

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Pablo Aqueveque N.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

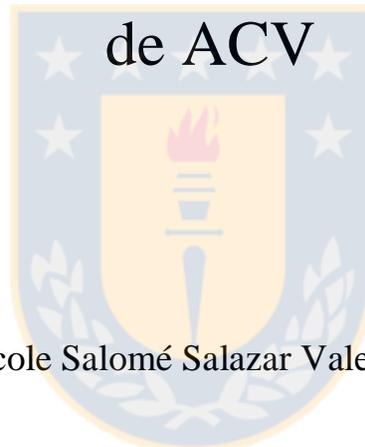
Ingeniero Civil Biomédico

Diseño y Pruebas de un Dispositivo para Generar Movimiento de Mano Pléjica Mediante Estimulación Eléctrica en Pacientes Secuelados de ACV

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Pablo Aqueveque Navarro

Diseño y Pruebas de un Dispositivo para Generar Movimiento de Mano Pléjica Mediante Estimulación Eléctrica en Pacientes Secuelados



Nicole Salomé Salazar Valenzuela

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Biomédico

Marzo 2017

Resumen

En este trabajo se investiga el accidente cerebrovascular y su incidencia hoy en Chile y en el mundo. Se da a conocer la enfermedad y sus clasificaciones, sus factores de riesgo y secuelas. De aquí nace la inquietud de la rehabilitación de aquellas personas secueledas de un accidente cerebrovascular, específicamente en aquellas secueledas de espasticidad. Se estudia la plasticidad del cerebro y su influencia en la rehabilitación. Se revisan los métodos de rehabilitación.

La rehabilitación del accidente cerebrovascular busca incorporar al paciente nuevamente en su vida. En Chile se hace una rehabilitación basada en sesiones con terapeutas según la etapa del ictus. En el mundo algunos centros hospitalarios cuentan con tecnologías para tratar o asistir al miembro superior. Algunas de estas tecnologías utilizan la electroestimulación para disminuir la espasticidad, aumentar el rango de movimiento de las articulaciones, mejorar la circulación sanguínea y recuperar el movimiento del miembro superior.

Se presentan los diferentes tipos de estimulación eléctrica y su efecto en el cuerpo enfatizando en la estimulación eléctrica funcional y en la terapia eléctrica funcional. Se observan las formas de aplicación y su efecto en la contracción muscular. Parámetros utilizados en la rehabilitación y lugares en que se aplica dependiendo del objetivo de la terapia. También se revisan los criterios de inclusión y de exclusión y se propone un protocolo a seguir en la realización de este procedimiento.

Finalmente se realizaron pruebas en una persona sana y en un paciente secueledado con hemiplejía espástica del miembro superior tras un ACV. Las pruebas con la persona sana se realizaron con el objetivo de probar el funcionamiento del sistema configurado en Matlab Simulink e interfaz con equipo RehaMove 2 (Hasomed). Para ajustar los parámetros de estimulación, tiempos de estimulación, configuración de una serie de ejercicios y ubicación correcta de los electrodos. Las pruebas con paciente secueledado se realizaron para comprobar el funcionamiento del sistema obteniendo los resultados esperados de movimientos de apertura y cierre de la mano con el objetivo de manipular objetos.



All knowledge I possess everyone else can acquire, but my heart is all my own.
Goethe

Agradecimientos

Quiero agradecerle a Dios por darme la vida y la fuerza necesaria para vivirla. Por regalarme a mi familia, a mis amigos y a todo quien se ha topado en mi camino para hacerme quien soy ahora. Por el hermoso mundo en el que vivo y toda su naturaleza.

Quiero agradecer a mi mamá y a mi papá por darme la vida y un hogar. Por enseñarme a caminar y a levantarme. Por ser mi apoyo, mi guía y mi motivación. Por darme siempre su amor, paz y tranquilidad. Por llenarme de abrazos y besos. Por darme sabiduría y alas para volar. Por darme salud y cuidarme en la enfermedad. Por darme la posibilidad de estudiar con todas las comodidades y seguridades para poder llegar a la meta. Me han enseñado a ser más fuerte y a sacar siempre lo mejor de mí.

Quiero agradecer a mi hermanita por entenderme y darme ánimos de superación, por los momentos de relajo y risas que siempre tenemos. Es quien sé cómo hacer reír y cómo hacer enojar. Me ha enseñado a ser perseverante y a perseguir los sueños hasta hacerlos realidad.

A mis queridos padrinos por darme ánimos de seguir adelante. Por darme todos los materiales necesarios para mi educación desde mis tijeras amarillas de pequeña hasta mi último portaminas. Por enseñarme cómo se gana el dinero para ir a casa y cómo servir un café conversado.

Quiero darle las gracias a mis sobrinos-primos por regalarme sus sonrisas, a mis primas y primos por las conversaciones de la vida, a mis tíos por todos los almuerzos, onces y cenas acogedoras, a mis abuelos por enseñarme el valor del trabajo y la excelencia y a mis abuelitas por su esfuerzo y sus comidas cariñosas. A quienes me sostuvieron en brazos y a quienes dejaron que los sostuviera.

Quiero darle gracias a mi pololo Camilo, quien me ha enseñado a disfrutar la vida con amor y alegría. Por todos los hermosos momentos juntos desde que nos conocimos hasta hoy. Por compartir los días de estudio y los de vacaciones. Por ser mi apoyo y compañero. Me ha enseñado que sin importar cuántas cosas tengas que hacer siempre hay tiempo para estar con las personas que amas.

A mis amigos de toda la vida Irma, Daniela, Ricardo y Mario con quienes compartí desde el toambo hasta las piscolas pasándolo bien desde los 7 años y acompañándome en todo momento. A mis amigos Francisca y Juan Pablo con quienes pasé mis mejores años de universidad riendo hasta

llorar. A mis amigas Catalina, Constanza, Francisca y Liza que siempre estuvieron para escucharme, para alegrar juntas y para salir a despejarse.

Quiero agradecer a mi profesor guía Pablo, quien durante la carrera me enseñó a pensar en mi futuro y superarme. A solucionar los problemas de inmediato y seguir adelante. Por confiar en mí en esta última etapa y brindarme todo lo necesario para cumplir mis metas. Dándome ánimo los días que me sentí insegura y respondiendo todas mis dudas.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis profesores de la Universidad por todos los conocimientos entregados. A don Ale y a la señorita Inés por su buena disposición, amabilidad y atención, y a todos los que fueron parte de esta linda etapa.



Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
ABREVIACIONES	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. INCIDENCIA DEL ACCIDENTE CEREBROVASCULAR	13
1.2. ESTADO DEL ARTE EN TECNOLOGÍAS DE ELECTROESTIMULACIÓN	13
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	16
1.4. OBJETIVOS	16
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	16
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	16
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	16
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	17
CAPÍTULO 2. ACCIDENTE CEREBROVASCULAR.....	18
2.1. ACCIDENTE CEREBROVASCULAR	18
2.1.1 <i>ACV isquémico y ACV hemorrágico</i>	18
2.2. FACTORES DE RIESGO.....	19
2.3. SECUELAS	19
2.3.1 <i>Perturbaciones Sensoriales</i>	20
2.3.2 <i>Entendimiento y Uso del Idioma</i>	20
2.3.3 <i>Alteraciones Cognitivas</i>	20
2.3.4 <i>Perturbaciones Emocionales</i>	20
2.3.5 <i>Complicaciones Físicas</i>	21
2.4. REORGANIZACIÓN CEREBRAL EN LA RECUPERACIÓN	22
2.5. ADAPTACIONES DEL CUERPO ANTE UNA HEMIPLEJIA	23
2.6. REHABILITACIÓN	25
2.6.1 <i>Rehabilitación de ACV en Chile</i>	25
2.6.2 <i>Tecnologías de Recuperación Funcional en el Mundo</i>	25
CAPÍTULO 3. REHABILITACIÓN CON ELECTROESTIMULACIÓN.....	31
3.1. ELECTROESTIMULACIÓN.....	31
3.1.1 <i>Formas de Aplicación</i>	31
3.1.2 <i>Tipos de Corrientes y su Efecto en el Cuerpo</i>	32
3.1.3 <i>Estimulación Eléctrica Funcional y Terapia Eléctrica Funcional</i>	32
3.2. APLICACIÓN DE LA ELECTROESTIMULACIÓN	33
3.2.1 <i>Fisiología de la contracción muscular</i>	33
3.2.2 <i>Reclutamiento</i>	34
3.2.3 <i>Contracción por Electroestimulación</i>	35
3.3. PARÁMETROS DE LA CORRIENTE.....	36
3.3.1 <i>Pulsos Bifásicos</i>	37
3.3.2 <i>Duración</i>	37
3.3.3 <i>Frecuencia</i>	37
3.3.4 <i>Amplitud</i>	38
3.3.5 <i>Modalidades</i>	39
3.4. ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA Y FUNCIONALIDAD DEL MIEMBRO SUPERIOR.....	40
3.5. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y DE EXCLUSIÓN	46
3.6. PROTOCOLO PARA LA TERAPIA	47
3.7. EVALUACIÓN	50
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	52
4.1. INTRODUCCIÓN	52
4.2. REHAMOVE 2 HASOMED	52

4.2.1 *Science Mode 2 y Matlab Simulink* 52

4.3. PARÁMETROS 55

4.4. PRUEBAS EN UNA PERSONA SANA 58

4.5. PRUEBAS EN PACIENTE SECUELADO 61

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES..... 72

5.1 RESULTADOS **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

5.2 CONCLUSIONES 72

5.3 TRABAJO FUTURO 73

BIBLIOGRAFÍA 74



Lista de Tablas

TABLA I Modalidades de Electroestimulación.....39
TABLA II Sesión de Terapia.....70



Lista de Figuras

Figura n° 1. Clasificación del accidente cerebrovascular.....	18
Figura n° 2. Accidente cerebrovascular hemorrágico y accidente cerebrovascular isquémico. [16].	19
Figura n° 3. En a) el sujeto realiza un movimiento de adaptación al querer tomar un objeto tras una debilidad en los músculos del hombro. En b) suelta el vaso con una debilidad del músculo abductor corto del pulgar generando un movimiento adaptativo. [19]	24
Figura n° 4. Armeo (Hocoma). Exoesqueleto para rehabilitación de brazo y mano. [35]	26
Figura n° 5. ALEx (Kinetek). Exoesqueleto para rehabilitación de la función del brazo. [36]	26
Figura n° 6. Saebo ReJoyce (Saebo). Estación de trabajo para personas con deterioro de la función del brazo y la mano. [37].....	27
Figura n° 7. Gloreha Professional 2 (Gloreha). Guante generador de movimientos. [41].....	27
Figura n° 8. NeuroMove900 Therapy (Zynex). Rehabilitación con estimulación eléctrica. [40].....	28
Figura n° 9. RT200 Elliptical (Restorative Therapies). En a) se observa una terapia de rehabilitación con EEf en silla elíptica y en b) con ejercicios de la vida cotidiana. [41].....	29
Figura n° 10. Órtesis de extensión (Saebo). En a) SaeboReach y en b) SaeboFlex. [38]	29
Figura n° 11. Órtesis H200 (Bioness). Dispositivo de asistencia para la vida diaria. [42]	30
Figura n° 12. Unidad Motora y Pool de neuronas. [22]	34
Figura n° 13. Tipos de unidad motora y sus características: diámetro del axón, velocidad de contracción, frecuencia de activación, fuerza y resistencia a la fatiga. [23]	35
Figura n° 14. Orden de reclutamiento de las unidades motoras en la contracción voluntaria. [23]...	35
Figura n° 15. Fuerza absoluta generada con estimulación eléctrica y fuerza máxima generada con contracción voluntaria máxima. El porcentaje de diferencia entre las fueras corresponde al déficit de fuerza dejado como suministro para evitar la fatiga. [23]	36
Figura n° 16. Pulsos bifásicos consecutivos. [25]	37
Figura n° 17. Fases de la corriente modulada: ON, trabajo, OFF y Pausa. [23]	39
Figura n° 18. Aplicación de estimulación eléctrica funcional con electromiografía. En a) se observa un par de electrodos en los extensores de la muñeca y en b) en el tríceps braquial. Entre ellos el electrodo de EMG. [19].....	40
Figura n° 19. Músculos del miembro superior vista posterior. [Netter lámina 427].....	42
Figura n° 20. Músculos flexores de la muñeca. Palmar mayor, palmar menor y cubital anterior. También se aprecia el retináculo flexor y la aponeurosis palmar. [Netter].....	44
Figura n° 21. Músculos flexores de los dedos. Flexor largo del pulgar, flexor común superficial de los dedos y músculo flexor profundo de los dedos. [Netter].....	45
Figura n° 22. Músculos de la mano. [Netter]	46
Figura n° 23. Ángulos de movimiento de la muñeca. En extensión $+70^\circ$, en neutro 0° y en flexión $+80^\circ$. [Modelado p46].....	48
Figura n° 24. Pronosupinación del antebrazo. En a) supinación en 90° , en b) neutro y en c) pronación en 85° . [Modelado p44].....	48
Figura n° 25. Botón de pánico (elaboración propia).	49
Figura n° 26. Equipo estimulador RehaMove2. [43]	52
Figura n° 27. Diagrama de simulink con la interfaz de usuario y bloque de estimulación real. [27]	53
Figura n° 28. Interfaz de parámetros de estimulación. [27]	55
Figura n° 29. Forma de onda de la corriente modulada (elaboración propia).....	56
Figura n° 30. Ejercicio de apertura-cierre en Simulink. Se observan las diferentes ganancias para cada estímulo (Gain) y los distintos valores de ancho de pulso (pulsewidth) (elaboración propia). ...	57

Figura n° 31. Corriente modulada en tres canales en el ejercicio de apertura y cierre de los dedos (elaboración propia).	58
Figura n° 32. Electrodo transcutáneo (elaboración propia).	58
Figura n° 33. Ubicación de los electrodos para realizar el movimiento de apertura (elaboración propia).	59
Figura n° 34. Ubicación de los electrodos para realizar el movimiento de cierre (elaboración propia).	60
Figura n° 35. Posiciones de la mano de un paciente sano durante la terapia FES. En a) se observa la posición de inicio o de descanso, en b) se observa el movimiento de la apertura de los dedos y en c) el movimiento de cierre de los dedos (elaboración propia).....	61
Figura n° 36. Rangos de movimiento de la muñeca en una persona sana [Modelado p233].....	62
Figura n° 37. Posición inicial de reposo del brazo de la paciente (elaboración propia).....	62
Figura n° 38. Posición correcta del paciente durante la terapia (elaboración propia).....	63
Figura n° 39. Ejercicio de apertura. En a) y en c) se observa la posición de la mano antes de aplicar la estimulación, en b) y en d) se observa la extensión de los dedos y de la muñeca con la estimulación (elaboración propia).	65
Figura n° 40. Ejercicio de apertura-cierre. En a) se observa la posición antes de aplicar la estimulación, en b) se observa la extensión de los dedos y en c) la flexión de los dedos para tomar el objeto (elaboración propia).	66
Figura n° 41. Desviación radial y desviación cubital de la mano. [Fundamentos p194]	67
Figura n° 42. Posiciones de los dedos extrínseca-plus e intrínseca-plus. [Fundamentos p244]	68



Nomenclatura

Mayúsculas

ECV	: Enfermedades Cardiovasculares.
ACV	: Accidente Cerebrovascular.
I.N.E.	: Instituto Nacional de Estadística.
O.M.S.	: Organización Mundial de la Salud.
EENM	: Electroestimulación Neuromuscular
EE	: Electroestimulación
EMG	: Electromiografía
EEF (FES)	: Estimulación Eléctrica Funcional (Functional Electrical Stimulation)
EET	: Estimulación Eléctrica Terapéutica
TENS	: Estimulación Nerviosa Transcutánea



Capítulo 1. Introducción

1.1. Incidencia del Accidente Cerebrovascular

En Chile las enfermedades del sistema circulatorio han sido la primera causa de muerte en los últimos años según el I.N.E. (2013) [1]. El accidente vascular encefálico agudo es el segundo de los cinco atenuantes de muerte luego del infarto agudo al miocardio [2]. A nivel mundial anualmente 15 millones de personas sufre de un accidente cerebrovascular de los que 5 millones mueren y 5 millones quedan permanentemente discapacitados [3]. De aquellas personas que logran estabilizarse un 15 a 30% de la población resulta con un deterioro funcional severo a largo plazo que genera discapacidad frecuentemente en uno de los dos hemicuerpos [4] [5]. A su vez se considera que más de un tercio de las personas con discapacidad tienen sobre 60 años de edad siendo 8,1% adultos mayores con discapacidad de parálisis o lisiados [6].

