo para borrar el texto
  fill(0); //Color del rectángulo
  noStroke(); //Sin contorno
  rect(500, 100, 1000, 100); //Se dibuja un rectángulo
  rectMode(CENTER); //Alineación

  fill(255); //Define color del texto
  text("Situa el cursor en el centro de la espiral.",500, 78);
  text("Presiona la barra espaciadora cuando estés listo para seguir los puntos de la espiral negra.",500,
112);
  CursorBrazo(); //Llama a la función del cursor del brazo
```

```
}
else if (valor==0 && completo==1 && n==15 || valor==1 && completo==1 && n==15) //Pantalla de Término
//No se está jugando, se completó el ejercicio y n=15 o, se está jugando, se completó el ejercicio y n=15
{
  imageMode(CENTER);
  PImage FondoMargen = loadImage("FondoMargen.png");
  image(FondoMargen,500,500);

  fill(0); //Define color del texto
  text("Terminaste =D ",500, 100); //Escribe texto
  text("¡Gracias a ti el conejito comió! ",500, 150);
  text("Presiona la tecla 'S' para SALIR",500, 800);
  text("O la tecla 'R' para REINTENTAR",500, 835);
  text("Versión 6.0 Moxi Corp.",500, 900);

  PImage ConejoFinalFeliz = loadImage("ConejoFinalFeliz.png");
  image(ConejoFinalFeliz,700,450);
  PImage ConejoGracias = loadImage("ConejoGracias.png");
  image(ConejoGracias, 300,450);

  if(salir==1) //Si se presiona S o s se quiere salir
  {
    exit(); //Cierra la aplicación
  }
}
else if (valor==0 && completo==1 && n!=15 || valor==1 && completo==1 && n!=15) //Pantalla de salida
sin terminar
//No se está jugando, se completó el ejercicio y n!=15 o se está jugando, se completó el ejercicio y n!=15
{
  imageMode(CENTER);
  PImage FondoMargen = loadImage("FondoMargen.png");
  image(FondoMargen,500,500);

  fill(0); //Define color del texto
  text("¡No te desanimas! =D ",500, 100); //Escribe texto
  text("La diferencia entre ganar y perder",500, 150);
  text("a menudo consiste en no abandonar",500, 185);

  PImage ConeNoRendir = loadImage("ConeNoRendir.png");
  image(ConeNoRendir,500,500);
```

```
text("Presiona la tecla 'S' para SALIR",500, 800);
text("O la tecla 'R' para REINTENTAR",500, 835);
text("Versión 6.0 Moxi Corp.",500, 900);
if(salir==1) //Si se presiona S o s se quiere salir
{
    exit(); //Cierra la aplicación
}
}
```

```
public void puntosEspiral()
{
    //DIBUJA UNA ESPIRAL PUNTEADA
    noStroke();
    fill(0);
    float radio = 30.0;
    float angulo,x,y;
    for (int grados=0; grados < 360; grados += 60) //Se hace la espiral desde 0° hasta 360° con incrementos de 60°
    {
        angulo = radians(grados);
        x = 500 + (cos(angulo) * radio);
        y = 500 + (sin(angulo) * radio);
        ellipse(x, y, 40, 40);
        radio = radio + 25.0;
    }
    for (int grados=360; grados < 765; grados += 45) //Espiral desde 360° hasta 360*2° con incrementos de 45°
    {
        angulo = radians(grados);
        x = 500 + (cos(angulo) * radio);
        y = 500 + (sin(angulo) * radio);
        ellipse(x, y, 40, 40);
        radio = radio + 25.0;
    }
}
```

```
public void objetivoAlcanzado (float posX, float posY, float tiempo) // MARCAR OBJETIVOS ALCANZADOS
{
    fill(255,255,0); //Se elige un color para el punto
```



```
stroke(255,0,0); //Color del contorno del punto
ellipse(posX, posY, 45, 45); //Se marca el objetivo alcanzado

//Tiempo y objetivos en pantalla
fill(0); //Color del rectángulo
noStroke(); //Sin contorno
rect(800, 900, 350, 50, 20); //Se dibuja un rectángulo
rectMode(CENTER); //Alineación
fill(255,255,0); //Define color del texto
text("Objetivo: " +n + " Tiempo: " +(tiempo/1000)+" s", 800, 900);
}

public void mostrarDatos(int n, float T) //MOSTRAR LOS DATOS
{
    println("Posición actual: " +posicion.x + ", " +posicion.y + ", " +n + ", " +T);
    //Escribir en un txt las posiciones guardadas
    salida.println( +posicion.x + " " +(-posicion.y) + " " +n + " " +T+ " " +(millis()-T0));
}

void serialEvent (Serial puerto) //OBTENER LOS DATOS DEL PUERTO SERIAL
{
    String DatosSerial = puerto.readStringUntil('\n');
    if (DatosSerial != null) //Si la cadena no se encuentra vacía
    {
        //Recibe los valores en orden, separados por la diagonal "/", convirtiéndolos a flotante
        float[] valor=float(split(DatosSerial, '/'));
        xo = valor[0];
        yo = valor[1];
        zo = valor[2];
        ao = valor[3];
    }
}

public void CursorBrazo()
{
    //CINEMATICA DIRECTA
    t1=xo*PI/180;
    t2=yo*PI/180;
    t3=zo*PI/180;
    t4=ao*PI/180-(PI/2);
```

```
qx = sin(t1) * (a2 * cos(t2) + a3 * cos(t2 + t3) - d5 * sin(t2 + t3 + t4));
qy = cos(t1) * (a2 * cos(t2) + a3 * cos(t2 + t3) - d5 * sin(t2 + t3 + t4));
//MAPEOS
X = map(qx, -0.73, 0.73, -1000, 1000); //Mapeo del valor recibido a la pantalla en X escalada
Y = map(qy, -0.73, 0.73, -1000, 1000); //Mapeo del valor recibido a la pantalla en Y escalada

//Adaptando la posición actual del robot a los pixeles de la pantalla
posicion.x = X+500;
posicion.y = Y;

//Círculo cursor
fill(252,13,164); //Selecciona color
ellipseMode(CENTER); //La elipse se dibuja desde el centro
translate(X,Y-500); //Desplaza en X y Y
ellipse(500,500,30,30); //Dibuja un círculo como cursor
noCursor(); //Esconde el cursor del mouse
}

void keyPressed() //IDENTIFICAR SI SE PRESIONÓ Y SOLTÓ UNA TECLA Y CUAL
{
  PImage fondoesp = loadImage("FondoPasto.png");
  PImage pikachu = loadImage("pikachu.png");
  imageMode(CENTER);
  switch (key) //Se usan casos con la variable de la tecla que se presionó
  {
    case ' ': //Si se presiona la barra espaciadora:
      valor=1; //Se cambia el valor a 1. Se está jugando
      //CREACIÓN DEL DOCUMENTO TXT
      salida=createWriter("posiciones.txt"); //Se crea el archivo con el nombre dado
      salida.println("Fecha/"+day()+"/"+month()+"/"+year()+"/"+hour()+":"+minute()); //Escribir la fecha y la
      hora
      salida.println("PosiciónX PosiciónY N°ObjetivoÚlt Tiempo Tiempo Total"); //Escribir en el txt el
      encabezado de los datos guardados
      salida.flush(); // Activa la escritura de datos
      T0 = millis(); //Define tiempo inicial en milisegundos

      background(fondoesp);
      image(pikachu,500,500);
      puntosEspiral(); //Dibuja los puntos de la espiral
      break;
  }
}
```

```
case ENTER: //Si se presiona la tecla ENTER
valor=0; //Se cambia el valor a 0. Se dejó de jugar
completo=1; //Se indica que se completó el ejercicio
break;
```

```
case 'b': //Si se presiona la tecla 'B'
case 'B':
background(fondoesp);
image(pikachu,500,500);
puntosEspiral(); //Dibuja los puntos de la espiral
break;
```

```
case 's': //Si se presiona la tecla 'S'
case 'S':
salir=1; //Se quiere salir
salida.close(); // Termina la escritura de datos
break;
```