Las secuelas del ACV influyen en la calidad de vida generando dependencia de familiares y/o cuidadores de los afectados. El equipo multiprofesional procede en el tratamiento de rehabilitación del paciente con herramientas y medidas que ayudan con las pérdidas y limitaciones funcionales específicas individuales. La velocidad de recuperación depende de la severidad inicial del ictus. Los pacientes habitualmente tienen una recuperación funcional favorable durante las primeras semanas y para tener un cambio evolutivo a largo plazo se apela a la neuroplasticidad a través del fortalecimiento de las conexiones sinápticas con la experiencia. [5]

1.2. Estado del arte en tecnologías de electroestimulación

La aplicación de electricidad al cuerpo humano viene desde la época de Hipócrates en que filósofos y naturistas utilizaban la electricidad provocada por el pez torpedo como adormecedor ante el dolor. En el siglo XVIII Luigi Galvani descubrió que al pasar una corriente eléctrica por la médula espinal de una rana se podían obtener contracciones musculares [7]. En el siglo XX el profesor Kotz comenzó a utilizar corrientes en deportistas para mejorar el rendimiento deportivo y el trofismo muscular. Por otro lado la aplicación de prótesis en rehabilitación comenzó en los años 60 cuando Paul Bach & Rita desarrollaron una prótesis para ayudar a las personas no videntes descubriendo la neuroplasticidad del cerebro.

Morton Glanz (1996) utilizó estimulación eléctrica funcional en miembro superior e inferior de pacientes post ACV mejorando la fuerza y espasticidad muscular en un intervalo de confianza del

95% [8].

En el 2000 un grupo de profesionales del centro de ejercicios científicos del laboratorio de control motor y de la universidad de Florida utilizó EENM con EMG-triggered en personas con más de un año desde el ictus decreciendo la disfunción motora y aumentando la fuerza isométrica de contracción sostenida muscular en músculos extensores de los dedos y muñeca [9].

En el 2010 un grupo de seis profesionales universitarios y hospitalarios de España (Valencia) realizó un estudio aleatorizado de tratamiento de rehabilitación de mano hemipléjica espástica con electroestimulación después de un ictus. Examinaron el efecto de un protocolo de EENM en conjunto con rehabilitación convencional en el rango articular y en la fuerza de mano hemipléjica espástica causada por un ACV en un grupo de 52 adultos mayores. La EENM fue aplicada en los extensores de la muñeca y dedos 30 minutos, 3 días a la semana, durante 8 semanas. Se utilizaron medidas goniométricas y dinamométricas antes del tratamiento, pasadas 4 semanas y al finalizarlo para el análisis de resultados. Se obtuvieron mejoras significativas en el rango de movimiento: ángulo de reposo, extensión activa, extensión pasiva de la muñeca, ángulo de reposo de las articulaciones metacarpofalángicas y mejoras en la fuerza de la mano con fuerza de prensión y de pinza. El estudio no incluyó pacientes con hemiplejía completa de la mano, mano rígida, ni pacientes con evolución mayor a 18 meses desde el ictus. Se utilizó un equipo portátil marca Beac Medical IntelliSTIM BE 28-E para la EENM, aplicando corrientes de onda rectangular bifásica simétrica, frecuencia de 50Hz y duración del impulso 300 μ s. La terapia de rehabilitación convencional comprendió estiramientos, movilizaciones, terapia manual y reeducación de actividades de la vida diaria, 45-60 minutos, 2 a 3 veces a la semana. [10]

El año 2011, C. Criollo, D. López y M. Jojoa diseñaron un módulo electromecánico para la rehabilitación física de la mano derecha afectada como secuela de un ataque cerebrovascular. Se diseñó un sistema de circuitos electrónicos para la automatización y el control de una órtesis robótica para la mano hemiparética a nivel distal derecho de secuelados de ACV. Un sistema no invasivo de electromiografía detectaba la intencionalidad de movimiento a través de sensores de superficie registrando la actividad eléctrica del músculo, procesaba la señal biológica con filtros activos, amplificadores diferenciales y un sistema de puesta a tierra. La señal resultante oscilaba en un rango de 0 a 5V dependiendo de la fuerza muscular ejercida y se utilizaba para accionar los motores de la órtesis, determinando el tipo de movimiento basado en la frecuencia. El dispositivo contaba con ejercicios para la extensión y flexión de la mano y para la extensión y oposición del pulgar. [11]

El 2013, en la Universidad Nacional de La Plata, se realizó el diseño y desarrollo de un equipo electrónico con EE destinado a la rehabilitación de miembros superiores e inferiores paralizados de pacientes secueles de ACV, llamado Automioestimulador debido a la técnica de biofeedback aplicada. Este equipo estimulaba el miembro paralizado a partir de la contracción voluntaria del miembro sano a través de EMG, indicando inicio y fin de los intervalos de estimulación y de relajación involuntaria. La señal detectada era procesada por un microprocesador y la corriente de cada impulso era ajustable. Los resultados de este desarrollo fueron los esperados, logrando el funcionamiento del sistema en pruebas con personas sanas, sin embargo no fueron probados en pacientes con miembro superior hemipléjico. [12]

En el 2014, H. Ring y N. Rosenthal hicieron un estudio controlado de los efectos del uso de una neuroprótesis con EEF en miembro superior hemiparético de pacientes con secuelas de ACV no hemorrágico luego de 3 o más meses desde el evento. La utilización del dispositivo fue de al menos 3 horas, 3 días por semana, durante 6 semanas, en conjunto con terapia física. El dispositivo neuroprostético, órtesis de muñeca y mano ajustable al paciente, contenía un microprocesador controlado por un sistema de simulación y 5 electrodos que estimulaban 5 grupos de músculos para generar 6 diferentes modos de estimulación escalonada, 3 pares de ejercicios patrones terapéuticos y acondicionamiento muscular y 3 actividades: apertura de mano, compresión y agarre; amplitud y duración del pulso ajustable por el terapeuta. Al finalizar el estudio los pacientes presentaron mejoras de espasticidad, rango activo del movimiento y en el movimiento activo parcial; en los pacientes con dolor y edema también hubo mejoras sin reacciones adversas. La utilización de la EEF en conjunto con la terapia física tiene resultados positivos en la rehabilitación de pacientes con ACV no hemorrágico. [8]

Existen variadas tecnologías que ayudan en la rehabilitación del miembro superior. Automatizaciones de movimiento con dispositivos electromecánicos como el MIT-Manus, con dos o tres grados de libertad para movimiento muñeca, antebrazo y codo, que cuenta con un sistema de control que modula la forma en que el robot reacciona ante la perturbación mecánica del sujeto registrando movimientos, posición, velocidad y fuerza. También se encuentra el Amadeo System, sistema mecatrónico eléctrico cuyo sistema mueve los dedos incluyendo el pulgar a través de imanes de acuerdo a un patrón de movimiento seleccionado, evaluando rango de movimientos y de fuerza. Por otra parte, la electroterapia tiene buenos resultados para la rehabilitación a pesar de que su uso continuo puede producir dolor o edema en la zona de estimulación, la terapia combinada con

ejercicios, mejora y genera funciones de apertura, agarre y liberación, mejorando la conducta de los miembros con hemiparesia. Las neuroprótesis están basadas en la EEF o FES, estimulan los músculos paralizados activando las neuronas motoras en puntos de interés, logrando movimiento de los miembros superiores hemipléjicos; siendo sistemas no invasivos, de bajo costo. [13]

1.3. Definición del Problema

En Chile actualmente no se utiliza estimulación eléctrica funcional en la rehabilitación post ACV, sin embargo estas tecnologías tienen buenos resultados a nivel mundial. Es por esto que se estudia en profundidad el funcionamiento de la electroestimulación como método de rehabilitación motora en accidentados cerebrovasculares con hemiplejia o hemiparesia del miembro superior.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar y probar un dispositivo basado en estimulación eléctrica funcional para ayudar en la recuperación del movimiento de la mano pléjica en secueledos de ACV

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el problema de rehabilitación de mano pléjica en secueledos de ACV.
- Definir los movimientos que se quieren recuperar y generar con el dispositivo FES.
- Identificar los músculos que producen el movimiento y que se van a estimular.
- Identificar y generar los parámetros de estimulación y los puntos de aplicación.
- Diseñar e implementar un sistema que genere los principales movimientos del miembro superior mediante Estimulación Eléctrica Funcional (FES)
- Realizar pruebas en una persona sana y luego en un paciente secueledado para determinar la posible aplicación de esta técnica de estimulación en rehabilitación de secueledos de ACV.

1.5. Alcances y Limitaciones

Se realizaron pruebas en una persona sana y en un paciente secueledado de ACV con hemiplejia espástica para probar el funcionamiento del sistema FES según la teoría y la eficacia en la producción de movimientos funcionales. No se realizó un estudio en el tiempo para evaluar las mejoras en la paciente con el tratamiento de EEF ni se utilizaron test de evaluación de espasticidad o

de movilidad de la mano. Se utilizaron electrodos transcutáneos con el equipo estimulador RehaMove 2 disponible en laboratorio a través de la interfaz ScienceMode 2 en Matlab-Simulink.

1.6. Temario y Metodología

En el capítulo 1 se observa la incidencia del accidente cerebrovascular y se observa el estado del arte en tecnologías de electroestimulación para dar paso a la rehabilitación de esta enfermedad.

En el capítulo 2 se define el accidente cerebrovascular, se revisan los factores de riesgo y las secuelas que puede provocar. Estas secuelas se pueden rehabilitar gracias a la plasticidad del cerebro y a las terapias de rehabilitación. Se revisan estos puntos y también las tecnologías de rehabilitación en el mundo.

El capítulo 3 trata de la rehabilitación con electroestimulación. Explicando el funcionamiento de estos sistemas y los efectos que tiene la corriente en el cuerpo. Se revisan los parámetros utilizados en las terapias según la funcionalidad del miembro superior. Se revisan criterios y se plantea un protocolo para la aplicación y métodos de evaluación más utilizados.

En el capítulo 4 se realizan pruebas de la terapia FES en una persona sana para revisar los parámetros y ubicación de electrodos y finalmente se realizan estas pruebas en un paciente secuelado para verificar la funcionalidad de los ejercicios planteados: apertura y cierre de la mano.

Capítulo 2. Accidente Cerebrovascular

2.1. Accidente Cerebrovascular

El accidente cerebrovascular también llamado “ataque cerebral” sucede cuando el flujo de sangre se detiene en una parte del cerebro. Las células no pueden recibir ni oxígeno ni nutrientes produciéndose un daño o muerte de estas. [14]

Según la causa del accidente cerebrovascular se clasifica en isquémico o hemorrágico. A su vez el accidente cerebrovascular isquémico puede ser trombótico o embólico (Figura n°1).

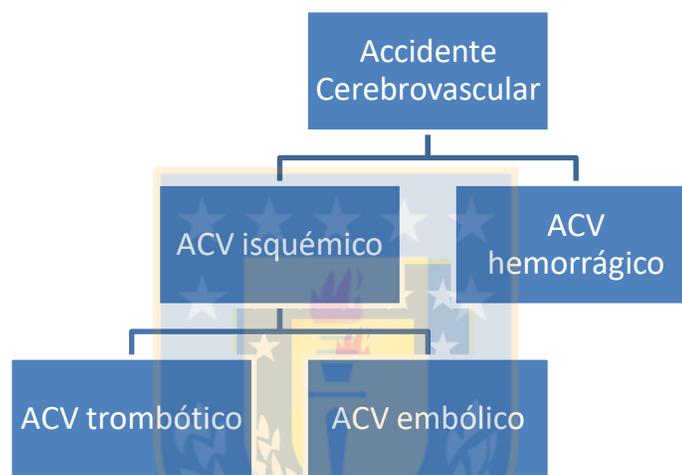


Figura n° 1. Clasificación del accidente cerebrovascular.

2.1.1 ACV isquémico y ACV hemorrágico

El accidente cerebrovascular hemorrágico ocurre cuando un vaso sanguíneo se rompe llegando la sangre al cerebro y el accidente cerebrovascular isquémico ocurre cuando un coágulo o placa bloquea el paso de sangre en un vaso sanguíneo (Figura n°2). Si el coágulo fue formado en una arteria cerebral estrecha se denomina accidente cerebrovascular trombótico. Si el coágulo fue desprendido de un vaso ubicado en otra parte del cuerpo y trasladado hacia el cerebro se denomina accidente cerebrovascular embólico o embolia cerebral. Eventualmente accidente cerebrovascular isquémico puede presentar sangrado y convertirse en un accidente cerebrovascular hemorrágico. [14]

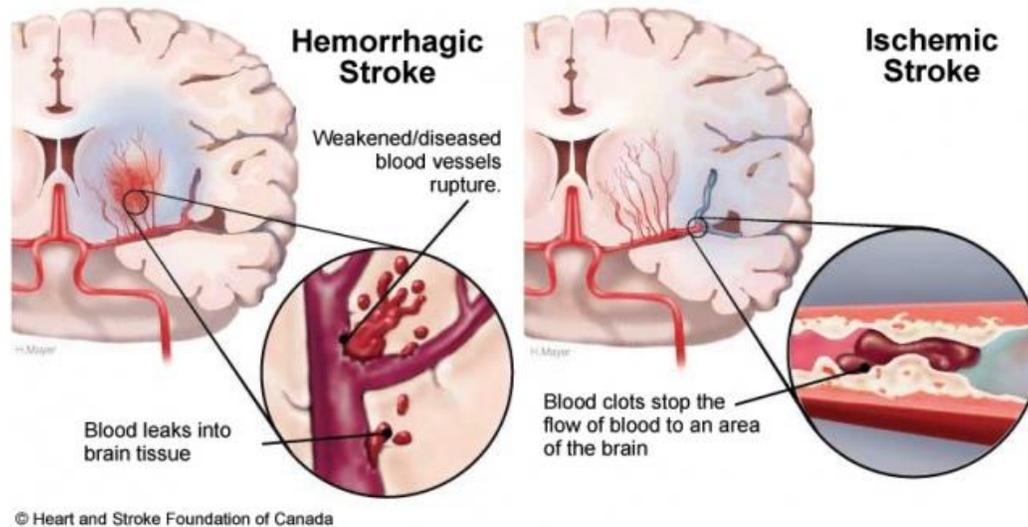


Figura n° 2. Accidente cerebrovascular hemorrágico y accidente cerebrovascular isquémico. [15]

2.2. Factores de Riesgo

El accidente cerebrovascular puede producirse por defectos en los vasos sanguíneos de las personas como aneurismas o malformaciones arteriovenosas. También puede ocurrir por efectos de anticoagulantes, presión arterial alta, fibrilación auricular, diabetes o colesterol alto. Es más probable que ocurra en personas de más de 55 años, personas de raza negra, personas con cardiopatías, personas con mala circulación en las piernas, tabaquismo, mujeres mayores de 35 que consumen anticonceptivos o embarazadas, homocisteína y deficiencia de vitamina B, estrés y depresión, migrañas, infecciones pulmonares y apneas de sueño. [15, 16]. La incidencia del ACV es mayor en mujeres que en hombres debido a que las mujeres viven más y el riesgo aumenta con la edad [15]. Sin embargo de aquellos riesgos modificables los principales son el tabaco y la presión alta. De esta forma en países desarrollados ha disminuido la incidencia debido a un mayor control de la presión alta y reducción de los niveles de tabaco. [3]

2.3. Secuelas

Las personas con trastornos vasculares del cerebro presentan una apoplejía: suspensión de la actividad cerebral y parálisis muscular. Generalmente esta apoplejía causa 5 tipos de discapacidades: perturbaciones sensoriales incluyendo el dolor, problemas en el entendimiento y uso del idioma, problemas con el pensamiento y la memoria, perturbaciones emocionales y perturbaciones físicas. Por otra parte existen afecciones combinadas: el dolor neuropático que es un problema sensorial

causado por una inmovilidad de tendones y ligamentos (articulación congelada), la pérdida de continencia urinaria y control fecal que son déficits sensoriales y motrices. [17]

2.3.1 Perturbaciones Sensoriales

Dentro de las perturbaciones sensoriales están la pérdida del tacto, temperatura y el posicionamiento. También perturbaciones como dolor, entumecimiento, hormigueo o picazón (parestesia). [17]

2.3.2 Entendimiento y Uso del Idioma

El deterioro del lenguaje depende del área del cerebro dañada por el accidente cerebrovascular. El daño en el área de Broca causa afasia expresiva en que no pueden transmitir correctamente con el idioma sus pensamientos. El daño en el área de Wernicke genera afasia receptiva en que las personas no comprenden el idioma. Cuando ocurre un daño cerebral mínimo en cualquier área del lenguaje se le llama afasia anómica o amnésica en que las personas olvidan selectivamente interrelaciones de palabras. Cuando se dañan varias áreas del lenguaje la afasia generada tiene el nombre de afasia global y las personas pierden casi todas sus habilidades lingüísticas. [17]

2.3.3 Alteraciones Cognitivas

La apoplejía puede dañar la memoria, el aprendizaje y el discernimiento. Se ve afectada la concentración y la memoria a corto plazo. Las personas pueden presentar problemas para reconocer su discapacidad (anosognosia) y problemas para planificar y seguir instrucciones (apraxia). La demencia y el déficit de atención están también dentro de las alteraciones cognitivas más comunes. [17, 18]

2.3.4 Perturbaciones Emocionales

Dentro de las perturbaciones emocionales y de personalidad se encuentran: miedo, ansiedad, frustración, rabia, tristeza, pesar y depresión clínica. Cambios de sueño y de alimentación que causan letargo, reclusión social, irritabilidad, fatiga, auto-desprecio y pensamientos suicidas. [17, 18]

2.3.5 Complicaciones Físicas

Existen múltiples complicaciones físicas que pueden presentarse después de un accidente cerebrovascular. Dentro de las más frecuentes están [17]:

- Déficits motores totales o parciales
- Alteraciones sensitivas
- Fatiga
- Osteoporosis
- Dolor de hombro
- Caídas/ fracturas
- Espasticidad
- Incontinencia urinaria
- Contracturas
- Subluxación del hombro hemipléjico
- Disfunción sexual



Sin embargo de los problemas de control motriz la parálisis es una de las discapacidades más comunes luego de una apoplejía. Esta pérdida de movilidad ocurre en el hemisferio del cuerpo contrario al afectado del cerebro. Puede afectar a la cara, el brazo, la pierna o al hemisferio completo llamándose hemiplejía. Por otro lado puede existir debilidad muscular (hemiparesia), problemas para tragar (disfagia) o incluso problemas para coordinar el movimiento (ataxia). [17]

La espasticidad (rigidez muscular) es otro de los problemas físicos más frecuentes tras un ACV presente en un 19-38% de los pacientes. Un 17% de los afectados la presenta el primer año y para un 4% es discapacitante. Una espasticidad ligera puede no requerir tratamiento y por otro lado una espasticidad muy grave puede no responder al mismo. Puede ocasionar dolor y contractura interfiriendo en las actividades de la vida cotidiana y también en la rehabilitación. Existen fármacos y relajantes musculares como el baclofeno, el dantroleno y la tizanidina que pueden mejorar la espasticidad (escala de Ashworth), sin embargo pueden interferir con la recuperación del paciente y producir efectos adversos como: sequedad de la boca, sopor, fatiga, debilidad muscular, sedación y

mareos. Otras terapias para la espasticidad son: inyección de toxina botulínica tipo A, bloqueo nervioso, baclofeno intratecal, terapia con ultrasonido y estimulación eléctrica. [18]

La rehabilitación de estas limitaciones depende de la capacidad que el cerebro tiene para su recuperación y del proceso de rehabilitación recibido para guiar esta plasticidad. Este documento se enfoca en la rehabilitación de la secuela de parálisis y de control motor presente como hemiplejía o hemiparesia con espasticidad del miembro superior después del ictus.

2.4. Reorganización Cerebral en la Recuperación

A pesar de que un accidente cerebrovascular puede ocasionar la muerte aquellas personas que logran estabilizarse resultan con un deterioro funcional severo perdiendo la fuerza muscular [4, 5]. La velocidad de recuperación depende de la gravedad del ictus. Si el ACV es muy grave el ejercicio físico no ayuda y si es muy leve los pacientes mejoran por sí mismos. Sin embargo independiente de la gravedad del trastorno se obtiene en un 5-52% de recuperación funcional óptima. Esto se debe a que el sistema nervioso es flexible y adaptativo respondiendo a factores y patrones de uso. [5, 16, 19]

El sistema nervioso se remodela continuamente en la vida: a través del tiempo, luego de un daño y en respuesta a distintas actividades. Permite adaptarse al entorno, a los cambios fisiológicos y a la experiencia. A través de los siguientes mecanismos de reorganización neuronal: reclutamiento de nuevas vías, sinaptogénesis, crecimiento dendrítico y refuerzo de conexiones silentes. [19,20]

Se considera que de un 90 a un 95% de los sobrevivientes ante un ACV experimentan mejoras con rehabilitación principalmente durante las primeras 13 semanas debido a la recuperación del tejido en penumbra como la resolución de un edema. En esta primera fase de cambios rápidos se reduce la actividad cerebral en zonas afectadas. [5, 16, 19, 20]

Posterior a la etapa reparadora comienza la segunda fase de reorganización que implica reaprendizaje. Comienza el cambio evolutivo a largo plazo basado en la neuroplasticidad del cerebro que reorganiza los mecanismos neuronales dependientes de uso, crea nuevas vías y fortalece las conexiones sinápticas existentes a través de la experiencia. La inhibición interhemisférica se autoregula optimizando las zonas sanas y se observan cambios adaptativos en el hemisferio no afectado. [5, 16, 19, 20]

La plasticidad es un arma de doble filo puesto que en algunas enfermedades o disfunciones como el ACV puede producir maladaptaciones al intentar suplir la función del área afectada fallando en la reorganización promoviendo cambios en partes no afectadas.

2.5. Adaptaciones del cuerpo ante una hemiplejia

En una hemiplejia las personas generan movimientos de adaptación o compensación inmediatamente para lograr el objetivo de la acción que intentan realizar. Las más comunes después de un ictus son [19]:

- Uso preferente de la extremidad no parética.
- Posturas recurrentes de la extremidad parética.
- Rigidez y dolores articulares generalmente de la articulación glenohumeral y articulación de la muñeca.

Antes de realizar una terapia de rehabilitación los terapeutas hacen un análisis observacional guiando al paciente en la realización de distintas acciones. Este al intentar usar el brazo hemipléjico realiza movimientos adaptativos. Algunos típicos son [19]:

- Al alcanzar un objeto que esté a una distancia menor que la longitud del brazo la adaptación es flexionar la parte superior del cuerpo sobre las caderas en vez de flexionar el hombro.
- Al tender el brazo hacia adelante la adaptación es una elevación de la cintura escapular, flexión lateral de la columna, abducción del hombro con el codo en flexión, rotación interna del hombro y pronación del antebrazo.
- Previo a la prensión se produce una apertura excesiva a fin de compensar imprecisiones.
- Al realizar una prensión se genera una excesiva fuerza flexora en compensación de la escasa destreza.
- Al soltar objetos ocurre una extensión de los dedos con la muñeca flexionada debido a la contracción de los flexores largos de los dedos y la debilidad de los extensores de la muñeca.
- Al soltar objetos también ocurre una extensión del pulgar sobre la articulación carpometacarpiana y la metacarpofalángica en vez de la abducción de la articulación debido a la debilidad del músculo abductor corto del pulgar.

A partir del patrón de los movimientos adaptativos se refleja el patrón de debilidad muscular, el grado de coordinación interarticular, las posibilidades biomecánicas inherentes a la unión segmentaria y la falta de flexibilidad articular y muscular debida a cambios en la longitud de los tejidos blandos y la rigidez muscular aumentada. Los terapeutas observan el desempeño motor a diario y hacen un análisis continuo guiando la intervención a partir de sus conocimientos y experiencia. Por ejemplo cuando el paciente genera la acción de tender el brazo parético hacia adelante eleva la cintura escapular, se flexiona lateralmente y rota la columna para balancear su brazo hacia adelante como se observa en la figura n°3a. Esto es una adaptación a la debilidad o parálisis de los músculos del hombro. Otro ejemplo es en la acción de soltar objetos como un vaso, el paciente genera una extensión del pulgar y flexión de la muñeca (figura n°3b) como una adaptación ante la debilidad del músculo abductor corto del pulgar. [19]

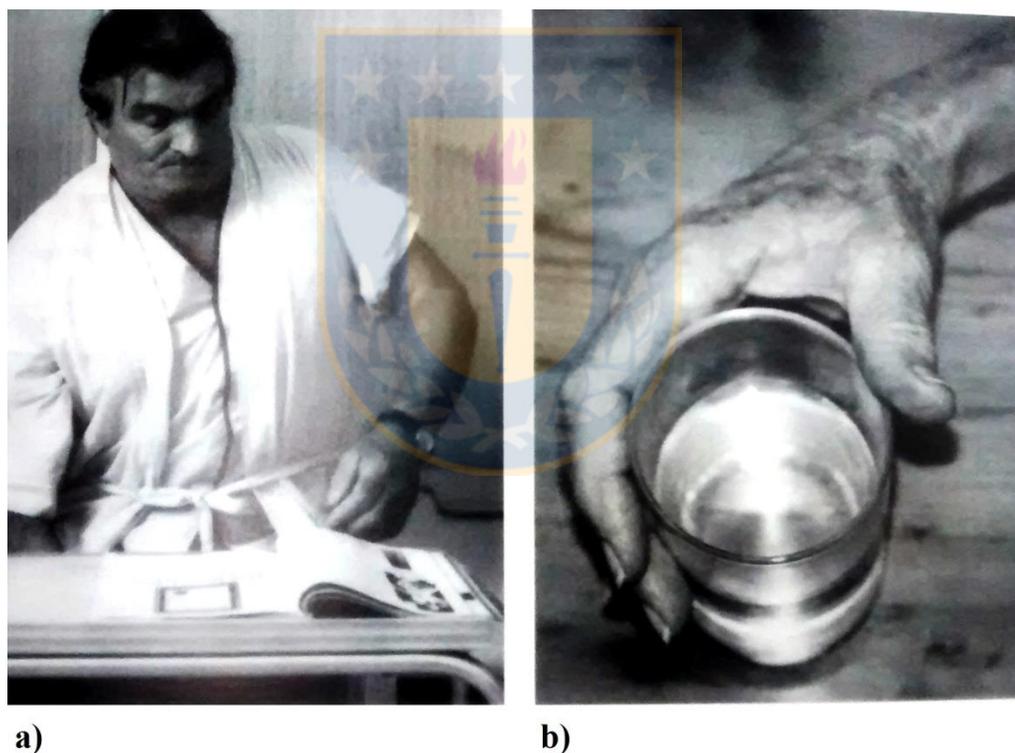


Figura n° 3. En a) el sujeto realiza un movimiento de adaptación al querer tomar un objeto tras una debilidad en los músculos del hombro. En b) suelta el vaso con una debilidad del músculo abductor corto del pulgar generando un movimiento adaptativo. [19]

2.6. Rehabilitación

2.6.1 Rehabilitación de ACV en Chile

La rehabilitación es un proceso dirigido a permitir que las personas discapacitadas alcancen un nivel funcional óptimo (mental, físico y social) tratando de aproximarse a la situación antes del ACV tanto funcional como familiar y social. La recuperación cambia el enfoque según la etapa en que se encuentre el paciente: fase aguda, fase subaguda, o fase tardía o de estabilización. [5]

En Chile la fase aguda se desarrolla en la Unidad de Tratamiento de Ataque Cerebrovascular o en Unidades de Paciente Crítico con el objetivo de prevención, diagnóstico, tratamiento precoz y pronóstico funcional de complicaciones. Las acciones principales son: posicionar bien al paciente en la cama, cuidados básicos de piel, cambios de posición frecuentes, movilización precoz, kinesiterapia respiratoria, manejo intestinal y vesical adecuados, control de deglución, estimulación cognitiva. [5]

En la fase subaguda se estabiliza el cuadro de los sobrevivientes: 10% quedan sin secuelas y requieren rehabilitación funcional, 10% quedan severamente dañados y requieren rehabilitación activa, 80% quedan con daño neurológico y requieren rehabilitación activa. La rehabilitación activa consiste en la reeducación de la marcha, postura y equilibrio, mejorar la funcionalidad de la extremidad superior, manejo del trastorno comunicacional, manejo de disfagia, intervención en áreas perceptivas/cognitivas y tratamiento de alteraciones emocionales. [5]

Finalmente en la fase crónica y seguimiento se busca una reinserción óptima a nivel familiar, social y laboral, mantener los logros funcionales obtenidos y evitar la recurrencia del ACV [5]

2.6.2 Tecnologías de Recuperación Funcional en el Mundo

Dentro de las tecnologías de rehabilitación en el mundo hay dispositivos de dos tipos: de tratamiento orientado y de asistencia. Los dispositivos de tratamiento orientado ayudan al paciente a hacer ejercicios de rehabilitación. Los dispositivos de asistencia ayudan a los pacientes en sus actividades de la vida diaria.