```
case 'r': //Si se presiona la tecla 'R' --> Regresa a la pantalla de inicio
case 'R':
salida.close(); // Termina la escritura de datos
valor=0; //No se está jugando
completo=0; //Se reinicia el juego
n=0; //No se ha alcanzado ningún objetivo
```

```
background(fondoesp);
//Colocando el pikachu central
image(pikachu,500,500);
puntosEspiral(); //Dibuja los puntos de la espiral
break;
}
}
```

APÉNDICE C. CÓDIGO DE LA PROGRAMACIÓN EN MATLAB

```

nDER='PruebaD'; %Nombre de prueba DERECHA.
nIZQ='PruebaI'; %Nombre de prueba IZQUIERDA.
v=1;      %Número de voluntario

archivolZQ=fopen(['posiciones_' nIZQ '.txt'],'r');
datosIZQ=fread(archivolZQ);
pos_columnalZQ=strfind(char(datosIZQ),'Total');
MatrizDatosIZQ
=sscanf(char(datosIZQ(pos_columnalZQ(1,1)+5:
end)),'%g',[5,inf]);
fclose(archivolZQ)
archivoDER=fopen(['posiciones_' nDER '.txt'],'r');
datosDER=fread(archivoDER);
pos_columnaDER=strfind(char(datosDER),'Total')
;
MatrizDatosDER
=sscanf(char(datosDER(pos_columnaDER(1,1)+5:
end)),'%g',[5,inf]);
fclose(archivoDER)
puntosespiral=fopen(['PosPtosEspiral.txt'],'r');
datos2=fread(puntosespiral);
pos_columna2=strfind(char(datos2),'PosicionY');
MatrizPuntos
=sscanf(char(datos2(pos_columna2(1,1)+9:end)),
'%g',[4,inf]);
fclose(puntosespiral)

xDER=MatrizDatosDER(:,1);
yDER=MatrizDatosDER(:,2);
objetivoDER=MatrizDatosDER(:,3);
tiempodifDER=MatrizDatosDER(:,4);
tiempototalDER=MatrizDatosDER(:,5);
xIZQ=MatrizDatosIZQ(:,1);
yIZQ=MatrizDatosIZQ(:,2);
objetivolZQ=MatrizDatosIZQ(:,3);
tiempodifIZQ=MatrizDatosIZQ(:,4);
tiempototalIZQ=MatrizDatosIZQ(:,5);
espx=MatrizPuntos(:,2);

espy=MatrizPuntos(:,3);
tiempoesp=MatrizPuntos(:,4);
%Elaborado por Sandra M García V
texto=['Voluntario ' num2str(v)];
figure(1);
subplot(1,2,1);      %Gráfica 1
plot(xIZQ,yIZQ,'r',espx,-espy,'LineWidth',2);
title([texto ]; '\color{blue} Espiral Original
\color{red} Espiral Dibujada: Brazo IZQUIERDO'));
xlabel('Posición en X');
ylabel('Posición en Y');
subplot(1,2,2);      %Gráfica 2
plot(xDER,yDER,'r',espx,-espy,'LineWidth',2);
title([texto ]; '\color{blue} Espiral Original
\color{red} Espiral Dibujada: Brazo DERECHO'));
xlabel('Posición en X');
ylabel('Posición en Y');

figure(2);
subplot(1,2,1);      %Gráfica 3
plot(tiempototalIZQ/1000,objetivolZQ,'g','LineWi
dth',3);
title([texto ]; 'Tiempo en Alcanzar los Objetivos:
Brazo IZQUIERDO'));
xlabel('Tiempo Total [s]');
ylabel('Número de Objetivo Alcanzado');
grid on;
subplot(1,2,2);      %Gráfica 4
plot(tiempototalDER/1000,objetivoDER,'g','LineW
idth',3);
title([texto ]; 'Tiempo en Alcanzar los Objetivos:
Brazo DERECHO'));
xlabel('Tiempo Total [s]');
ylabel('Número de Objetivo Alcanzado');
grid on;

figure(3);
subplot(1,2,1);      %Gráfica 5

```

```

plot(tiempototalIZQ,xIZQ,'b','LineWidth',1.5);
title({'[texto ]'; 'Posición en X: Brazo IZQUIERDO'});
xlabel('Tiempo Total [ms]');
ylabel('Posición en X');
subplot(1,2,2);      %Gráfica 6
plot(tiempototalDER,xDER,'b','LineWidth',1.5);
title({'[texto ]'; 'Posición en X: Brazo DERECHO'});
xlabel('Tiempo Total [ms]');
ylabel('Posición en X');

```

```

figure(4);
subplot(1,2,1);      %Gráfica 7
plot(tiempototalIZQ,yIZQ,'m','LineWidth',1.5);
title({'[texto ]'; 'Posición en Y: Brazo IZQUIERDO'});
xlabel('Tiempo Total [ms]');
ylabel('Posición en Y');
subplot(1,2,2);      %Gráfica 8
plot(tiempototalDER,yDER,'m','LineWidth',1.5);
title({'[texto ]'; 'Posición en Y: Brazo DERECHO'});
xlabel('Tiempo Total [ms]');
ylabel('Posición en Y');

```

%OBTENCIÓN DE LAS RECTAS

```

for i=1:14
    syms x;
    eval(['y' num2str(i) '= (((x-espX(i))*(espy(i+1)-
espy(i)))/(espX(i+1)-espX(i))+espy(i))');
end

```

%CÁLCULO DE LA DISTANCIA A LA ESPIRAL POR SEGMENTO

```

%Cálculo para el lado IZQUIERDO
j = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
for i=1:length(xIZQ)
    if objetivoIZQ(i)==1
        DistRectIZQ01(j(1))=(abs ( (
(209485112588999*xIZQ(i))/10995116277760 ) -
yIZQ(i) + (-
11652466781104947/1099511627776)) / (

```

```

sqrt((209485112588999/10995116277760)^2+1)
);
    j(1)=j(1)+1;
    elseif objetivoIZQ(i)==2
        DistRectIZQ02(j(2))= (abs ( (
(95220521715169*xIZQ(i))/296868139499520 ) -
yIZQ(i) + (-
5320078501356727/7421703487488))) / (
sqrt((95220521715169/296868139499520)^2+1)
);
    j(2)=j(2)+1;
    elseif objetivoIZQ(i)==3
        DistRectIZQ03(j(3))= (abs ( ( (-
38088204288021*xIZQ(i))/35734127902720 ) -
yIZQ(i) + (- 5644444651518341/7146825580544))) / (
sqrt((38088204288021/35734127902720)^2+1)
);
    j(3)=j(3)+1;
    elseif objetivoIZQ(i)==4
        DistRectIZQ04(j(4))= (abs ( (
(99029317954715*xIZQ(i))/35184372088832 ) -
yIZQ(i) + (-
56708766636528425/35184372088832))) / (
sqrt((99029317954715/35184372088832)^2+1)
);
    j(4)=j(4)+1;
    elseif objetivoIZQ(i)==5
        DistRectIZQ05(j(5))= (abs ( (
(25392150852169*xIZQ(i))/167125767421952 ) -
yIZQ(i) + (-
75792898920273665/167125767421952))) / (
sqrt((25392150852169/167125767421952)^2+1)
);
    j(5)=j(5)+1;
    elseif objetivoIZQ(i)==6
        DistRectIZQ06(j(6))= (abs ( ( (-
147591821852651*xIZQ(i))/112699941847040 ) -
yIZQ(i) +
(281679773153820331/721279627821056))) / (

```