Algunos de los dispositivos de tratamientos orientados son las siguientes estructuras mecánicas:

- Armeo (figura n°4). Consiste en un exoesqueleto de brazo que da apoyo asistido al paciente y se adapta a sus capacidades. Tiene un espacio de trabajo en 3D con retroalimentación de ejercicios de la vida diaria para entrenamiento del brazo y mano. También cuenta con ejercicios repetitivos para pacientes severamente afectados. Este equipo reduce el deterioro motor del brazo y la mano y aumenta la función motora de forma más eficaz y más rápida que la terapia convencional.[21]



Figura n° 4. Armeo (Hocoma). Exoesqueleto para rehabilitación de brazo y mano. [22]

- ALEx (figura n°5). Es un exoesqueleto robótico para rehabilitación de la funcionalidad de la extremidad superior después de un accidente cerebrovascular. Reduce el peso del brazo facilitando la ejecución de movimientos y las maladaptaciones musculares como la flexión del codo asociada a la abducción del hombro. [22]



Figura n° 5. ALEx (Kinetek). Exoesqueleto para rehabilitación de la función del brazo. [22]

- SaeboReJoyce (figura n°6) es una estación de trabajo para pacientes con deterioro de la función del brazo y la mano. El sistema proporciona ejercicios de actividades de la vida diaria para prácticas de movimientos gruesos y finos. Incorpora movimientos en tres

posiciones del cuerpo: sentado, acostado y de pie. Contiene juegos que prueban la velocidad, resistencia, coordinación, rango de movimiento, fuerza y demanda cognitiva. [23]



Figura n° 6. Saebo ReJoyce (Saebo). Estación de trabajo para personas con deterioro de la función del brazo y la mano. [23]

- Gloreha Professional 2 (figura n°7) es un guante que puede genera todas las combinaciones de flexión y extensión de la mano según las capacidades del paciente. La palma de la mano y el brazo permanecen libres para interactuar con cualquier objeto. Incluye una pantalla para realimentación visual, música e instrucciones verbales. Mejora los rangos de movimiento, reduce dolores, edemas e hipertoniá muscular. [24]



Figura n° 7. Gloreha Professional 2 (Gloreha). Guante generador de movimientos. [24]

Otros ejemplos de dispositivos de tratamientos orientados son los siguientes estimuladores terapéuticos:

- NeuroMove 900 (Figura n°8) es un electroestimulador diseñado para personas que han sufrido ictus o lesiones en la médula espinal. El dispositivo detecta el intento de actividad muscular a través de un EMG y envía el estímulo eléctrico para generar la contracción del músculo. Este sistema genera un reaprendizaje del movimiento a través de información visual y sensorial. [25]



Figura n° 8. NeuroMove900 Therapy (Zynex). Rehabilitación con estimulación eléctrica. [25]

- RT200 es un equipo de estimulación eléctrica funcional que puede trabajar hasta 12 porciones de músculos de piernas, brazos y tronco dependiendo del paciente. El controlador FES puede utilizarse junto con la estación elíptica (figura n°9a) generando una terapia de movimientos con electroestimulación y realimentación visual a través de animaciones en la pantalla. También el equipo puede removerse de la estación elíptica (figura n°9b) para terapias de ejercicios de la vida diaria. [26]

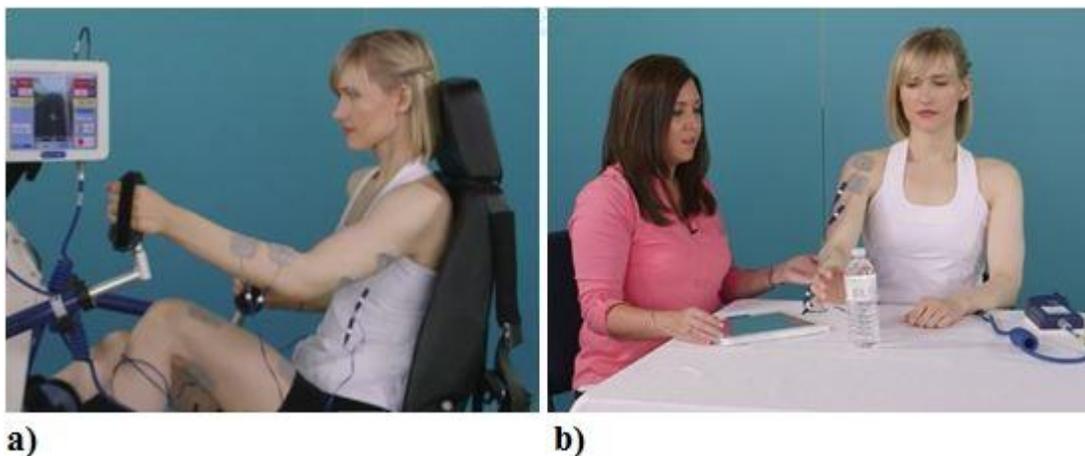


Figura n° 9. RT200 Elliptical (Restorative Therapies). En a) se observa una terapia de rehabilitación con EEF en silla elíptica y en b) con ejercicios de la vida cotidiana. [26]

Por otra parte algunos de los dispositivos de asistencia son:

- SaeboReach y SaeboFlex están enfocados en pacientes con alteraciones neurológicas como el ictus. Personas con movimiento limitado del codo y de la mano usan SaeboReach (figura n°10a) para extender el codo. El funcionamiento de las ortesis SaeboFlex (figura n°10b) es a través de resortes que ayudan en la extensión de la muñeca y de los dedos después de que la persona genere el agarre de un objeto. Aquellas personas que no pueden generar la acción de agarre o prensión están limitados en el uso de estos dispositivos. [27]

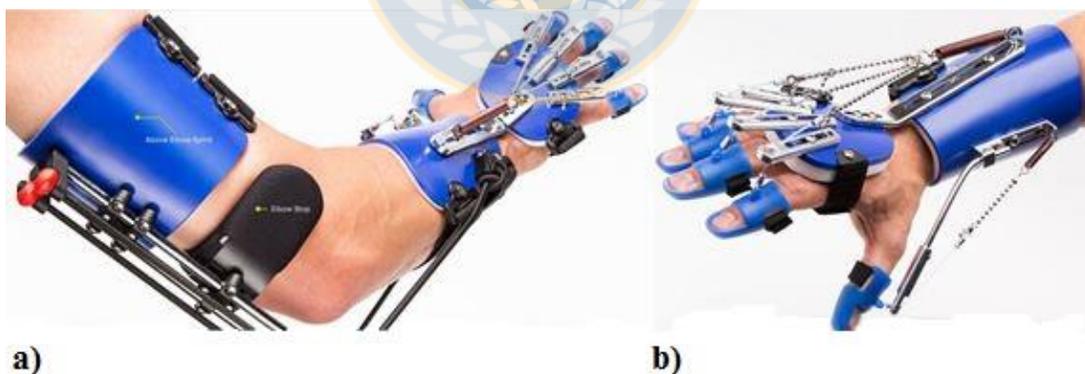


Figura n° 10. Órtesis de extensión (Saebo). En a) SaeboReach y en b) SaeboFlex. [27]

- La órtesis H200 ayuda a los pacientes a alcanzar, agarrar, abrir y cerrar la mano. Este sistema posiciona la muñeca para tener libertad de movimiento de los dedos y del pulgar. Mejora la capacidad de hacer ejercicios de la vida diaria, reduce espasmos musculares y mejora los movimientos voluntarios de la mano y muñeca. [28]



Figura n° 11. Órtesis H200 (Bioness). Dispositivo de asistencia para la vida diaria. [28]



Capítulo 3. Rehabilitación con Electroestimulación

3.1. Electroestimulación

Se habla de electroestimulación cuando se aplican estímulos eléctricos a través de la piel que son capaces de despolarizar la membrana de una fibra muscular o de un nervio y producir su excitación. La electroestimulación busca generar un impulso eléctrico con características similares a los estímulos propios del cerebro. [29]

Los equipos de electroestimulación toman corriente del suministro de la red eléctrica, pilas o baterías y la transforman en corriente con características específicas según el efecto que se quiere lograr en el cuerpo. [29]

3.1.1 Formas de Aplicación

Según la forma en que se aplica la electroestimulación a través de los electrodos se clasifican tres técnicas:

- Estimulación subcutánea
- Estimulación percutánea
- Estimulación transcutánea



En la estimulación subcutánea se aplican electrodos de paño directamente en un nervio o en la superficie del músculo bajo la piel siendo necesaria una cirugía para su ubicación y un sistema de cables o radiofrecuencia para su alimentación y control. La utilización de esta técnica es invasiva y tiene un alto costo económico.

En la estimulación percutánea se utilizan alambres finos como electrodos guiados por una aguja para introducirlos al músculo o nervio aplicando estimulación en diferentes puntos hasta encontrar el de mejor respuesta.

En la estimulación transcutánea se utilizan electrodos de superficie adherentes sobre la piel estimulando indirectamente el músculo o nervio con niveles mayores de energía.

La utilización de estimulación subcutánea y percutánea es de un alto costo económico, bajo costo de energía y son consideradas técnicas invasivas. Sin embargo la utilización de estimulación transcutánea se considera una técnica con bajo costo económico y alto costo energético siendo una

técnica no invasiva. En consecuencia, los electrodos que se utilizan en este trabajo son de tipo transcutáneos y son los que se recomienda utilizar para la terapia eléctrica funcional. [30]

3.1.2 Tipos de Corrientes y su Efecto en el Cuerpo

Las corrientes más conocidas en estimulación eléctrica son [29]:

- Electroanalgesia o estimulación nerviosa transcutánea (TENS) que es utilizada para estimular nervios periféricos bloqueando el dolor.
- Electroestimulación neuromuscular (EENM) que es utilizada para estimular un nervio o un músculo buscando mejorar el estado muscular o su rendimiento.
- Estimulación eléctrica funcional (EEF o FES en inglés) que es utilizada para estimular los nervios de forma transcutánea para mejorar las capacidades funcionales como: bipedestación, marcha o prensión mejorando el control motor, realizando aprendizaje motor, reduciendo espasticidad y recuperando movimientos residuales.
- Corriente galvánica o corriente continua que es utilizada cuando se quieren tener efectos químicos en la zona cercana al electrodo.
- Microcorrientes que son utilizadas para estimular nervios periféricos para la analgesia y curación de tejidos.
- Estimulación eléctrica terapéutica que es utilizada en la aplicación de estímulos que no generan contracción muscular observable como tratamiento clínico para: prevenir atrofia, relajar espasmos, incrementar el flujo sanguíneo y mejorar el rango de movimiento. [30]

Particularmente en la recuperación del movimiento se utiliza la estimulación neuromuscular y la estimulación eléctrica funcional para mejorar el estado y las capacidades musculares. En este trabajo se utiliza un equipo que genera estimulación eléctrica funcional con el objetivo de ser utilizado como terapia.

3.1.3 Estimulación Eléctrica Funcional y Terapia Eléctrica Funcional

La estimulación eléctrica funcional se utiliza para generar movimientos que homologuen los voluntarios restaurando funciones perdidas o disminuidas. Los pacientes utilizan equipos portátiles en su hogar durante las actividades diarias teniendo autonomía. Los equipos asisten al sujeto ayudándolo a mantenerse de pie o caminar. [30]

La terapia eléctrica funcional es una técnica en que se utilizan equipos de estimulación eléctrica funcional en un solo lugar por el tiempo que dure la terapia (no permanente). La terapia se realiza con fines terapéuticos registrando nuevos potenciales evocados motores. La estimulación eléctrica puede ayudar a reducir la espasticidad y la atrofia muscular. Se produce excitabilidad cortical espinal en el hemisferio del cerebro afectado por un ACV y mejoras en la conducta motora en hemiparesias mejorando la neuroplasticidad. Es más efectiva cuando el paciente tiene un rol activo en la rehabilitación a través de la combinación con otras técnicas y terapias. Particularmente en la rehabilitación de brazo parético se suelen aplicar los siguientes ejercicios:

- Apertura
- Agarre
- Alcance
- Liberación

3.2. Aplicación de la Electroestimulación

3.2.1 Fisiología de la contracción muscular

Los músculos están contenidos por unidades motoras (figura n°12 [30]): conjunto de fibras musculares inervadas por una misma motoneurona. Todas las unidades motoras que contiene un músculo se denominan pool de motoneuronas. Las fibras de cada unidad motora se contraen simultáneamente o están todas en reposo. En cada descarga la fuerza generada es la misma por lo que la graduación de la fuerza en la contracción depende de la frecuencia de activación (sumación temporal) y de la cantidad de unidades motoras activas (sumación espacial). La sumación temporal ocurre primero aumentando la actividad de la unidad motora desde los 10Hz o menos hasta su máximo que es de 50 Hz aproximadamente. La sumación espacial se produce cuando se solicita más esfuerzo y se activan más unidades motoras. Para que el músculo no se fatigue se produce una rotación en las unidades motoras activas manteniendo un número constante. [31]

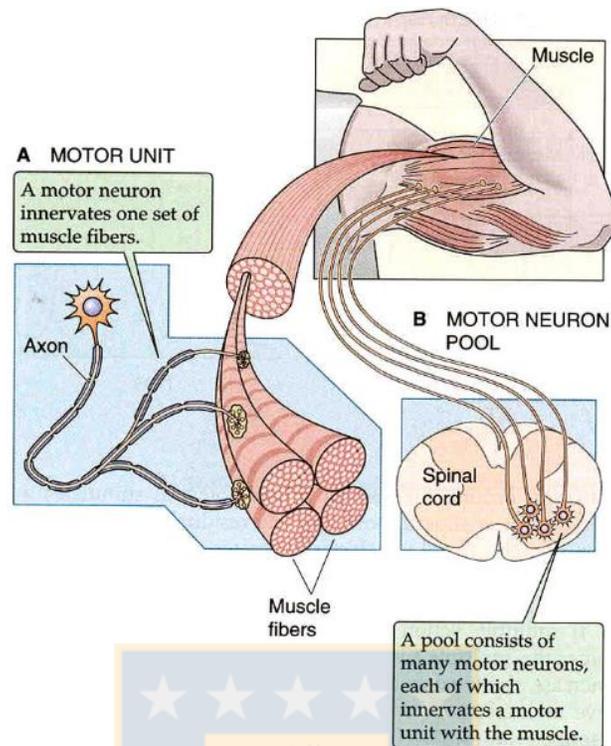


Figura n° 12. Unidad Motora y Pool de neuronas. [32]

3.2.2 Reclutamiento

Se distinguen distintos tipos de unidades motoras: tónicas, tónico-fásicas y fásicas (figura n°13). Las unidades motoras tónicas tienen motoneurona pequeña con axón de poco diámetro, velocidad de contracción lenta y fibras musculares tipo I resistentes a la fatiga. Las unidades motoras fásicas tienen una motoneurona con axón más grande de diámetro, velocidad de contracción rápida y fibras tipo IIa poco resistentes a la fatiga. Las unidades motoras tónico-fásicas tienen propiedades mixtas. Al inicio de la contracción se activan las unidades tónicas y según la exigencia de fuerza se activan las unidades fásicas (figura n°14). [31]

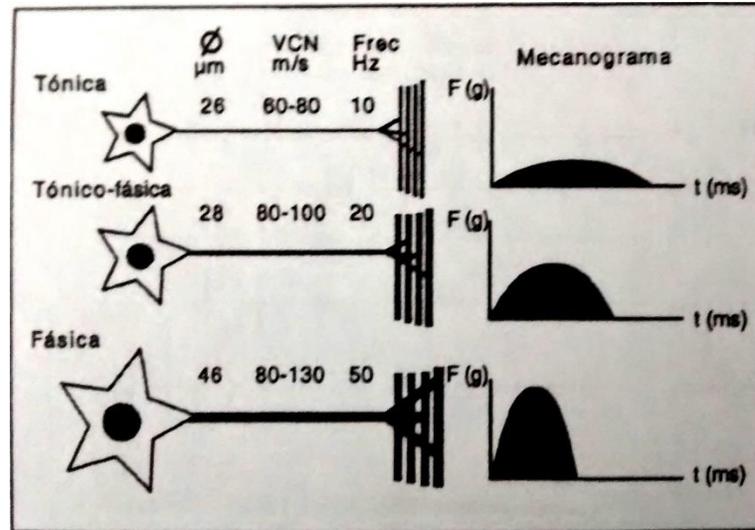


Figura n° 13. Tipos de unidad motora y sus características: diámetro del axón, velocidad de contracción, frecuencia de activación, fuerza y resistencia a la fatiga. [31]

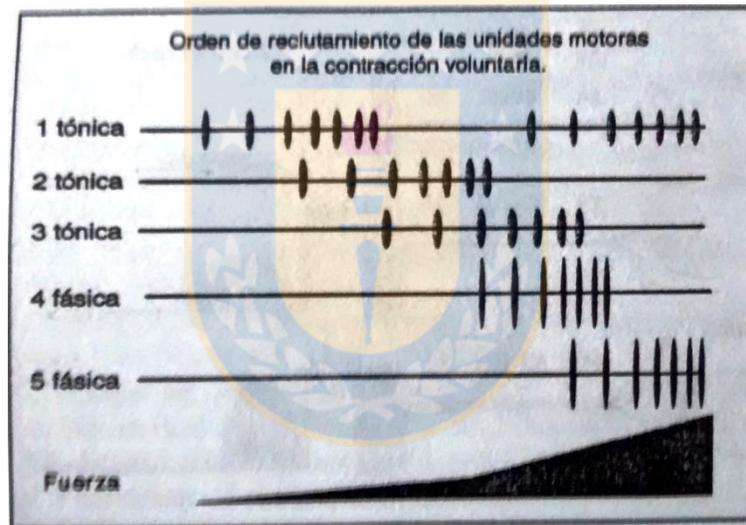


Figura n° 14. Orden de reclutamiento de las unidades motoras en la contracción voluntaria. [31]