```

sqrt((-
147591821852651/112699941847040)^2+1) );
    j(6)=j(6)+1;
    elseif objetivoIzQ(i)==7
        DistRectIzQ07(j(7))= (abs ( (
(2550108225456225*xIzQ(i))/616484734773074
) - yIzQ(i) + (-
17964401333708598687335019542997/542265
7073835185789722427392))) / (
sqrt((2550108225456225/616484734773074)^2
+1) );
        j(7)=j(7)+1;
        elseif objetivoIzQ(i)==8
            DistRectIzQ08(j(8))= (abs ( (
(1496094036993874*xIzQ(i))/255010822545622
5) - yIzQ(i) + (-
7651504548993235188723392041799/7476996
389270241999952281600))) / (
sqrt((1496094036993874/2550108225456225)^
2+1) );
            j(8)=j(8)+1;
            elseif objetivoIzQ(i)==9
                DistRectIzQ09(j(9))= (abs ( ( (-
437057983103285*xIzQ(i))/1586043148121764
) - yIzQ(i) + (-
16524032373308132706792452657935/279019
66136229315403080269824))) / ( sqrt((-
437057983103285/1586043148121764)^2+1) );
                j(9)=j(9)+1;
                elseif objetivoIzQ(i)==10
                    DistRectIzQ10(j(10))= (abs ( ( (-
3172086824009110*xIzQ(i))/175372632395853
3) - yIzQ(i) + (-
179004060697262300/1753726323958533))) / (
sqrt((-
3172086824009110/1753726323958533)^2+1)
);
                    j(10)=j(10)+1;
                    elseif objetivoIzQ(i)==11

```

```

        DistRectIzQ11(j(11))= (abs ( (
(3794065070718273*xIzQ(i))/113174966054611
3) - yIzQ(i) + (-
1400569145831076560/1131749660546113))) /
(
sqrt((3794065070718273/1131749660546113)^
2+1) );
        j(11)=j(11)+1;
        elseif objetivoIzQ(i)==12
            DistRectIzQ12(j(12))= (abs ( (
(2011356323939007*xIzQ(i))/379406067267176
3) - yIzQ(i) + (-
7259715848680952444239746522283/1668645
5304360942620326756352))) / (
sqrt((2011356323939007/3794060672671763)^
2+1) );
            j(12)=j(12)+1;
            elseif objetivoIzQ(i)==13
                DistRectIzQ13(j(13))= (abs ( ( (-
1389379836448447*xIzQ(i))/441604419703674
0) - yIzQ(i) + (-
246456561432489757983797946197/19421967
773658499492305960960))) / ( sqrt((-
1389379836448447/4416044197036740)^2+1)
);
                j(13)=j(13)+1;
                elseif objetivoIzQ(i)==14
                    DistRectIzQ14(j(14))= (abs ( ( (-
2208021834635579*xIzQ(i))/113449412952997
2) - yIzQ(i) +
(6050885226238620971333066489855/4989557
948247262813998809088))) / ( sqrt((-
2208021834635579/1134494129529972)^2+1)
);
                    j(14)=j(14)+1;
                    end
                end
                %Cálculo de promedio de distancia lado
                IzQUIERDO
                PromI(1) = mean(DistRectIzQ01);

```

```
Proml(2) = mean(DistRectlZQ02);
Proml(3) = mean(DistRectlZQ03);
Proml(4) = mean(DistRectlZQ04);
Proml(5) = mean(DistRectlZQ05);
Proml(6) = mean(DistRectlZQ06);
Proml(7) = mean(DistRectlZQ07);
Proml(8) = mean(DistRectlZQ08);
Proml(9) = mean(DistRectlZQ09);
Proml(10) = mean(DistRectlZQ10);
Proml(11) = mean(DistRectlZQ11);
Proml(12) = mean(DistRectlZQ12);
Proml(13) = mean(DistRectlZQ13);
Proml(14) = mean(DistRectlZQ14);
%MOSTRANDO PROMEDIOS POR SEGMENTO
figure(5);      %Gráfica 9
plot(xlZQ,ylZQ,'g',espx,espy,'b','LineWidth',2);
title({'\fontsize{14}',texto,': Promedio de
Alejamiento' ]; '\color{blue} Espiral Original
\color{green} Espiral Dibujada: Brazo
IZQUIERDO');
xlabel('\fontsize{12}Posición en X');
ylabel('\fontsize{12}Posición en Y');
text (540, -525, '1');
text(560,-525,num2str(Proml(1)));
text (500, -570, '2');
text(525,-570,num2str(Proml(2)));
text (410, -540, '3');
text(435,-535,num2str(Proml(3)));
text (400, -440, '4');
text(420,-440,num2str(Proml(4)));
text (500, -350, '5');
text(520,-350,num2str(Proml(5)));
text (640, -430, '6');
text(665,-430,num2str(Proml(6)));
text (680, -580, '7');
text(700,-580,num2str(Proml(7)));
text (590, -690, '8');
text(615,-690,num2str(Proml(8)));
text (400, -720, '9');
text(380,-740,num2str(Proml(9)));
text (245, -600, '10');
text(280,-600,num2str(Proml(10)));
text (215, -390, '11');
text(260,-390,num2str(Proml(11)));
text (370, -210, '12');
text(345,-190,num2str(Proml(12)));
text (635, -195, '13');
text(670,-195,num2str(Proml(13)));
text (830, -360, '14');
text(805,-340,num2str(Proml(14)));
```

APÉNDICE D. CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA EL ESTUDIO PRELIMINAR

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA PARTICIPAR EN UN ESTUDIO DE INGENIERÍA

TÍTULO DEL PROTOCOLO:

EXPERIMENTACIÓN CON EL SISTEMA MECATRÓNICO

Investigador principal: Dr. Octavio Díaz Hernández

Sede donde se realizará el estudio: Universidad Nacional Autónoma de México

Nombre del participante: _____

A usted se le está invitando a participar en este estudio de investigación dado que cumple con las características de los participantes propuestos en el protocolo del mismo.

Antes de decidir si participa o no, debe conocer y comprender cada uno de los siguientes apartados. Siéntase con absoluta libertad para preguntar sobre cualquier aspecto que le ayude a aclarar sus dudas al respecto.

Una vez que haya comprendido el estudio y si desea participar, se le pedirá que firme esta forma de consentimiento, de la cual se le entregará una copia firmada y fechada.

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El seguimiento de este estudio permitirá corroborar el correcto funcionamiento de un sistema mecatrónico aplicado en un estudio preliminar con diversos participantes sanos. Esto será de gran utilidad dado que servirá de base para el planteamiento y la realización de un estudio completo que se realizará posteriormente, el cual utilizará dicho sistema mecatrónico como una herramienta de apoyo en la rehabilitación de pacientes con accidente cerebrovascular.

Para verificar el funcionamiento del sistema mecatrónico se recopilará y analizará la información obtenida del desempeño de los voluntarios con el objetivo de obtener medidas más objetivas que puedan servir de referencia para realizar comparaciones entre pacientes sanos.

OBJETIVO DEL ESTUDIO

A usted se le está invitando a participar en un estudio de investigación cuyo objetivo consiste en verificar el correcto funcionamiento y adquisición de datos de un sistema mecatrónico desarrollado para la rehabilitación.

PROCEDIMIENTO DEL ESTUDIO

Al cumplir con las condiciones de participación en este estudio, y de aceptar su participación en el estudio, se procederá con el seguimiento de los siguientes pasos:

1. Realización de la Entrevista:

Se le aplicará un cuestionario donde el aplicador le solicitará información específica referente a su condición.

El cuestionario deberá ser resuelto de la manera más veraz posible haciendo hincapié en que la información recabada por este medio será de carácter confidencial de acceso único para usted y los investigadores relacionados con el estudio.

Al concluir la resolución del cuestionario deberá firmarlo para dar conformidad de lo que ha sentido y, además, el aplicador deberá verificar la claridad de sus respuestas y firmar la recepción de las mismas.

2. Aplicación de las Pruebas:

La información referente al lugar, los días y horarios de la aplicación de las pruebas será acordada mutuamente entre usted y el grupo de investigación, más concretamente con los aplicadores de la misma. La duración aproximada por prueba será de alrededor de 10 minutos.

Cada prueba consistirá en completar un recorrido en forma de espiral, el cual será marcado en una pantalla. La realización de dicho recorrido será guiada por usted mediante la manipulación de un mecanismo, al cual usted deberá dirigir sujetando su mango de madera con la mano correspondiente al brazo que desea entrenar, empezando por utilizar el brazo derecho. Al concluir el recorrido con este brazo, usted procederá a completarlo con el brazo izquierdo.

El aplicador de las pruebas será el encargado de indicarle la posición sugerida para la realización del ejercicio, así como de colocar la pantalla de la computadora y el mecanismo en la ubicación adecuada con sus conexiones necesarias para llevar a cabo con éxito la realización de la prueba. El aplicador también deberá preparar el programa con el que se realizará el ejercicio, y le dará las indicaciones pertinentes para comenzar la prueba.

Durante la ejecución de la prueba usted podrá observar en la pantalla el recorrido a completar y la ruta que ha trazado, además deberá indicar al aplicador cuando haya finalizado el recorrido, o bien, si desea detener o no el ejercicio para que sea éste quien realice la acción pertinente.

3. Análisis e Interpretación de Resultados:

En esta etapa se realizará la integración e interpretación de la información obtenida producto de la entrevista y de la realización de las pruebas en aras del cumplimiento del objetivo de la investigación, para lo cual, se obtendrá información de valor estadístico.

Además, se realizarán reportes de resultados que puedan ser fácilmente interpretados por cada uno de los participantes en caso de que requieran la entrega de los resultados y/o las conclusiones finales del estudio.

4. Entrega de Resultados:

Una vez concluida la realización de todas las pruebas, y si así lo desea, usted podrá solicitar sus resultados personales, así como los resultados finales del estudio.

BENEFICIOS DEL ESTUDIO

La realización de este estudio ayudará a corroborar que el sistema mecatrónico desarrollado funcione de manera adecuada cuando se comience a utilizar en un estudio con diversos participantes.

Además, este estudio demostrará a los participantes la capacidad que tienen para coordinar lo que observan en una pantalla con el movimiento de su brazo.

RIESGOS ASOCIADOS CON EL ESTUDIO

Este estudio es de bajo riesgo, sin embargo, la realización de un movimiento en la dirección incorrecta puede resultar en una lesión. Las lesiones que pueden presentarse son torceduras de muñeca, de codo o de hombro.

USO Y CONFIDENCIALIDAD DE LOS DATOS

Toda la información que plasme en este y posteriores documentos, así como su identidad, serán protegidos y tratados con total discreción.

Los datos que se obtengan de su participación serán utilizados únicamente con fines de investigación y solamente por parte del equipo de investigadores que desempeña su labor en el estudio, guardándose

siempre sus datos personales en un lugar seguro de tal manera que ninguna persona ajena pueda acceder a esta información.

En ningún caso se harán públicos sus datos personales, siempre garantizando la plena confidencialidad de los datos y el riguroso cumplimiento del secreto profesional en el uso y manejo de la información y el material obtenidos.

ACLARACIONES

- Su decisión de participar en el estudio es completamente voluntaria.
- De no aceptar la invitación no habrá consecuencias desfavorables.
- Si decide participar en el estudio puede retirarse en el momento que desee, pudiendo informar o no las razones de su decisión, lo cual será respetado en su integridad.
- No tendrá que hacer gasto alguno durante el estudio.
- No recibirá pago por su participación.
- Podrá solicitar información actualizada durante el transcurso del estudio al investigador responsable.
- La información obtenida en este estudio será mantenida con estricta confidencialidad por el grupo de investigadores.
- En caso de que desarrolle algún efecto adverso secundario no previsto, tiene derecho a una indemnización, siempre que estos efectos sean consecuencia de su participación en el estudio.
- Si considera no tener dudas ni preguntas referentes a su participación, puede, si así lo desea, firmar la carta de consentimiento informado que forma parte de este documento.

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Por la presente yo, _____ he leído y comprendido la información anterior y mis preguntas han sido respondidas de manera satisfactoria. He sido informado y entiendo que los datos obtenidos en el estudio pueden ser analizados, discutidos, publicados o difundidos con fines científicos; con el conocimiento de que nunca seré identificado y siempre se mantendrá el anonimato y confidencialidad de mi identidad personal.