3.2.3 Contracción por Electroestimulación

Existe una plasticidad que convierte unidades motoras de un tipo en otro tipo adaptándose a cambios de actividad de forma natural o provocada con ejercicio y electroestimulación. En una contracción voluntaria con esfuerzo máximo hay un 10 a 30% de unidades motoras inactivas debido al relevo para evitar la fatiga (figura n°15). En una contracción con electroestimulación se obtiene una contracción masiva ya que se activan todas las unidades motoras a la vez. Por esto se ocupa la electroestimulación para aumentar la potencia de un músculo aprovechando la plasticidad neuronal. Otra diferencia es que la secuencia de activación de las unidades motoras es inversa a las de la

contracción voluntaria por lo que genera más fatiga. Se activan primero aquellas neuronas de mayor diámetro y aquellas que se encuentran más cercanas al electrodo. [32]

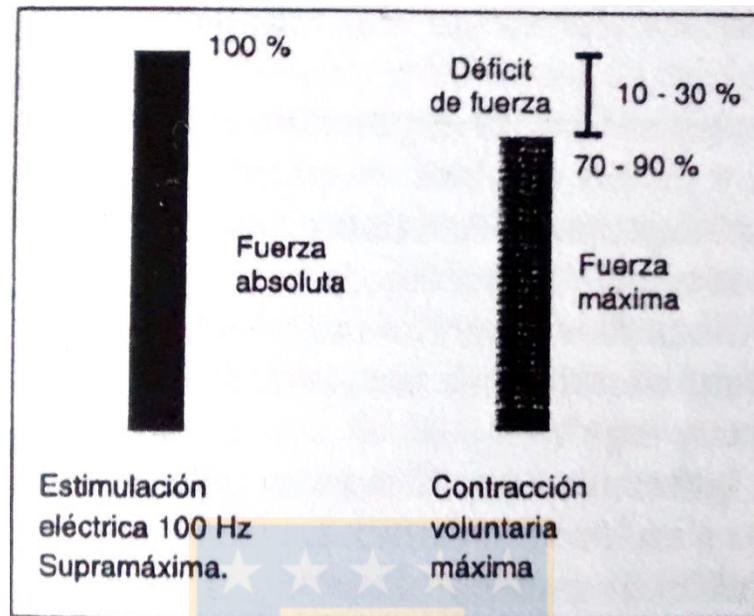


Figura n° 15. Fuerza absoluta generada con estimulación eléctrica y fuerza máxima generada con contracción voluntaria máxima. El porcentaje de diferencia entre las fuerazs corresponde al déficit de fuerza dejado como suministro para evitar la fatiga. [31]

3.3. Parámetros de la Corriente

En la utilización de FES como rehabilitación de la mano hemiplejica se han utilizado corrientes con forma de onda simétrica bifásica a través de los años. En 1992 Kraft, Fitts y Hammond en “Techniques to Improve Function of the Arm and Hand in Chronic Hemiplegia” utilizaron ondas bifásicas cuadradas con tres diferentes tecnicas: EMG gatillando la estimlación, combianda con esfuerzo voluntario y con facilitación neuromuscular propioceptiva. El estudio concluyó que la EE puede ayudar a mantener o mejorar funciones de la extremidad superior tras un ictus principalmente con el esfuerzo voluntario. [33]

En la actualidad continúan los estudios de tratamientos con electroestimulación probando que la terapia funcional reestablece la función del brazo en personas tras un ACV. En el 2013 Kawashima, Popovic y Zivanonic en su caso de estudio “Effect if Intensive Functional Electrical Stimulation Therapy on Upper-Limb Motor Recovery after Stroke: Case of Study of a Patient with Chronic Stroke” utilizaron FES con corrientes simétricas bifásicas de 250 μ s y 40Hz para efectuar movimientos específicos de la extremidad superior. La paciente recuperó la contracción de los

músculos afectados, redujo la espasticidad y aumentó el rango de movimiento en las articulaciones del brazo. [34]

3.3.1 Pulsos Bifásicos

Las corrientes bidireccionales se destacan por ser más eficaces, confortables y seguras en la electroestimulación excitomotriz de fibras eferentes motoras pudiendo generar contracciones enérgicas en músculos grandes con escasa molestia [31, 35]. Se aplica una doble onda consecutiva una de otra siendo una hacia positivo y otra hacia negativo como se observa en la figura n°16. De este modo se comporta como un estímulo alcanzando la misma contracción de músculo en cada pulso [36].

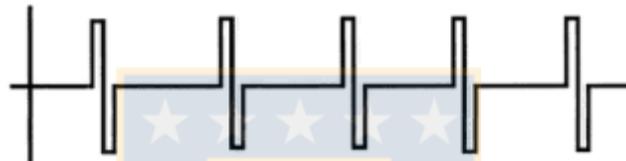


Figura n° 16. Pulsos bifásicos consecutivos. [24]

3.3.2 Duración

El rango de duración más eficaz para generar una buena contracción de músculos medianos es de 200 a 500 μ s. Bajo este rango la contracción de pulsos bifásicos es poco eficaz y sobre ese rango el músculo se fatiga más rápido siendo molesto para el paciente. [30, 31] Por esto en trabajos de investigación se utilizan duraciones de pulsos de 250 a 300 μ s para la contracción efectiva de los músculos del miembro superior hemipléjico. [33, 34]

3.3.3 Frecuencia

El parámetro de la frecuencia en la electroestimulación de músculos es el que da la continuidad de la contracción. Con frecuencias bajas de 1 ó 5 Hz se producen contracciones individuales con sacudidas bruscas. Con frecuencias de 5 ó 10 Hz las contracciones comienzan a superponerse con vibración. Con frecuencias de 50 ó 70 Hz se obtienen contracciones prolongadas y estables en músculos más grandes variando según la composición de cada músculo. También según la frecuencia de estimulación se tienen distintos efectos a nivel muscular [31,37]:

- 1 a 3Hz: descontracturante.
- 4 a 7Hz: disminuye el dolor.

- 8 a 10Hz: aumenta el flujo sanguíneo en la zona.
- 10 a 33Hz: aumenta la resistencia aeróbica.
- 33 a 50Hz: aumenta la resistencia a la fatiga.
- 50 a 75Hz: aumenta la fuerza y la masa muscular.
- 75 a 150Hz: mejora la fuerza y la velocidad.

Basándose en esta información y dado que el objetivo es la generación de movimiento a través de la contracción muscular estable involuntaria generando un aumento de la fuerza y de la masa muscular en este trabajo se utiliza una frecuencia de 60Hz.

3.3.4 Amplitud

Para que la contracción generada sea lo más parecida a la fisiológica se modula la intensidad a través de la amplitud. Se genera un ascenso progresivo al inicio y un descenso progresivo al final. En algunos trabajos (antes mencionado “Effect of Intensive Functional Electrical Stimulation Therapy on Upper-Limb Motor Recovery after Stroke: Case of Study of a Patient with Chronic Stroke”) se utilizan rampas de subida y de bajada con duraciones de 2 segundos para generar una contracción y relajación progresivas. Sin embargo para ejercicios más controlados se recomienda tener una amplitud modulada con más etapas. En la figura n°17 se distinguen 4 fases: instauración, trabajo, descenso y pausa. La fase de instauración (u ON) corresponde al ascenso de la intensidad que por lo general dura 1.5 segundos y un poco más en el tratamiento de espasticidad. La fase de trabajo corresponde a una contracción mantenida que frecuentemente dura entre 6 y 8 segundos. En la fase de descenso (u OFF) se produce la disminución que dura unos 0.5 segundos. En la fase de pausa no existe contracción y su duración debe acercarse al doble del tiempo en estimulación. [31]

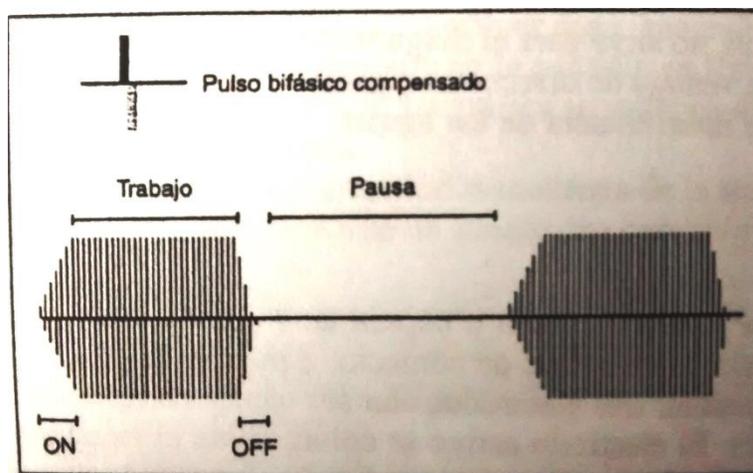


Figura n° 17. Fases de la corriente modulada: ON, trabajo, OFF y Pausa. [31]

3.3.5 Modalidades

En una sesión de electroestimulación se pueden hacer diferentes procesos según el objetivo. Los principales son: calentamiento, recuperación de la atrofia, potenciación muscular, relajación o descontractura (TABLA I). El calentamiento se utiliza antes del tratamiento de potenciación muscular y sirve para dilatar los vasos sanguíneos a través de contracciones suaves. La recuperación de la atrofia por desuso utiliza frecuencias más bajas que la tetanización para no sobrecargar el músculo atrofado con contracciones moderadas al comienzo y enérgicas más tarde. La potenciación muscular utiliza contracciones tetánicas enérgicas llegando a la fatiga. La relajación se indica al terminar el proceso de potenciación muscular generando un temblor en contracciones suaves para inducir vasodilatación. La modalidad de descontractura muscular se utiliza en el tratamiento de espasticidad con contracciones rítmicas aisladas. [31]

TABLA I. Modalidades de Electroestimulación

Proceso	Duración	Frecuencia	ON	Trabajo	OFF	Pausa	Tiempo
Calentamiento	150-250 μ s	20-25Hz	1.5s	6s	0.5s	8s	5min
Recuperación de la atrofia	200-300 μ s	45-50Hz	1.5s	8s	0.5s	8s	\leq 15min
Potenciación muscular	250-300 μ s	60-65Hz	1.5s	6s	0.5s	8s	\leq 15min
Relajación	150-200 μ s	3Hz	Corriente no modulada				2min

Descontractura	150-250 μ s	1Hz	Corriente no modulada	15min
-----------------------	-----------------	-----	-----------------------	-------

3.4. Estimulación Eléctrica y Funcionalidad del Miembro Superior

La estimulación eléctrica tiene variados beneficios en la provocación de la actividad muscular. Reduce cambios adaptativos secundarios en el músculo, ayuda en la conservación de la contractilidad de la fibra muscular, prolonga la ejercitación de los músculos y evita el estiramiento de los músculos del manguito de los rotadores y de la cápsula de la articulación glenohumeral. Es importante recalcar que su aplicación es más efectiva cuando los pacientes centran su atención realizando acciones físicas simples y funcionales. [19]

En las terapias diarias de estimulación eléctrica se han definido músculos claves en los que aplicar la corriente: extensores de la muñeca y extensores de los dedos (figura n°18a), abductor palmar del pulgar, deltoides, supraespinoso y tríceps braquial (figura n°18b). [19]

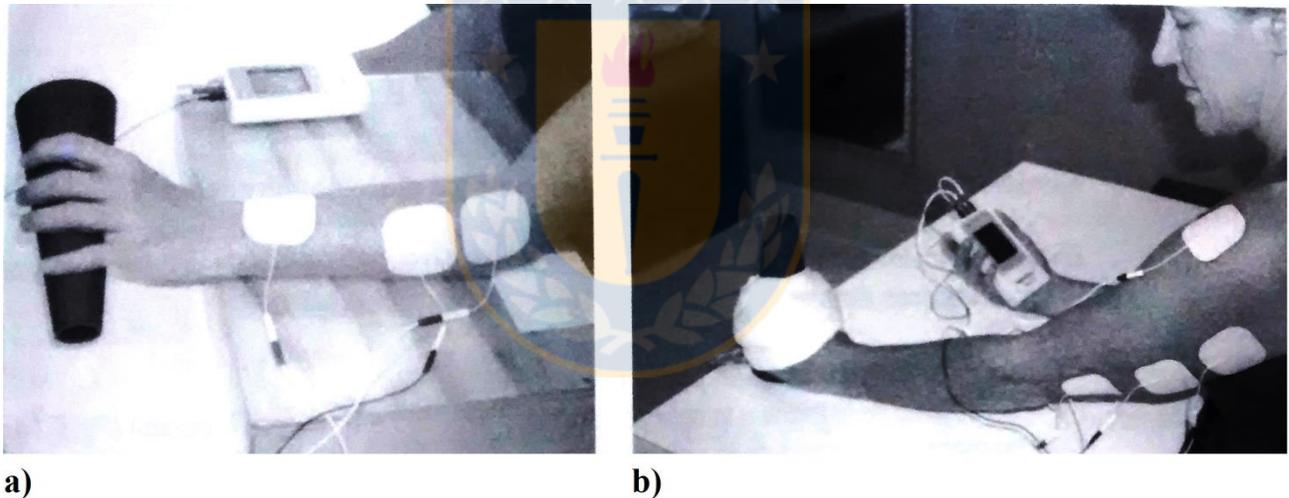


Figura n° 18. Aplicación de estimulación eléctrica funcional con electromiografía. En a) se observa un par de electrodos en los extensores de la muñeca y en b) en el tríceps braquial. Entre ellos el electrodo de EMG. [19]

La ubicación de los electrodos depende del movimiento que se quiere practicar. La función de la extremidad superior en la vida real es a través de movimientos de acciones sencillas de alcance o manipulación de objetos. La descripción de estos movimientos es a través de los músculos involucrados y la funcionalidad de las acciones que se realizan. A continuación se describe el proceso de alcance y manipulación de un objeto.

En el transporte de los objetos se lleva el brazo y la mano como una unidad hacia la ubicación del objeto comenzando la apertura de la mano junto con la acción ajustándose antes de

coger. La mano se abre unos centímetros más que el tamaño del objeto y ante un movimiento más rápido es más amplio respondiendo a la fragilidad y uso que se le va a dar. Justo antes de tomar el objeto la apertura disminuye juntando los dedos hacia el pulgar comenzando la prensión siendo importante la abducción del pulgar para el ajuste de distancia. [19]

A partir de esta descripción se observan los diferentes componentes de la acción: transporte del brazo y de la mano, apertura de la mano y prensión. Siendo imprescindible la extensión de la muñeca para coger, manipular y soltar objetos [19].