También comprendo que, en cualquier momento y sin necesidad de dar ninguna explicación, puedo revocar el consentimiento que ahora presento.

Estoy enterado(a) que este estudio es confidencial y libre de costo. Recibiré una copia firmada y fechada de esta forma de consentimiento.

Tomando en cuenta todo ello en consideración y en tales condiciones, AUTORIZO Y ACEPTO participar en este estudio de investigación.

_____ Fecha: _____

Nombre y firma del participante o del padre o tutor

_____ Fecha: _____

Nombre y firma del primer testigo

_____ Fecha: _____

Nombre y firma del segundo testigo

En caso de cualquier duda puede comunicarse con el Dr. Octavio Díaz Hernández al correo electrónico ing_octaviোধ@hotmail.com o bien, con Sandra García al correo electrónico garciav.sandram@gmail.com.

Esta parte debe ser completada por el Investigador (o su representante):

He explicado al Sr(a). _____ la naturaleza y los propósitos de la investigación; le he explicado además los riesgos y beneficios que implica su participación. He contestado a sus preguntas en la medida de lo posible y he preguntado si existen dudas.

Acepto que he leído y conozco la normatividad correspondiente para realizar investigación con seres humanos y me apego a ella.

Una vez concluida la sesión de preguntas y respuestas, se procedió a firmar el presente documento.

Nombre y firma del investigador

Fecha: _____

APÉNDICE E. CUESTIONARIO APLICADO EN EL ESTUDIO PRELIMINAR

FORMATO DEL CUESTIONARIO PARA VOLUNTARIOS

Este cuestionario se encuentra dirigido a los participantes del proyecto:

EXPERIMENTACIÓN CON EL SISTEMA MECATRÓNICO

Investigador principal: Dr. Octavio Díaz Hernández

Indicaciones

Con el fin de conocer información que será de utilidad para la presente investigación, le solicitamos su colaboración para el llenado de este cuestionario de la manera más veraz posible.

Para el llenado de preguntas puede marcar con una X la respuesta de su elección.

Recuerde que la información que aquí plasme será de carácter confidencial y de consulta exclusiva suya y de los investigadores del estudio.

De antemano se le agradece su disposición para el llenado del mismo.

Datos Generales

Nombre del participante: _____

Sexo: Hombre () Mujer ()

Cuestionario

1. *¿Cuál es su brazo dominante?*

Izquierdo () Derecho () Ambos ()

Firmas

_____ Fecha: _____

Firma del participante encuestado o del padre o tutor

_____ Fecha: _____

Nombre y firma del aplicador del cuestionario

APÉNDICE F. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE LA COORDINACIÓN MOTORA EN PACIENTES POST-ACCIDENTE CEREBROVASCULAR

Investigador principal: Dr. Octavio Díaz Hernández

Sede donde se realizará el estudio: Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

El Accidente Cerebrovascular

La Organización Mundial de la Salud define el evento vascular cerebral o accidente cerebrovascular como el *desarrollo rápido de signos clínicos indicativos de trastorno focal o global de la función cerebral, con síntomas que persisten 24 o más horas o que conducen a la muerte sin que exista una causa aparente distinta de la vascular* [1].

Según la naturaleza de la lesión, los accidentes cerebrovasculares pueden ser *isquémicos* o *hemorrágicos*. Un accidente *hemorrágico* consiste en una extravasación de sangre intracranialmente debido a la *ruptura de un vaso*, mientras que en el *isquémico* se *disminuye el flujo sanguíneo* cerebral, lo cual produce una necrosis tisular por daño neuronal irreversible (infarto cerebral) [1]. La proporción es de un 85% para la isquémica y un 15% para la hemorrágica [2].

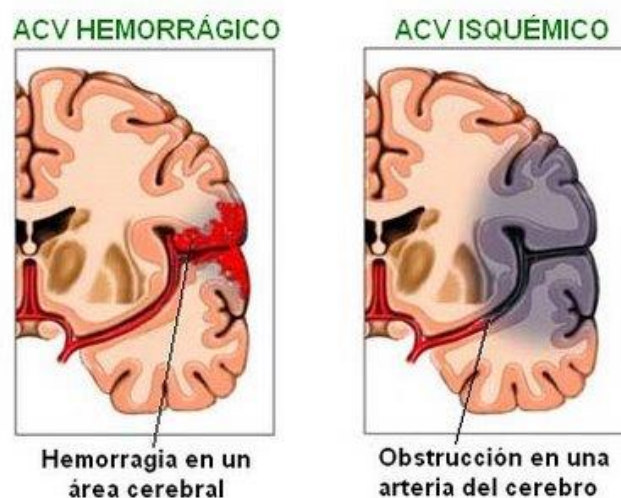


Figura 94. ACV Hemorrágico e Isquémico [3].

Epidemiología

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la enfermedad vascular cerebral es la segunda causa global de muerte (9.7 %) [4].

A nivel mundial la Enfermedad Vascular Cerebral tiene una prevalencia de 500 a 700 casos por 100 000 habitantes. La OMS reporta una media de 200 casos nuevos por 100 000 habitantes [5].

Aproximadamente 15 millones de personas alrededor del mundo sufren de un ACV cada año [6].

En México, en el año 2008 pasó a ser la tercera causa de mortalidad con más de 30 000 fallecimientos. Siendo también la cuarta causa de muerte en personas mayores de 65 años y la séptima en sujetos de 15 a 65 años de edad [5].

El ACV es la principal causa de discapacidad en el adulto, causando una mayor gama de discapacidades que otras condiciones, debido a ello, la mitad de los sobrevivientes del ACV dependen de otros para realizar sus actividades diarias.

Entre los sobrevivientes del ACV aproximadamente [6]:

- 42% será independiente
- 22% tiene una discapacidad leve
- 14% tienen discapacidad moderada
- 10% tienen discapacidad severa
- 12% tienen discapacidad muy severa.

Aproximadamente el 50% de las personas que tuvieron la experiencia de un ACV, necesitan de los servicios de rehabilitación y presentan limitaciones funcionales o secuelas que repercuten en las actividades propias del individuo y en su participación con el medio ambiente [10]. Y el 40% de los pacientes con ACV necesita específicamente de los servicios de *rehabilitación activa* [1].

De manera más particular, las dificultades más comunes que presentan los pacientes tras un ACV son: dificultades en el movimiento general con un 80% de personas afectadas, dificultades en el movimiento del brazo con un 70%, e incapacidad de utilizar un brazo a largo plazo [6].

Aplicación de la robótica en la rehabilitación

Un robot terapéutico es un sistema que detecta los movimientos del usuario, utiliza esta información para ajustar parámetros y provee retroalimentación visual y sensitiva al paciente. Son dispositivos no invasivos, de fácil control, con poco riesgo para el paciente, y buena efectividad para el tratamiento.

El uso de equipos robóticos en rehabilitación puede proporcionar un tratamiento interactivo que cumple con la recomendación del manejo fisioterapéutico que indica la realización de tareas específicas, tempranas, repetitivas, intensas, activas y pertinentes para las actividades de la vida diaria [8-12].

Las metas son: facilitar el trabajo del terapeuta físico u ocupacional, y lograr una rehabilitación óptima que ofrezca las siguientes ventajas: reproducibilidad, programas orientados a tareas específicas, progresión cuantificada, actividades lúdicas [13].

El uso de robots en la rehabilitación tiene dos aplicaciones fundamentales:

- 1) Almacenar información de la realización del movimiento activo del paciente (posición, velocidad y fuerza), la cual apoya en la evaluación de la evolución de la terapia sobre las personas.
- 2) Incorporar la información proveniente del usuario para realizar el control autoadaptativo del sistema de rehabilitación robótica [14].

Los robots se han empleado en la rehabilitación desde los años 1960s, en ese entonces su enfoque era el remplazo de funciones perdidas utilizando órtesis robóticas, sillas de ruedas robóticas, dispositivos para alimentación y estaciones de trabajo. En las últimas décadas se han incrementado las investigaciones que utilizan robots como apoyo para la terapia física, ello se debe a que los robots realizan tareas repetitivas y pueden ser diseñados para modificar la fuerza que utilizan en la ejecución de los ejercicios, lo cual reduce la carga de trabajo del terapeuta, permitiéndole supervisar simultáneamente el tratamiento de varios pacientes. Además, los dispositivos robóticos pueden utilizarse para un diagnóstico con mayor objetividad empleando datos cuantitativos que se obtienen utilizando los sensores adecuados.

Los robots que se emplean para propósitos de terapia física utilizan un control de retroalimentación activa para proveer guía, asistencia o resistencia a los pacientes durante la realización de sus ejercicios de rehabilitación.

Finalmente, los sistemas robóticos pueden aportar una interfaz gráfica de usuario diseñada para captar la atención del paciente, lo que permite que la rehabilitación se realice a modo de videojuegos que utilizan realidad virtual en donde se indica la trayectoria que el paciente debe seguir para alcanzar su objetivo. Esto, sin lugar a dudas, permite tener ejercicios de rehabilitación orientados a metas, aportando una mayor motivación al paciente [15].

Planteamiento del Problema

Considerando que el accidente cerebrovascular es la principal causa de discapacidad en México y a nivel mundial, y tomando en cuenta que, aproximadamente la mitad de las personas que lo han padecido requieren de servicios de rehabilitación, con un 40% de ellos que necesitan rehabilitación activa, se ha encontrado la necesidad de buscar alternativas que ayuden a los terapeutas a brindar terapias físicas de calidad en donde la fatiga del terapeuta no limite la intensidad de los ejercicios de rehabilitación, siendo una de ellas el uso de sistemas robóticos o mecatrónicos.

Se han observado diferentes beneficios relacionados con estos dispositivos, entre ellos la reeducación motriz, incremento en la fuerza, mejoría de la coordinación, modificaciones al tono muscular, disminución del costo energético, mayor independencia funcional, entre otras.

En la revisión de Rodríguez et al. se encontró que terapias robóticas aportan igual efectividad que la terapia convencional bajo los mismos parámetros de intensidad y tiempo de tratamiento, pero con estudios poco concluyentes, aun cuando algunos parecen reflejar mejoras significativas en la función motora y en la fuerza comparado con el tratamiento convencional, principalmente si su aplicación es sumada a la convencional [25].

Dado que no se han encontrado muchos estudios en la Ciudad de México referidos al uso de tecnologías de la información y su relación con el progreso de los pacientes en la recuperación de la coordinación motora, nos hemos propuesto una pregunta de investigación a resolver.

Pregunta de Investigación

¿Afecta la asistencia de un sistema mecatrónico en la recuperación de la coordinación motora de pacientes tras padecer un accidente cerebrovascular?

Objetivo

Investigar la relación existente entre la recuperación de la coordinación motora del brazo en el paciente post-accidente cerebrovascular y el uso de una terapia con un sistema mecatrónico auxiliar en su evaluación y recuperación.

Hipótesis

Una vez identificada la influencia del tratamiento de rehabilitación estudiado se podrá brindar asistencia a la rehabilitación de pacientes mediante su implementación en terapias, lo cual se reflejará en alcanzar la recuperación de la capacidad de coordinar los movimientos del brazo en un lapso menor de tiempo.

Justificación

El seguimiento de este estudio permitirá corroborar el funcionamiento de un sistema mecatrónico aplicado como asistencia en la rehabilitación del brazo de pacientes post-accidente cerebrovascular, específicamente en la recuperación de la coordinación motora. Para ello se recopilará y analizará la información obtenida del desempeño del paciente durante la realización de los ejercicios con el objetivo de obtener medidas más objetivas del progreso del mismo.

La importancia de implementar nuevas herramientas que ayuden a la rehabilitación de los pacientes se refleja en obtener una mejora del paciente en menor tiempo, una disminución de costos de las secuelas del accidente cerebrovascular y el aumento de la capacidad de rehabilitar a un mayor número de personas.

Metodología

Para el desarrollo de este proyecto se llevarán a cabo las siguientes acciones:

1. Diseño del Estudio

a) Tamaño de la muestra

Se seleccionará una muestra de pacientes con accidente cerebrovascular de cualquier etiología.

Los participantes deberán asistir a una terapia convencional de rehabilitación en una institución de rehabilitación por determinar.

El número de participantes será definido posteriormente.

b) Tipo de Investigación

Estudio experimental.

c) Criterios de Inclusión

- Pacientes con accidente cerebrovascular de cualquier etiología.
- Pacientes que se encuentren en la etapa de rehabilitación activa de uno o ambos brazos.
- Pacientes capaces de sujetar un objeto con la mano del brazo a rehabilitar.
- Pacientes capaces de comprender instrucciones.
- Pacientes dispuestos para firmar el formulario de consentimiento informado.
- Pacientes con signos vitales estables y sin condiciones médicas severas.
- Ausencia de epilepsia o más de seis meses sin crisis convulsivas secundarias.

d) Criterios de Exclusión

- Pacientes cuyo diagnóstico de accidente cerebrovascular no pueda confirmarse.
- Pacientes que presenten plejía o parálisis en el brazo que se desea rehabilitar.

- Pacientes con fracturas inestables o antecedentes de osteoporosis severa.
- Pacientes cuya capacidad de orientarse se encuentra disminuida.
- Pacientes con limitaciones senso-perceptivas.
- Pacientes con dependencia al alcohol o las drogas.
- Pacientes con espasticidad severa.

e) Criterios de Eliminación

- Pacientes que por algún motivo abandonaron el estudio.
- Pacientes que presenten complicaciones o dolor intenso durante la realización de las pruebas.
- Pacientes que se hayan fracturado.

f) Planes de Reclutamiento

Se realizará una convocatoria en clínicas de rehabilitación requiriendo personas que estén interesadas en participar en el estudio de investigación. Dicha convocatoria se llevará a cabo en una institución dedicada a la rehabilitación, la cual será determinada.

g) Definición de Grupos

Para la asignación de los grupos de estudio se realizará por medio de un muestreo aleatorio simple, el cual consistirá en utilizar una lista aleatoria generada por la computadora y numerada secuencialmente, colocada en sobres opacos. Una vez que el participante haya firmado su consentimiento, se abrirá el siguiente sobre para determinar el tipo de tratamiento que recibirá.

Este muestreo dará como resultado la definición de los siguientes grupos:

- *Grupo Control:*
Los participantes que formen parte del grupo control realizarán las pruebas exclusivamente para evaluar la recuperación de su capacidad para coordinar el brazo obtenida gracias al seguimiento de la terapia convencional.
- *Grupo Experimental:*
Los participantes que formen parte del grupo prueba realizarán las pruebas para evaluar la recuperación de su capacidad para coordinar el brazo obtenida gracias a la terapia convencional en conjunto con la realización de pruebas adicionales que les permitirán practicar con mayor frecuencia el ejercicio de rehabilitación, para lo cual deberán realizar un mayor número de sesiones.

h) Definición de Variables

Durante la realización de este estudio se dará seguimiento a las siguientes variables.

Variable	Definición Operacional	Tipo de Variable	Indicador
Tiempo de realización del ejercicio	Período determinado durante el que se realiza el recorrido de la prueba.	Cuantitativa	Milisegundos [ms]
Número de sesiones	Cantidad de veces que se realizarán las pruebas.	Cuantitativa	Número cardinal

2. Entrega de Documentación:

A cada una de las personas que cumplan con los criterios descritos anteriormente se les dará la invitación para participar en el estudio. Es necesario informar a los participantes acerca de los fundamentos del estudio y su objetivo a alcanzar, así como los derechos con los que cuenta, si se le dará alguna compensación por su participación, y los beneficios y riesgos que el estudio podría implicar. Es por esta razón que se hará entrega de un documento a cada participante que contenga la información descrita anteriormente. La entrega de estos documentos será convenida por los investigadores y los participantes.

Además, se les responderán todas las dudas que pudiera tener al respecto antes de proceder a obtener el consentimiento por escrito de la participación, el cual se dará mediante la firma de la Carta de Consentimiento Informado para Participar en una Investigación de Ingeniería.

Por otro lado, si el participante deseara retirarse del estudio en cualquier momento del transcurso del mismo, podrá retirarse sin necesidad de expresar los motivos que lo llevaron a tomar esa decisión, únicamente deberá firmar la Carta de Revocación del Consentimiento.

3. Realización de la Entrevista:

Una vez que se obtenga el consentimiento de cada uno de los participantes se les aplicará un cuestionario donde el aplicador les solicitará información personal y específica referente a la condición del accidente cerebrovascular que padeció.

El cuestionario deberá ser resuelto de la manera más veraz posible haciendo hincapié en que la información recabada por este medio será de carácter confidencial de acceso único del participante y los investigadores relacionados con el estudio.

Al concluir la resolución del cuestionario se requerirá que cada participante firme su cuestionario para dar conformidad de lo que ha sentado y, además, el aplicador deberá verificar la claridad de las respuestas brindadas por el participante y firmará la recepción de las mismas.

4. Aplicación de las Pruebas:

La información referente al lugar, los días y horarios de la aplicación de las pruebas será acordada mutuamente entre cada participante y el grupo de investigación, considerando la pertenencia de cada participante al grupo control o al grupo experimental.

A cada participante se le explicará la manera en que se realizarán las pruebas, así como se resolverán todas las dudas referentes a su ejecución que pudieran surgirle.

Cada prueba consistirá en completar un recorrido en forma de espiral, el cual será marcado en una pantalla. La realización de dicho recorrido se llevará a cabo por el participante mediante la manipulación de un mecanismo que deberá dirigir sujetando su efector final con la mano correspondiente al brazo afectado.

El aplicador de las pruebas será el encargado de indicar a cada participante la posición sugerida para la realización del ejercicio, así como de colocar la pantalla de la computadora y el mecanismo en la ubicación adecuada con sus conexiones necesarias para llevar a cabo con éxito la realización de la prueba. El aplicador también deberá preparar el programa con el que se realizará el ejercicio, y dará las indicaciones pertinentes al participante para comenzar la prueba.

Durante la ejecución de la prueba los participantes podrán observar en la pantalla el recorrido a completar y la ruta que han trazado, además deberán indicar al aplicador cuando haya finalizado el recorrido, o bien, si desea detener o no el ejercicio para que sea éste quien realice la acción pertinente.

5. Análisis e Interpretación de Resultados:

En esta etapa se realizará la integración e interpretación de la información obtenida producto de la entrevista y de la realización de las pruebas en aras del cumplimiento del objetivo de la investigación, para lo cual, se obtendrá información de valor estadístico.