Para extender la muñeca se utilizan los músculos extensores de la muñeca (figura n°19), específicamente el primer y segundo radial. El extensor cubital del carpo mueve la muñeca en aducción. Por otra parte para soltar objetos retenidos en la mano se utilizan los músculos extensores de los dedos. [38]



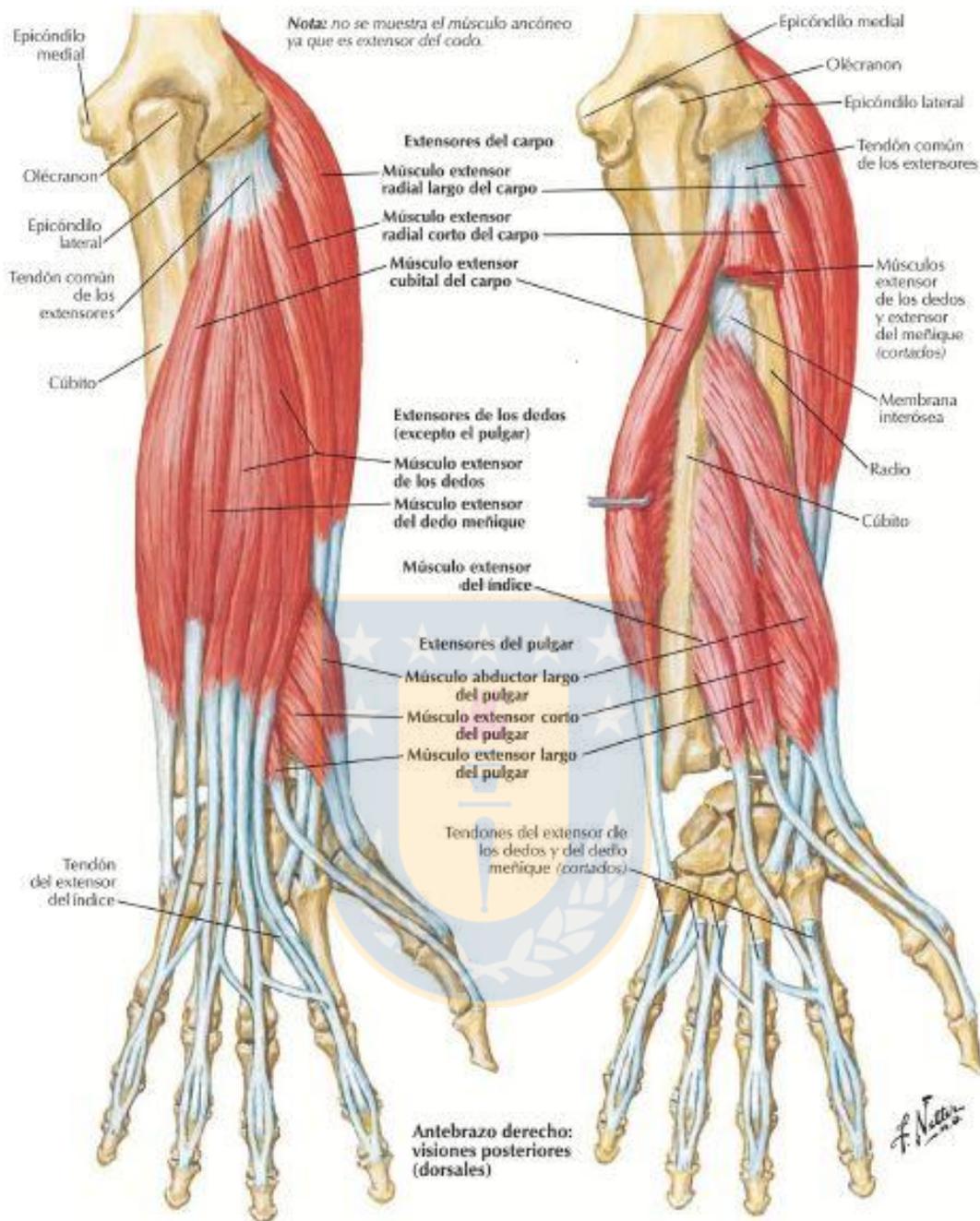


Figura n° 19. Músculos del miembro superior vista posterior. [39]

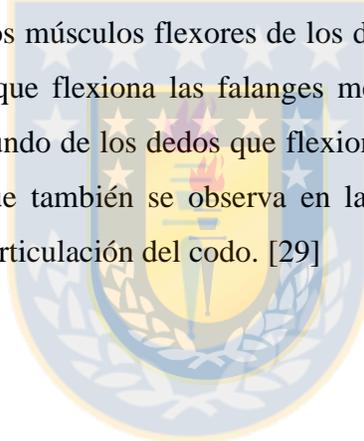
Se ha utilizado la estimulación eléctrica en los extensores de la muñeca y de los dedos obteniendo mejoras en la espasticidad y en la recuperación del movimiento utilizando distintas técnicas:

- En tratamientos que combinan la electroestimulación con el esfuerzo voluntario [28].
- Utilizando sistemas de FES desencadenada por EMG o controlado por EMG [33].

- Utilizando un sistema CCFES (Contralaterally Controlled Functional Electrical Stimulation) en el extensor común de los dedos y extensor largo del pulgar [40].
- En la utilización de un dispositivo en casa estimulando también flexores de la mano y muñeca efectuando movimientos de apertura, agarre o aprete [8, 40].

La prensión puede ser de precisión o de fuerza. La primera utiliza el pulpejo de los dedos y la segunda utiliza toda la mano. Muchas tareas implican interacciones del objeto con el pulgar e índice. El pulgar se abduce y rota o el índice se flexiona mientras ejerce presión en el objeto. Principalmente para estas acciones se usan los músculos flexor largo del pulgar y flexores de los dedos. [29]

Por ejemplo para tirar una cuerda o empuñar un cuchillo se contraen los músculos flexores de la muñeca (figura n° 20). Para generar los movimientos de prensión en garra, prensión en fuerza, teclear o tocar el piano existen dos músculos flexores de los dedos (figura n°21): el músculo flexor común superficial de los dedos que flexiona las falanges medias pudiendo ayudar a flexionar la muñeca y el músculo flexor profundo de los dedos que flexiona las falanges distales. Por otra parte el músculo pronador redondo que también se observa en la figura n°19 mueve el antebrazo en pronación y ayuda a flexionar la articulación del codo. [29]



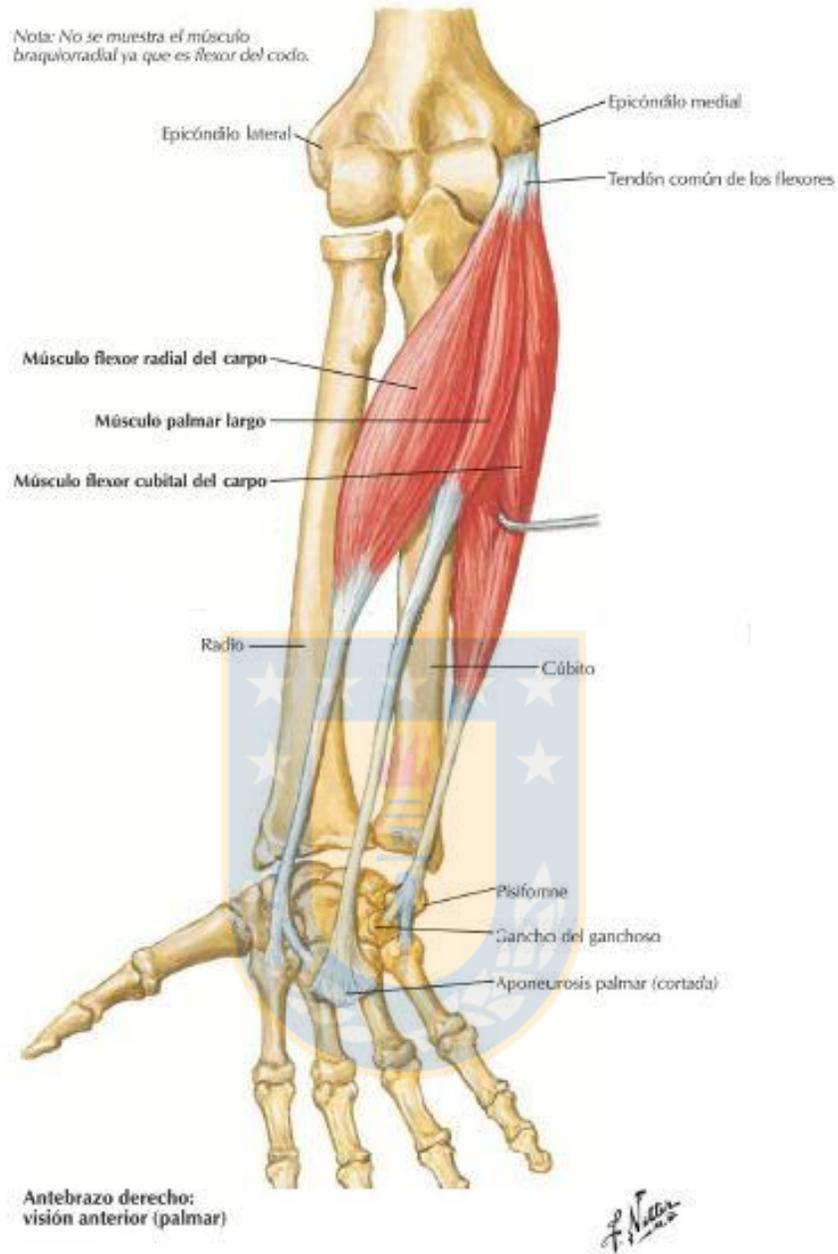


Figura n° 20. Músculos flexores de la muñeca. Palmar mayor, palmar menor y cubital anterior. También se aprecia el retináculo flexor y la aponeurosis palmar. [39]

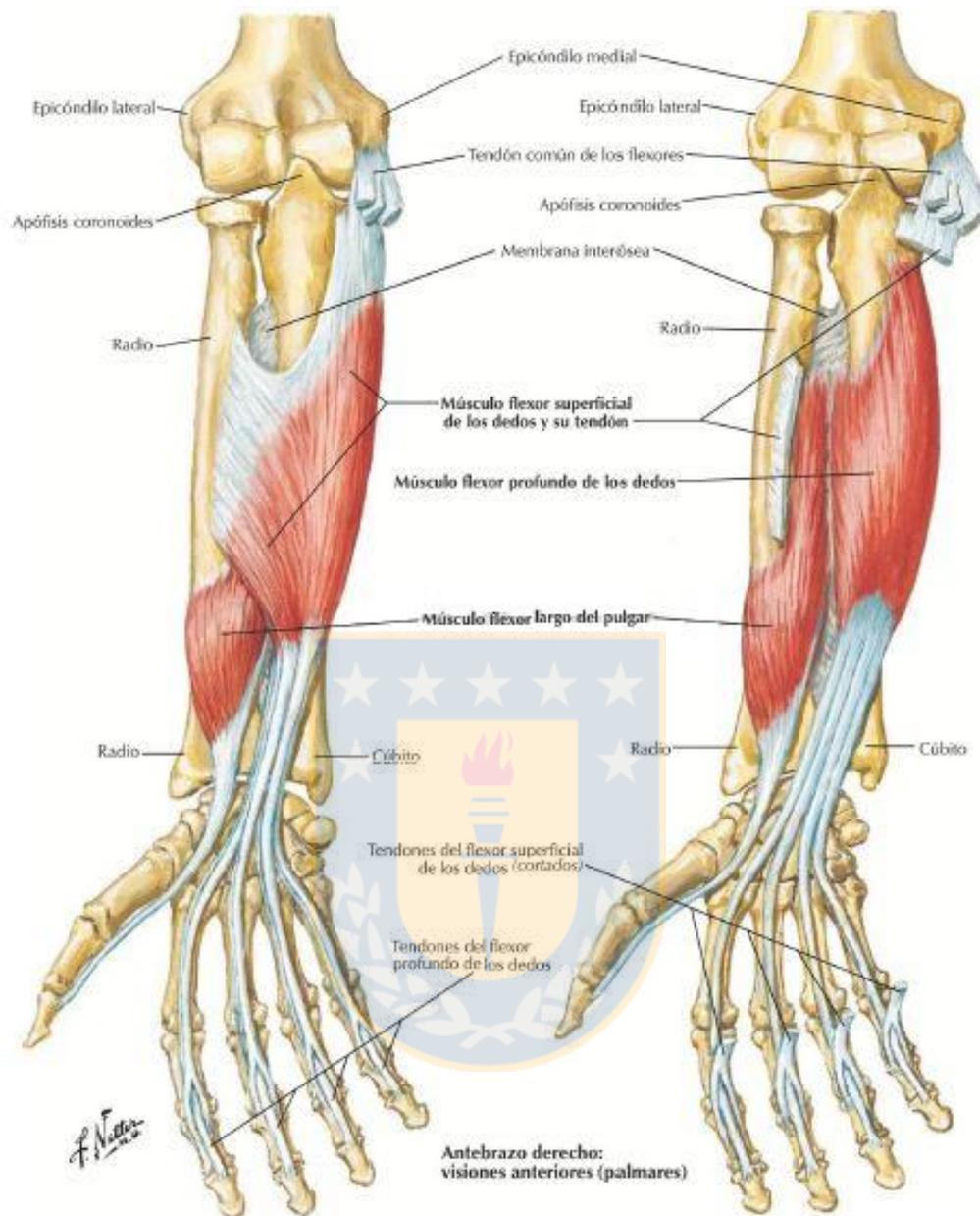


Figura n° 21. Músculos flexores de los dedos. Flexor largo del pulgar, flexor común superficial de los dedos y músculo flexor profundo de los dedos. [39]

Para coger un objeto pequeño con el movimiento de prensión o pinza el pulgar se mueve generando una oposición de su yema con las yemas de los otros dedos. Se contrae el músculo oponente del pulgar (figura n°22). [38]

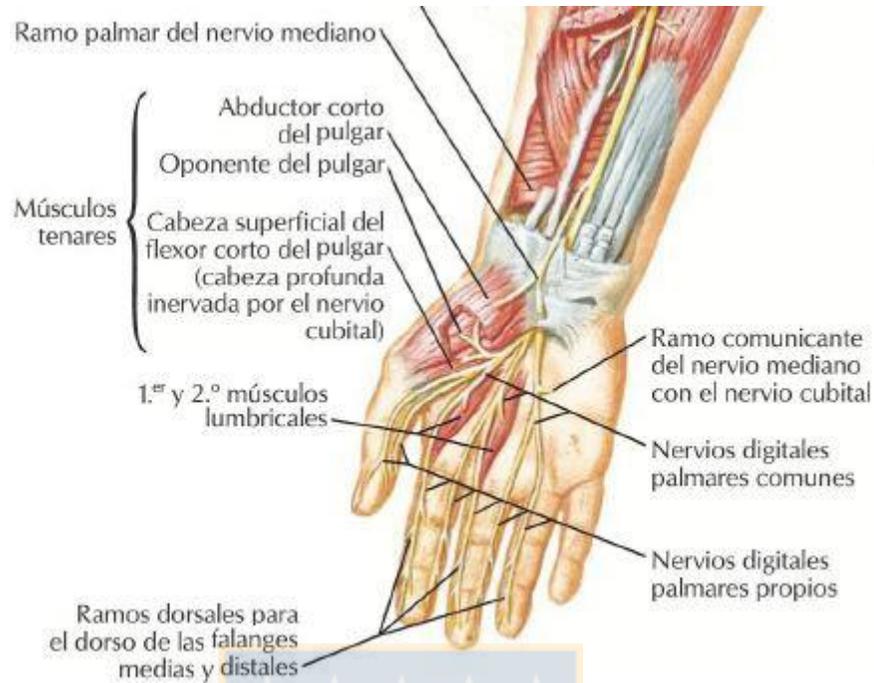


Figura n° 22. Músculos de la mano. [39]

3.5. Criterios de Inclusión y de Exclusión

Para este trabajo se incluyen personas con las siguientes características [16]:

- Historial de ictus
- Padecimiento de una hemiplejia espástica del miembro superior
- Lúcidas, que puedan responder a órdenes simples y complejas
- Personas que puedan estar sentadas por lo menos una hora
- Con buena tolerancia al estímulo eléctrico y a la fatigabilidad

Dentro de los criterios de exclusión para la estimulación eléctrica funcional se tienen personas [13, 16, 41]:

- Con arritmias ventriculares y otras patologías cardiacas
- Con antecedentes de enfermedades de lesión de neurona motora inferior
- Embarazadas
- Con osteoporosis

- Con antecedentes de convulsiones
- Que utilicen marcapasos cardiacos
- Que tengan lesiones, excoriaciones, cicatrices, granos o depilación reciente en la piel en el sitio de colocación de los electrodos
- Con hipertensión arterial no controlada
- Que tengan problemas de comprensión y conciencia
- Que presenten disfagia

3.6. Protocolo para la Terapia

Para un entrenamiento de rehabilitación se debe incentivar la práctica mental para centrar atención en la acción a realizar teniendo una gran intensidad en las instrucciones para la tarea. Las tareas deben ser concretas e incluir objetos porque los pacientes prefieren una interacción útil en vez de una tarea abstracta sin objeto. Se debe realizar una práctica repetitiva limitando en lo posible la extremidad no parética, realizando ejercicios bimanuales. Dependiendo del espacio de apertura entre el dedo índice y el pulgar varían los objetos con los que se puede trabajar. Se recomienda utilizar objetos de la vida cotidiana como: jabón, estuche, vaso o botella. [19]

Antes de la terapia se confirma que el paciente cumpla con los criterios de inclusión y no cumpla con los criterios de exclusión. A continuación se aplica el protocolo antes descrito.