Para la realización del procesamiento de los datos obtenidos de cada prueba realizada por un usuario se optó por realizar un programa que pudiera acceder a los datos almacenados en los archivos de texto para posteriormente realizar sus gráficas correspondientes. A partir de ello se puede realizar la comparación entre la espiral original que se desea el usuario trace, y la espiral que el usuario logró trazar con la manipulación del mecanismo.

Además, tomando en cuenta la realización de diferentes sesiones del juego, se podría comparar el progreso de sesión a sesión observando los resultados del trazo y del tiempo en que se completó.

Además, se realizarán reportes de resultados que puedan ser fácilmente interpretados por cada uno de los participantes en caso de que requieran la entrega de los resultados y/o las conclusiones finales del estudio.

6. Entrega de Resultados:

Una vez concluida la realización de todas las pruebas, y si así lo desean, los participantes podrán solicitar sus resultados personales, así como los resultados finales del estudio, los cuales deberán ser otorgados por los investigadores encargados en el lugar y fecha que sean determinados.

7. Redacción del Artículo:

Se procederá a la escritura y posterior revisión de un artículo de investigación que reporte las actividades realizadas y los resultados obtenidos de la realización de esta investigación.

8. Envío del Artículo:

El artículo obtenido será enviado a su publicación en un congreso o revista por determinar para realizar la difusión del mismo y de los resultados obtenidos con la investigación realizada.

Consideraciones Éticas

- Respeto por las personas (autonomía) y sus decisiones.
- El estudio no tendrá consecuencias desfavorables, es decir, no se buscará la maleficencia, por el contrario, se pretende causar un bien o beneficencia (hacer el bien).
- Justicia (exclusión).
- Los datos que se obtengan de la participación de cada persona serán utilizados únicamente con fines de investigación y solamente por parte del equipo de investigadores que desempeña su labor en el estudio, guardándose siempre dichos datos en un lugar seguro de tal manera que ninguna persona ajena pueda acceder a esta información.
- Se requerirá del consentimiento informado de cada una de las personas que acepten participar en el estudio aportándoles de esta manera toda la información referente al objetivo del estudio y aclarando las dudas referentes a su participación.
- La presente investigación se apeg a los Códigos de Ética Internacionales de la Declaración de Helsinki, así como al reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud vigente en México.

Cronograma de Actividades

AÑOS: 2017-2018

Actividad/Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Escritura y corrección del protocolo de investigación	X												
Presentación y revisión del trabajo	X												
Publicación de la convocatoria		X	X										
Registro de candidatos		X	X										
Entrega de documentación			X										
Realización de entrevistas			X	X									
Aplicación de pruebas				X	X	X	X	X	X	X	X		
Análisis de datos												X	
Presentación de resultados												X	X
Redacción de informes de resultados												X	X
Entrega de resultados a los participantes													X
Redacción del artículo													X
Envío del artículo													X

Referencias

- [1] E. M. Garzas Cejudo, *Accidentes Cerebrovasculares Qué, Cómo y Por qué*, 3 ed. Alcalá la Real: Formación Alcalá, 2006.
- [2] E. D. B. Díez Tejedor, O.; Álvarez Sabín, J.; Muñoz, M.; Abiusi, G., "Clasificación de las enfermedades cerebrovasculares. Sociedad Iberoamericana de Enfermedades Cerebrovasculares," *Revista Médica de Neurología*, vol. 33 pp. 455-464, 2001.
- [3] M. Muñoz. (2015, Septiembre 20). *Accidentes cerebrovasculares*. Available: <http://acvudea.blogspot.mx/p/antes-un-breve-recuento.html>
- [4] M. D. Morfín Balboa. (2014, Protocolo Asociación de las cifras de presión arterial con el pronóstico funcional en pacientes con enfermedad vascular cerebral aguda en el IMSS, UMAE N° 14, Veracruz,Veracruz.
- [5] Instituto Mexicano del Seguro Social, "Vigilancia y Prevención Secundaria de la Enfermedad Vascular Cerebral en el Primer Nivel de Atención," ed. México, 2015.
- [6] Stroke Association. (2013, Stroke statistics.
- [7] I. M. G. Devesa Gutiérrez, María Elena; Baldomero Hernández Hernández, Miguel Ángel; Mancera Cruz, Héctor Antonio, "Rehabilitación del paciente con enfermedad vascular cerebral (EVC)," *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 26 pp. 94-108, 2014.
- [8] M. T. Flores García, "Intervenciones para mejorar la función motora en el paciente con ictus," *Rehabilitación (Madrid)*, vol. 34 pp. 423-437, 2000.
- [9] M. A. Buide, "Grado de eficacia del tratamiento kinésico frente a las AVD en pacientes con hemiplejía post ACV," Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad FASTA, 2012.
- [10] S. C. N. Cramer, Randolph J., *Brain Repair After Stroke*, 1 ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 2010.
- [11] E. H. A. Acosta Arámburo, Hermelinda; Devesa Gutiérrez, Ignacio, "Eficacia de la neurorrehabilitación de miembro torácico mediante terapia robótica en enfermedad vascular cerebral. Revisión sistemática," *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 27 pp. 17-23, 2015.
- [12] Á. Arias Cuadrado, "Rehabilitación del ACV: evaluación, pronóstico y tratamiento," *Galicia Clínica*, vol. 70 pp. 25-40, 2009.
- [13] P. Loeza Magaña, "Introducción a la rehabilitación robótica para el tratamiento de la enfermedad vascular cerebral: revisión," *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 27 pp. 44-48, 2015.
- [14] C. P. P. Meneses Castaño, Yuly; Pinzón Bernal, Mónica Yamile; Castellanos Ruíz, Julialba "Aplicación de la terapia robótica para el tratamiento de la mano espástica del adulto con hemiplejía. Artículo de revisión," *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 27 pp. 80-85, 2016.
- [15] S. S. Q. Xie, *Advanced Robotics for Medical Rehabilitation Current State of the Art and Recent Advances* vol. 108: Springer, 2016.

APÉNDICE G. CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA PARTICIPAR EN UN ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA

TÍTULO DEL PROTOCOLO:

ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE LA COORDINACIÓN MOTORA EN PACIENTES POST-ACCIDENTE CEREBROVASCULAR

Investigador principal: Dr. Octavio Díaz Hernández

Sede donde se realizará el estudio: Universidad Nacional Autónoma de México

Nombre del participante: _____

A usted se le está invitando a participar en este estudio de investigación dado que cumple con las características de los participantes propuestos en el protocolo del mismo.

Antes de decidir si participa o no, debe conocer y comprender cada uno de los siguientes apartados. Siéntase con absoluta libertad para preguntar sobre cualquier aspecto que le ayude a aclarar sus dudas al respecto.

Una vez que haya comprendido el estudio y si desea participar, se le pedirá que firme esta forma de consentimiento, de la cual se le entregará una copia firmada y fechada.

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Considerando que el accidente cerebrovascular es la principal causa de discapacidad en México y a nivel mundial, y tomando en cuenta que, aproximadamente la mitad de las personas que lo han padecido requieren de servicios de rehabilitación, con un 40% de ellos que necesitan rehabilitación activa, se ha encontrado la necesidad de buscar alternativas que ayuden a los terapeutas a brindar terapias físicas de calidad en donde la fatiga del terapeuta no limite la intensidad de los ejercicios de rehabilitación, siendo una de ellas el uso de sistemas robóticos o mecatrónicos.

El seguimiento de este estudio permitirá corroborar el funcionamiento de un sistema mecatrónico aplicado como asistencia en la rehabilitación del brazo de pacientes post-accidente cerebrovascular, específicamente en la recuperación de la coordinación motora. Para ello se recopilará y analizará la información obtenida del

desempeño del paciente durante la realización de los ejercicios con el objetivo de obtener medidas más objetivas del progreso del mismo.

La importancia de implementar nuevas herramientas que ayuden a la rehabilitación de los pacientes se refleja en obtener una mejora del paciente en menor tiempo, una disminución de costos de las secuelas del accidente cerebrovascular y el aumento de la capacidad de rehabilitar a un mayor número de personas.

OBJETIVO DEL ESTUDIO

Investigar la relación existente entre la recuperación de la coordinación motora del brazo en el paciente post-accidente cerebrovascular y el uso de una terapia con un sistema mecatrónico auxiliar en su evaluación y recuperación.

PROCEDIMIENTO DEL ESTUDIO

Al cumplir con las condiciones de participación en este estudio, y de aceptar su participación en el estudio, se procederá con el seguimiento de los siguientes pasos:

9. Realización de la Entrevista:

Se le aplicará un cuestionario donde el aplicador le solicitará información personal relacionada a sus actividades cotidianas antes y después del accidente cerebrovascular, así como información específica referente a su condición.

El cuestionario deberá ser resuelto de la manera más veraz posible haciendo hincapié en que la información recabada por este medio será de carácter confidencial de acceso único para usted y los investigadores relacionados con el estudio.

Al concluir la resolución del cuestionario deberá firmarlo para dar conformidad de lo que ha sentido y, además, el aplicador deberá verificar la claridad de sus respuestas y firmar la recepción de las mismas.

10. Aplicación de las Pruebas:

La información referente al lugar, los días y horarios de la aplicación de las pruebas será acordada mutuamente entre usted y el grupo de investigación, más concretamente con los aplicadores de la misma. La duración aproximada por prueba será de alrededor de 10 minutos, sin embargo, este tiempo puede variar dependiendo del progreso que lleve en su recuperación de la coordinación motora.

Cada prueba consistirá en completar un recorrido en forma de espiral, el cual será marcado en una pantalla. La realización de dicho recorrido será guiada por usted mediante la manipulación de un

mecanismo, al cual usted deberá dirigir sujetando su efector final con la mano correspondiente al brazo afectado.

El aplicador de las pruebas será el encargado de indicarle la posición sugerida para la realización del ejercicio, así como de colocar la pantalla de la computadora y el mecanismo en la ubicación adecuada con sus conexiones necesarias para llevar a cabo con éxito la realización de la prueba. El aplicador también deberá preparar el programa con el que se realizará el ejercicio, y le dará las indicaciones pertinentes para comenzar la prueba.

Durante la ejecución de la prueba usted podrá observar en la pantalla el recorrido a completar y la ruta que ha trazado, además deberá indicar al aplicador cuando haya finalizado el recorrido, o bien, si desea detener o no el ejercicio para que sea éste quien realice la acción pertinente.

11. Análisis e Interpretación de Resultados:

En esta etapa se realizará la integración e interpretación de la información obtenida producto de la entrevista y de la realización de las pruebas en aras del cumplimiento del objetivo de la investigación, para lo cual, se obtendrá información de valor estadístico.

Además, se realizarán reportes de resultados que puedan ser fácilmente interpretados por cada uno de los participantes en caso de que requieran la entrega de los resultados y/o las conclusiones finales del estudio.

12. Entrega de Resultados:

Una vez concluida la realización de todas las pruebas, y si así lo desea, usted podrá solicitar sus resultados personales, así como los resultados finales del estudio.

BENEFICIOS DEL ESTUDIO

La realización de este estudio permitirá valorar con mayor objetividad el grado de mejoría de los pacientes post-accidente cerebrovascular y comprobar la eficacia del tratamiento robótico asistido propuesto.

RIESGOS ASOCIADOS CON EL ESTUDIO

Este estudio es de bajo riesgo, sin embargo, la realización de un movimiento en la dirección incorrecta puede resultar en una lesión. Las lesiones que pueden presentarse son torceduras de muñeca, de codo o de hombro.

USO Y CONFIDENCIALIDAD DE LOS DATOS

Toda la información que plasmé en este y posteriores documentos, así como su identidad, serán protegidos y tratados con total discreción.

Los datos que se obtengan de su participación serán utilizados únicamente con fines de investigación y solamente por parte del equipo de investigadores que desempeña su labor en el estudio, guardándose siempre sus datos personales en un lugar seguro de tal manera que ninguna persona ajena pueda acceder a esta información.

En ningún caso se harán públicos sus datos personales, siempre garantizando la plena confidencialidad de los datos y el riguroso cumplimiento del secreto profesional en el uso y manejo de la información y el material obtenidos.

ACLARACIONES

- Su decisión de participar en el estudio es completamente voluntaria.
- De no aceptar la invitación no habrá consecuencias desfavorables.
- Si decide participar en el estudio puede retirarse en el momento que desee, pudiendo informar o no las razones de su decisión, lo cual será respetado en su integridad.
- No tendrá que hacer gasto alguno durante el estudio.
- No recibirá pago por su participación.
- Podrá solicitar información actualizada durante el transcurso del estudio al investigador responsable.
- La información obtenida en este estudio será mantenida con estricta confidencialidad por el grupo de investigadores.
- En caso de que desarrolle algún efecto adverso secundario no previsto, tiene derecho a una indemnización, siempre que estos efectos sean consecuencia de su participación en el estudio.
- Si considera no tener dudas ni preguntas referentes a su participación, puede, si así lo desea, firmar la carta de consentimiento informado que forma parte de este documento.

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Por la presente yo, _____ he leído y comprendido la información anterior y mis preguntas han sido respondidas de manera satisfactoria. He sido informado y entiendo que los datos obtenidos en el estudio pueden ser analizados, discutidos, publicados o difundidos con fines científicos; con el conocimiento de que nunca seré identificado y siempre se mantendrá el anonimato y confidencialidad de mi identidad personal.

También comprendo que, en cualquier momento y sin necesidad de dar ninguna explicación, puedo revocar el consentimiento que ahora presento.

Estoy enterado(a) que este estudio es confidencial y libre de costo. Recibiré una copia firmada y fechada de esta forma de consentimiento.

Tomando en cuenta todo ello en consideración y en tales condiciones, AUTORIZO Y ACEPTO participar en este estudio de investigación.

_____ Fecha: _____

Nombre y firma del participante o del padre o tutor

_____ Fecha: _____

Nombre y firma del primer testigo

_____ Fecha: _____

Nombre y firma del segundo testigo

En caso de cualquier duda puede comunicarse con el Dr. Octavio Díaz Hernández al correo electrónico ing_octaviোধ@hotmail.com o bien, con Sandra García al correo electrónico garciav.sandram@gmail.com.

Esta parte debe ser completada por el Investigador (o su representante):

He explicado al Sr(a). _____ la naturaleza y los propósitos de la investigación; le he explicado además los riesgos y beneficios que implica su participación. He contestado a sus preguntas en la medida de lo posible y he preguntado si existen dudas.

Acepto que he leído y conozco la normatividad correspondiente para realizar investigación con seres humanos y me apego a ella.

Una vez concluida la sesión de preguntas y respuestas, se procedió a firmar el presente documento.

Nombre y firma del investigador

Fecha: _____

APÉNDICE H. CARTA DE REVOCACIÓN DEL CONSENTIMIENTO

Carta de Revocación del Consentimiento

TÍTULO DEL PROTOCOLO: ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE LA COORDINACIÓN MOTORA EN PACIENTES POST-ACCIDENTE CEREBROVASCULAR

Investigador principal: Dr. Octavio Díaz Hernández

Sede donde se realizará el estudio: Universidad Nacional Autónoma de México

Nombre del participante: _____

Por este conducto deseo informar mi decisión de retirarme de este protocolo de investigación por las siguientes razones **(opcional)**:

Si el voluntario así lo desea, podrá solicitar la entrega de toda la información recabada sobre él, con motivo de su participación en el presente estudio.

Fecha: _____

Nombre y firma del participante o del padre o tutor

Fecha: _____

Nombre y firma del primer testigo

_____ Fecha: _____

Nombre y firma del segundo testigo

c.c.p El voluntario.

APÉNDICE I. CUESTIONARIO

FORMATO DEL CUESTIONARIO INICIAL

Este cuestionario se encuentra dirigido a los participantes del proyecto:

ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE LA COORDINACIÓN MOTORA EN PACIENTES POST-ACCIDENTE CEREBROVASCULAR

Investigador principal: Dr. Octavio Díaz Hernández

Indicaciones

Con el fin de conocer información que será de utilidad para la presente investigación, le solicitamos su colaboración para el llenado de este cuestionario de la manera más veraz posible.

Para el llenado de preguntas puede marcar con una X la respuesta de su elección.

Recuerde que la información que aquí plasme será de carácter confidencial y de consulta exclusiva suya y de los investigadores del estudio.

De antemano se le agradece su disposición para el llenado del mismo.

Datos Generales

Nombre del participante: _____

Fecha del accidente cerebrovascular: _____

Edad: Menos de 18 años (); 18 a menos de 28 años (); 28 a menos de 38 años ();
38 a menos de 48 años (); 48 a menos de 58 años (); 58 a menos de 68 años ();
Más de 68 años ()

Sexo: Hombre () Mujer ()

Cuestionario

2. *¿Qué tipo de accidente cerebrovascular padeció?*

Isquémico () Hemorrágico ()

3. *¿Cuál es su brazo dominante?*

Izquierdo () Derecho () Ambos ()

4. *¿Cuál es el lado de la lesión?*

Izquierdo () Derecho () Ambos ()

5. *¿Cuál es el brazo que está rehabilitando?*

Izquierdo () Derecho () Ambos ()

6. *¿Cómo siente la fuerza de su brazo izquierdo?*

Normal (); Titubea después de cinco segundos ();
Cae después de cinco segundos (); No hay esfuerzo en contra de la gravedad ().

7. *¿Cómo siente la fuerza de su brazo derecho?*

Normal (); Titubea después de cinco segundos ();
Cae después de cinco segundos (); No hay esfuerzo en contra de la gravedad ().

Firmas

_____ Fecha: _____

Firma del participante encuestado o del padre o tutor

_____ Fecha: _____

Nombre y firma del aplicador del cuestionario