1. *Marcarse mentalmente el objetivo a conseguir:* movimiento de apertura y cierre de la mano para poder tomar objetos de distintas características.
2. *Establecer la mejor técnica para alcanzarlo.* La terapia se determina en 3 procesos:
 - Intervención de terapeutas. Se estiran los tejidos blandos y rangos de movimiento de cada articulación de la extremidad superior afecta (manipulación de tejidos, estiramientos y terapia manual). [19]
 - Estimulación de la muñeca. Se estimulan los músculos extensores de los dedos y de la muñeca buscando realizar la posición de extensión de la figura n°23. A través del mecanismo de inervación recíproca al estimular los extensores de muñeca se relajan los flexores.

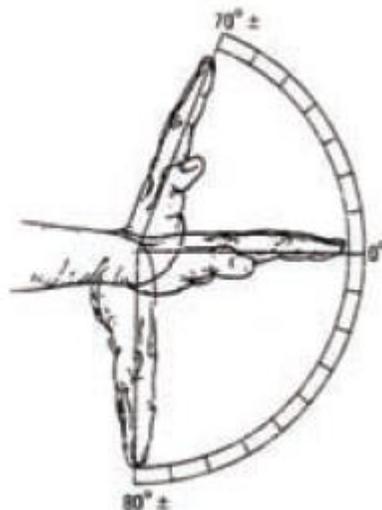


Figura n° 23. Ángulos de movimiento de la muñeca. En extensión $+70^\circ$, en neutro 0° y en flexión $+80^\circ$. [43]

- FES. Se aplica electroestimulación para realizar la apertura y cierre de la mano.

Eventualmente según la progresión del paciente se puede agregar un cuarto proceso:

- FES. Se aplica electroestimulación para realizar la presión de un objeto y llevarlo a la boca a través de la flexión del codo estimulando el músculo supinador largo.

3. *Colocar al paciente adecuadamente según la técnica decidida:* sentado con el brazo afecto sobre una mesa con codo en neutro y antebrazo en neutro (ver figura n°24) [19]. Con el objetivo futuro de efectuar con EEF la presión de un objeto y llevarlo a la boca a través de la flexión del codo.

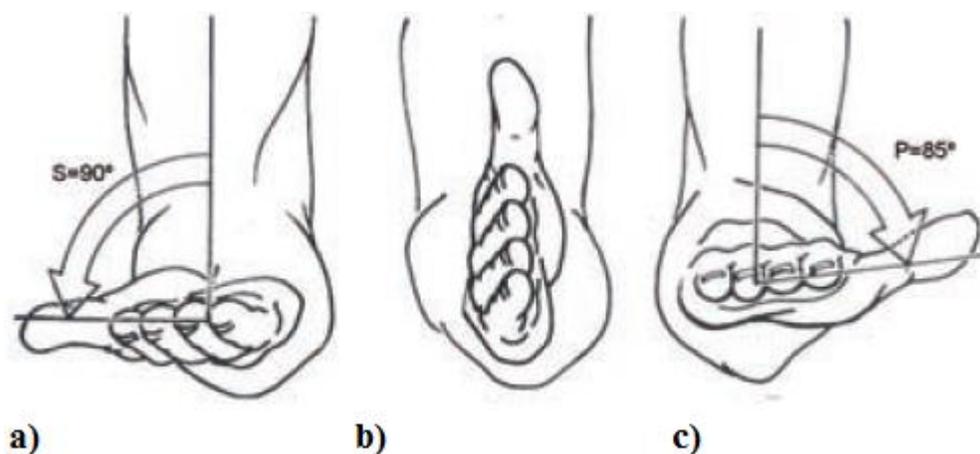


Figura n° 24. Pronosupinación del antebrazo. En a) supinación en 90° , en b) neutro y en c) pronación en 85° . [43]

4. *Cuidar y vigilar las posibles derivaciones eléctricas entre el paciente y tierra u otros aparatos eléctricos próximos.*

5. *Descubrir la zona tratada evitando compresiones o estrangulamientos con las prendas replegadas. Con anterioridad pedirle al paciente que en lo posible lleve poleras con el antebrazo descubierto.*
6. *Explicar al paciente lo proyectado y advertirle las sensaciones, evitando dolores o molestias.*
7. *Explicar al paciente la existencia de un botón de pánico (figura n°25)*



Figura n° 25. Botón de pánico (elaboración propia).

8. *Disponer y preparar los electrodos adecuados. Para la segunda parte de la terapia en que se realiza estimulación eléctrica en los músculos extensores de los dedos se necesitan dos electrodos. Luego para la tercera parte de la terapia en que se realiza estimulación eléctrica funcional en ejercicio de apertura y cierre de la mano se necesitan dos pares de electrodos más para contraer los músculos: abductor del pulgar y flexores de los dedos.*
9. *Disponer o programar el equipo de acuerdo a lo proyectado: definir canales a utilizar, intensidad de corriente inicial. Se elige en simulink el archivo correspondiente al ejercicio de apertura de la mano. Para la tercera parte se abre el archivo de apertura-cierre.*
10. *Fijar y aplicar los electrodos adecuadamente según músculos objetivos.*

Durante la EE de extensión se utiliza el canal n°1 con dos electrodos ubicados en el vientre del músculo extensor de los dedos y el otro en el tendón común de los extensores.

Durante la EEF de apertura-cierre se mantiene el canal 1 y se agrega el canal 2 y el canal 3. El canal 2 corresponde al músculo flexor de los dedos en que un electrodo se ubica en el vientre del músculo y el otro a la altura del tendón del palmar largo. El canal 3 corresponde

al músculo abductor corto del pulgar en que los electrodos se ubican uno al lado del otro en la dirección de la fibra muscular.

11. *Subir la intensidad o potencia adecuada y lentamente.* En estas pruebas se subió la intensidad cada 1mA.
12. *Palpar, observar, preguntar y comprobar sobre la respuesta deseada y si se cumple el objetivo proyectado.* Al paciente se le pregunta si siente la corriente, si siente un cosquilleo, si le duele. El evaluador observa si existe contracción del músculo y si se genera un movimiento.
13. *Buscar mejores respuestas variando los parámetros de la corriente y ubicación de los electrodos.*
14. *Evitar molestias o dolores al paciente y posibles riesgos de quemadura.*
15. *Marcar tiempo de la sesión.* Se recomienda empezar con 10 minutos de terapia y aumentar 10 minutos según se estime conveniente (cada una o dos semanas) hasta 50 ó 60min [8, 33, 41, 34, 40].
16. *Desconectar lentamente e interrogar al paciente sobre la evolución de la sesión.*
17. *Tener en cuenta evolución y datos aportados por nuestra observación directa y comentarios al paciente.* Rangos de movimiento, espasticidad y posición de descanso de la mano.
18. *Tomar notas de los cambios, incidencias y variaciones en la evolución o en los parámetros de la corriente.* Tomar nota de la ubicación de los electrodos y parámetros de estimulación para cada paciente en cada sesión.
19. *Retirar el tratamiento al conseguir los objetivos marcados.*

3.7. Evaluación

La terapia de rehabilitación de la movilidad de la mano hemipléjica espástica tras un ictus es un proceso que debe repetirse 3 a 5 veces a la semana durante 12 a 16 semanas para ver sus resultados [8, 33, 34, 40]. Estos resultados se pueden evaluar a través de diferentes escalas. Las más utilizadas son [43]:

- Escala Fugl-Meyer (FM)

- Escala Modificada de Ashworth (MAS)
- Medical Research Council Scale (MRC)
- Functional Independence Measure (FIM-motor)
- Motor Status Score (MSS).

Tras 12 semanas de estudio las escalas que pueden detectar los cambios son: escala de Ashworth modificada que evalúa espasticidad a través de la flacidez del tono muscular [8, 34], escala de H-Reflex (Hoffmann Reflex) para ver la excitabilidad de las motoneuronas espinales [34] y el test Box and Blocks con mejoras la funcionalidad de la mano [8].

Estudios han utilizado otros test que no detectan bien los cambios en poco tiempo: CMSMR (Chedocke-McMaster Stroke Assessment) para evaluación del daño físico y actividad, Motricity Intex Test para evaluar el aprete, flexión del codo y abducción del hombro, MVC (Maximal Voluntary Contraction) medida con EMG, Active ROM (Range of Movement) Test a través de un dispositivo rastreador en 3D, Circle-drawing test para evaluar la habilidad de coordinar movimiento de hombro y codo [34]. Por otro lado el test de Fugl-Meyer (FM) que evalúa reflejos, calidad de movimiento y fuerza del brazo y mano sirve para evaluar a pacientes crónicos de ictus en mejoras y mantención de sus avances meses después del tratamiento [33].

Capítulo 4. Resultados Experimentales

4.1. Introducción

En este capítulo se da a conocer el equipo estimulador RehaMove 2 Hasomed con su modo para estudiantes Science Mode 2 en que se pueden modificar parámetros de estimulación programando en Matlab Simulink. Con este se realizan pruebas de estimulación en el brazo a través de cambios en parámetros como ancho de pulso o corriente para realizar tres ejercicios: cierre, apertura y apertura-cierre. Se observa la posición de los electrodos en un paciente sano y los efectos de la terapia FES en una paciente secuelada de ACV.

4.2. RehaMove 2 HASOMED

El equipo RehaMove 2 de Hasomed (figura n°26) contiene 8 canales de estimulación y un botón de emergencia. Tiene un test de corriente para modificar la intensidad antes de la terapia y un feedback de progreso en pantalla con colores activo durante y después de la terapia. Está indicado para relajar espasmos musculares, prevenir atrofia, mantener o aumentar el rango de movimiento e incrementar la circulación sanguínea. Tiene una opción Science Mode 2 para controlar el estimulador a través de una interfaz en tiempo real de Simulink con el computador. [44]



Figura n° 26. Equipo estimulador RehaMove2. [44]

4.2.1 Science Mode 2 y Matlab Simulink

Para utilizar el estimulador en Science Mode 2 se conecta el equipo al computador a través de un cable USB. Se enciende el estimulador y se selecciona la opción Science Mode 2. Instalados los drivers se puede comenzar a utilizar la interfaz en simulink (Matlab). La interfaz se programa a través de un bloque con sincronización en tiempo real (figura 27). [45]

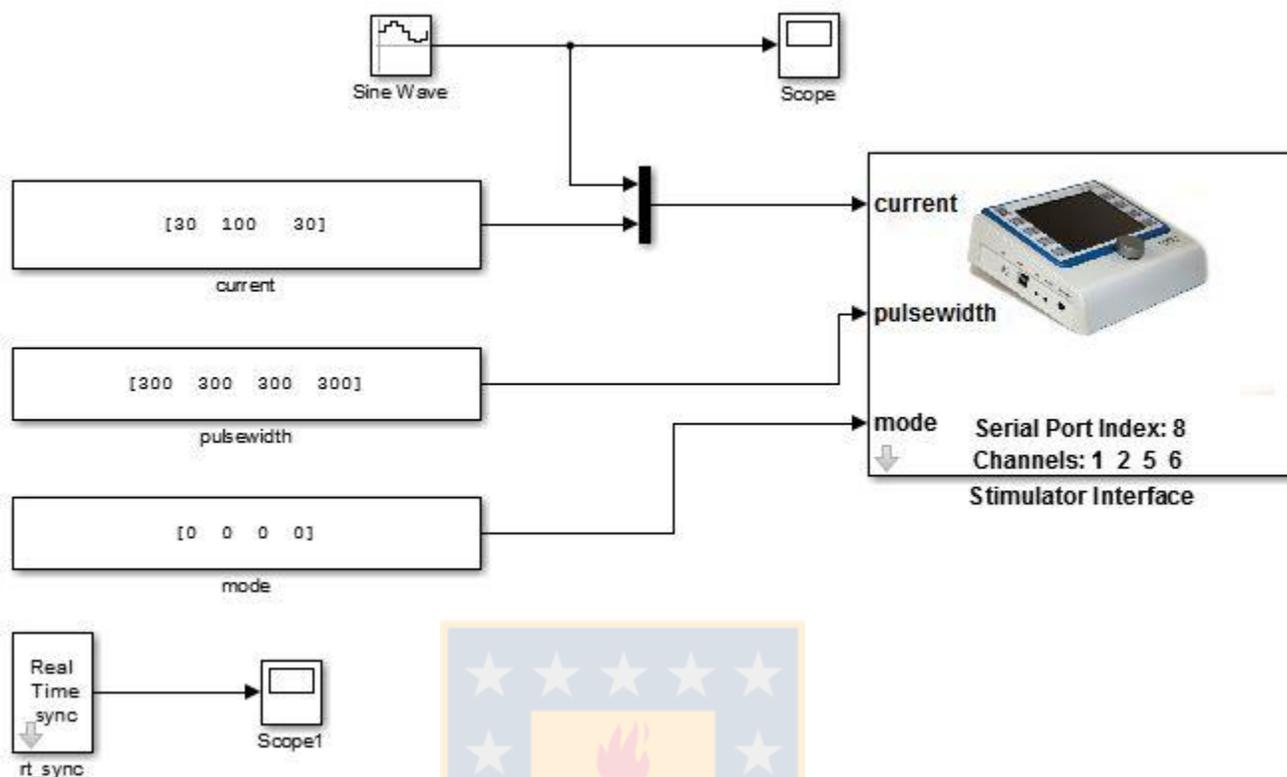


Figura n° 27. Diagrama de simulink con la interfaz de usuario y bloque de estimulación real. [45]

El bloque de interfaz del estimulador se presenta en la figura n°27 con tres entradas: corriente, ancho de pulso y modo. Si se desactivan los pulsos dobles y triples el bloque tiene dos entradas: corriente y ancho de pulso. En la figura 8 se observa un multiplexor que junta ordenadamente las corrientes según el canal. La onda sinusoidal es enviada al canal 1 en este caso y a los canales 2,3 y 4 están siendo enviadas corrientes de 30, 100 y 30mA respectivamente. Los anchos de pulso también son modificados según el orden de los canales. En el bloque mode 0 corresponde a pulsos simples, 1 corresponde a pulsos dobles y 2 corresponde a pulsos triples.

En el bloque de interfaz del estimulador (Stimulator Interface en Figura n°27) se encuentran los parámetros que se deben modificar para generar estímulos (Figura n°28) [45]:

- **Sample Time:** Periodo en milisegundos de actualización de los parámetros de estimulación. Usualmente corresponde al periodo de estimulación.
- **Serial Port:** Puerto de serie utilizado (COM3).
- **Channels to be stimulated:** Indica los canales activos.

- Main Pulse Interval (t1): Tiempo en que se repiten los pulsos seleccionados. Se sigue la ecuación: $t1 \geq nPgr * t2$ donde nPgr es el modo de pulsos seleccionado. Si t1 es cero el periodo de estimulación es determinado por el computador según el tiempo de muestreo (simple time).
- Inter Pulse Interbal (t2): Tiempo entre dos grupos de impulsos en el caso de seleccionar pulsos dobles o triples. El mínimo es de 8ms.
- Low frequency channels: Indica los canales que tienen una frecuencia menor a los demás.
- Low frequency factor: Define cuántas veces se omite la estimulación en los canales de baja frecuencia especificados.
- Enable doublets and triplets: Habilita los modos: doble y triple.



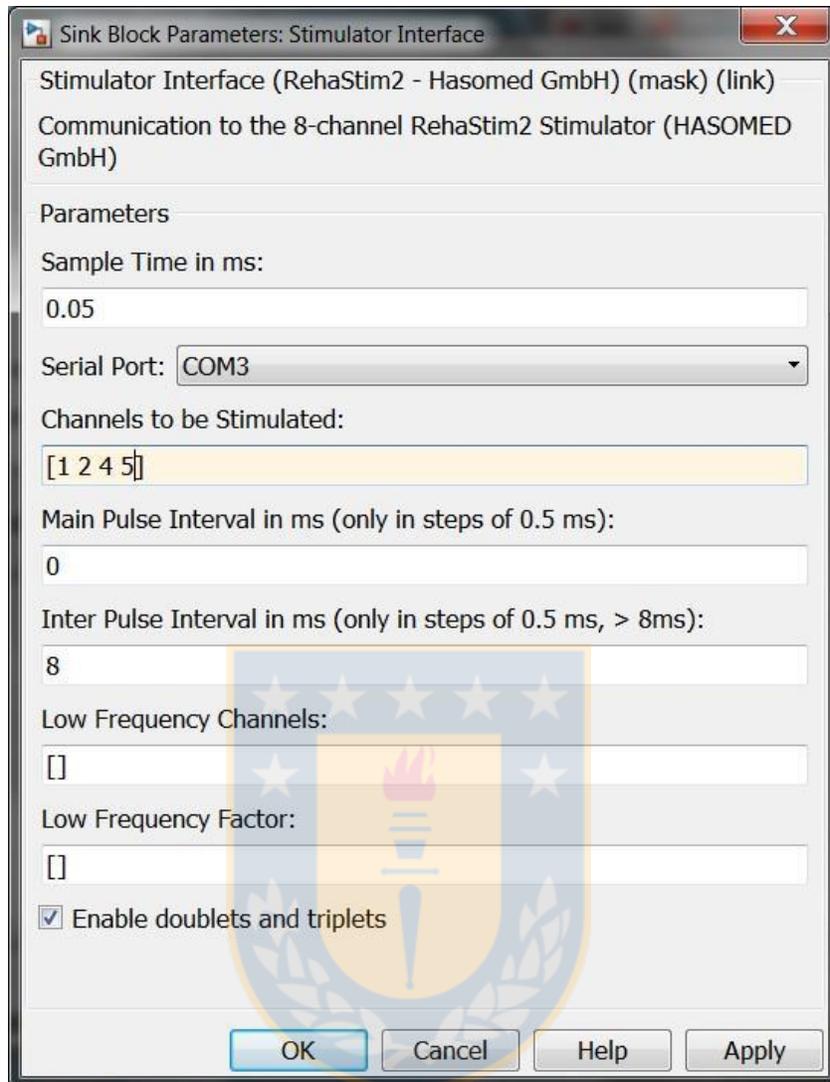


Figura n° 28. Interfaz de parámetros de estimulación. [45]

4.3. Parámetros

Se utilizan los siguientes parámetros para las pruebas:

- Sample Time: 0.05
- Channels to be stimulated: según ejercicios se utiliza 1, 1 2 ó 1 2 3.
- Main pulse interval in ms: 16 (62.5Hz)
- Pulsos bifásicos cuadrados.
- Corriente modulada con 10mA en su máxima intensidad (figura n°29). La fase de ascenso (ON) dura 1.5 segundos, la fase de trabajo dura 6 segundos, la fase de descenso (OFF) dura 0.5 segundos y la fase de pausa es de 8 segundos.

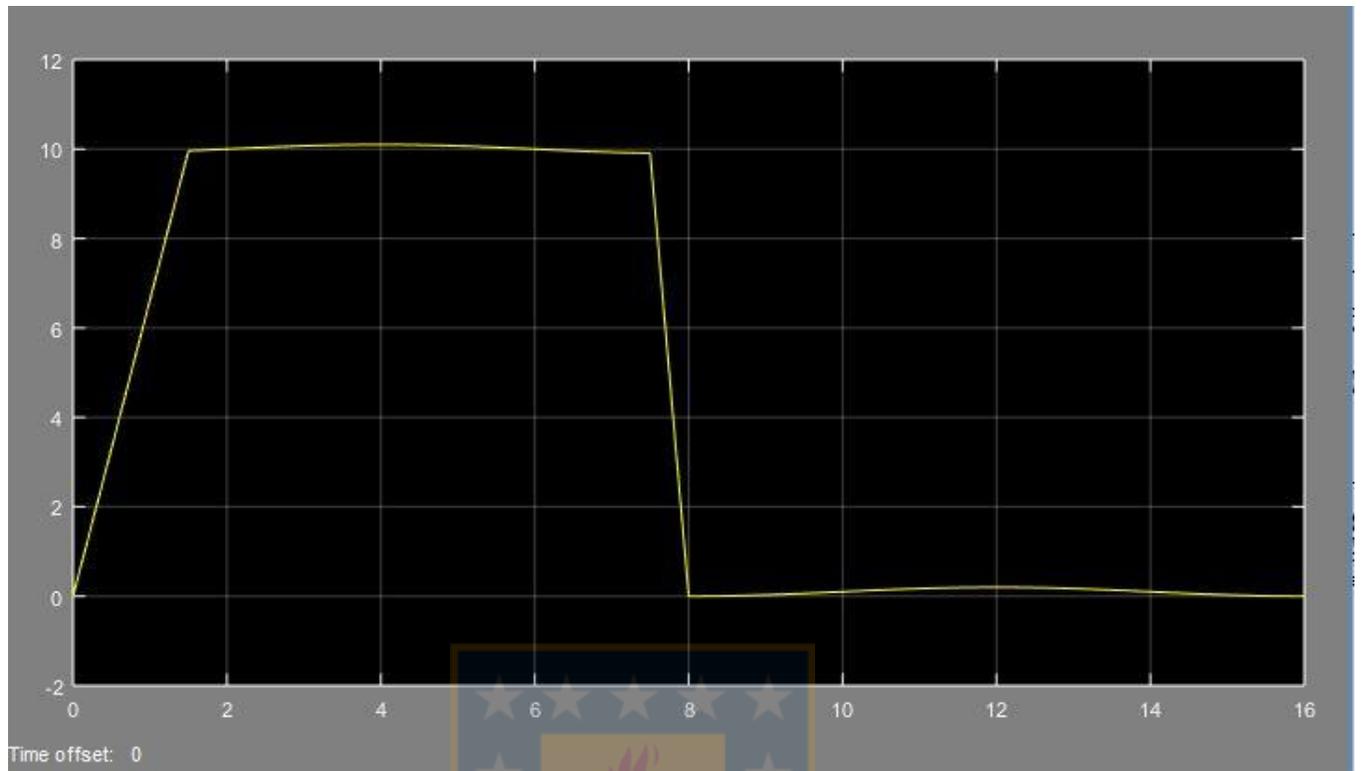


Figura n° 29. Forma de onda de la corriente modulada (elaboración propia).

La corriente modulada se ajusta a través de una ganancia en cada canal. Según el ejercicio a realizar se utiliza uno o más canales. En la figura n°30 se observa el ejercicio de apertura y cierre de los dedos en que se utilizan 3 canales de estimulación: uno para extender los dedos y dos para flexionar los dedos.

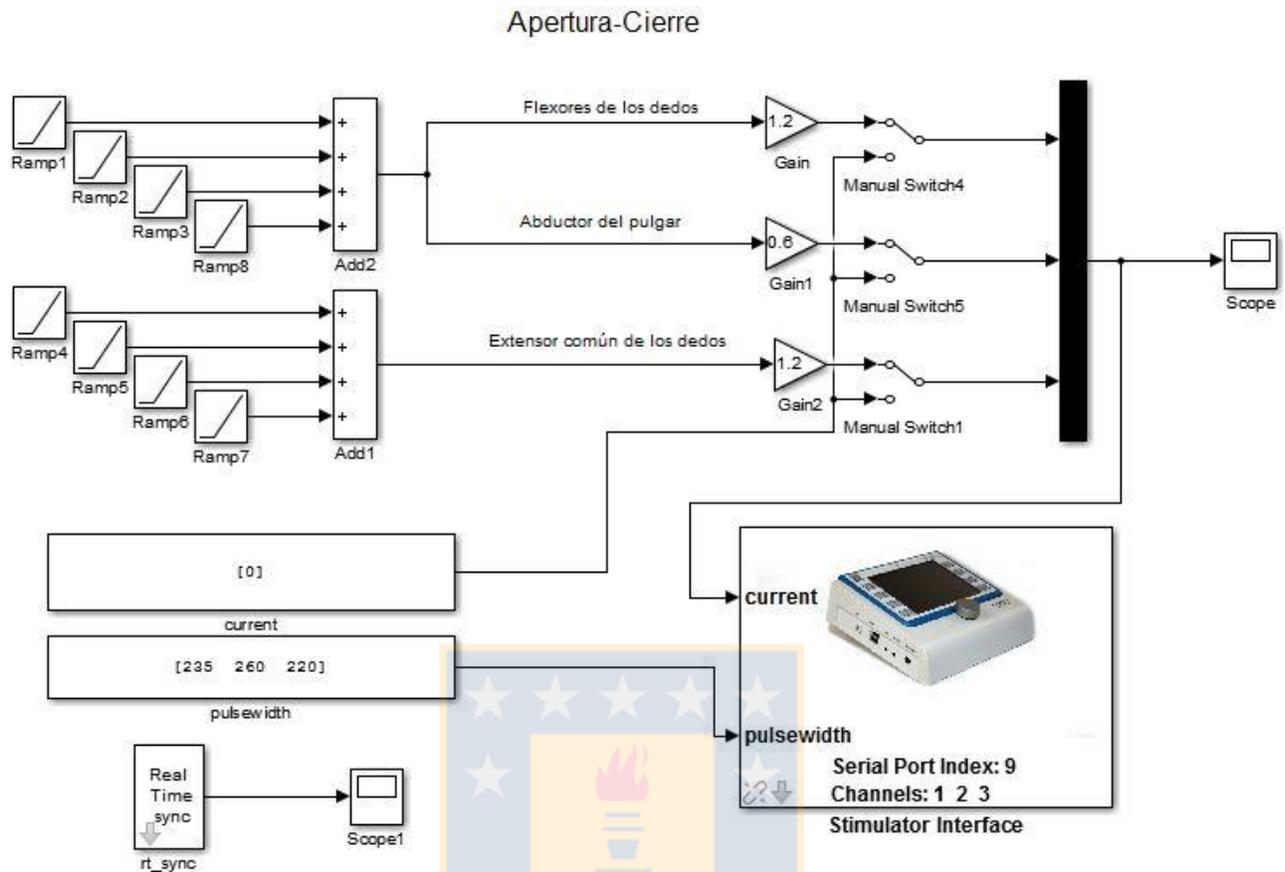


Figura n° 30. Ejercicio de apertura-cierre en Simulink. Se observan las diferentes ganancias para cada estímulo (Gain) y los distintos valores de ancho de pulso (pulsewidth) (elaboración propia).

Este ejercicio se divide en dos partes: primero se estimulan los músculos extensores y luego los músculos flexores 2 segundos cada músculo. La corriente se encuentra en tiempos desfasados como se observa en la figura n°31: el canal 3 comienza en el segundo 0, los canales 1 y 2 comienzan en el segundo 3.5. Cada canal está con distintas ganancias según tolerancia del paciente y del músculo estimulado. Entre más grandes son los músculos es necesario utilizar más corriente para lograr la contracción efectiva.

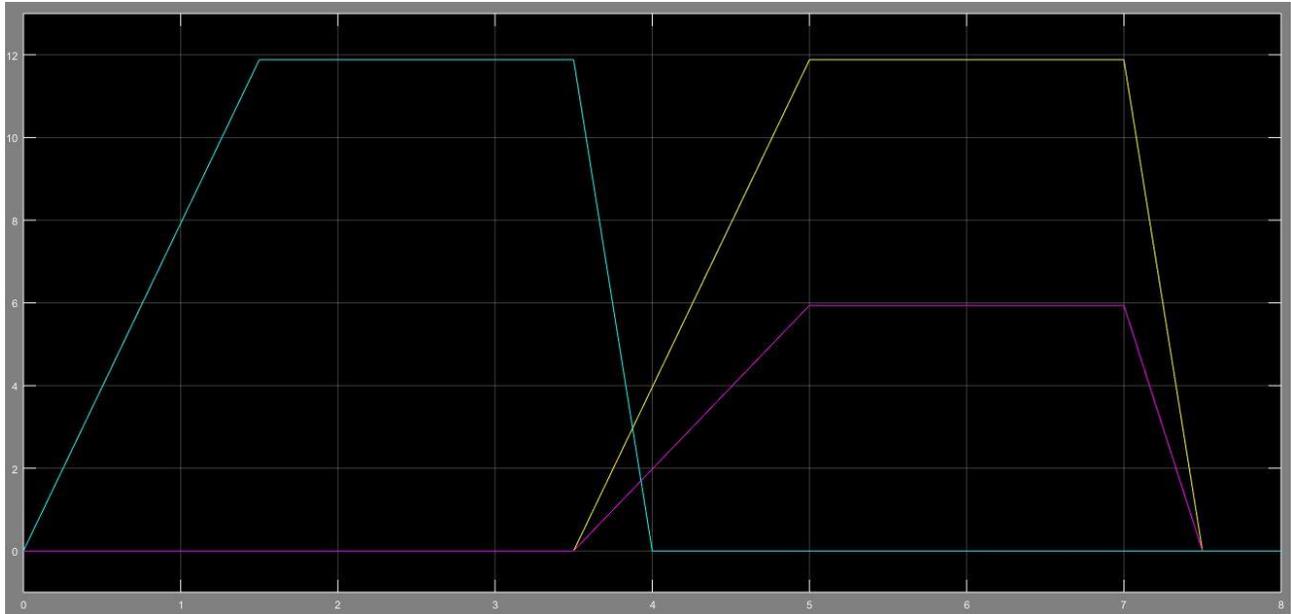


Figura n° 31. Corriente modulada en tres canales en el ejercicio de apertura y cierre de los dedos (elaboración propia).

4.4. Pruebas en una Persona Sana

Para las pruebas de movimiento se utilizó el equipo RehaMove2 en programa Science Mode 2 con el software Simulink de Matlab y electrodos transcutáneos cuadrados de 5x5cm (figura n°32).

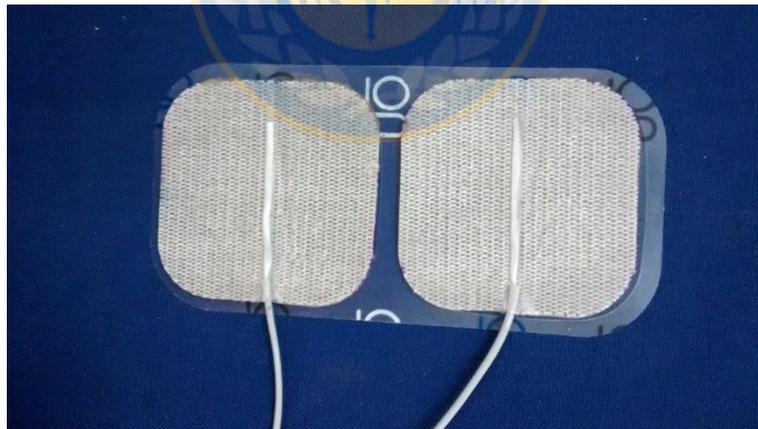


Figura n° 32. Electrodos transcutáneos (elaboración propia).

En el movimiento de apertura de la mano los dedos se extienden. Para realizar la apertura de la mano en Simulink se activa solo el canal 1 en el bloque Simulator Interface debido a que sólo se activa el músculo extensor común de los dedos. La ubicación de los electrodos es en el vientre del músculo en la parte posterior del antebrazo como se observa en la figura n°33.



Figura n° 33. Ubicación de los electrodos para realizar el movimiento de apertura (elaboración propia).

El movimiento de aprete se refiere al cierre de los dedos de la mano. Para hacer el ejercicio de aprete de En Simulink se activan los canales 1 y 2 en el bloque Simulator Interface. Al estimular el antebrazo a nivel del músculo flexores de los dedos y del músculo del oponente del pulgar. Se ponen en el antebrazo por el lado anterior dos electrodos por porción de músculo (figura n°34) siendo un total de 4 electrodos.

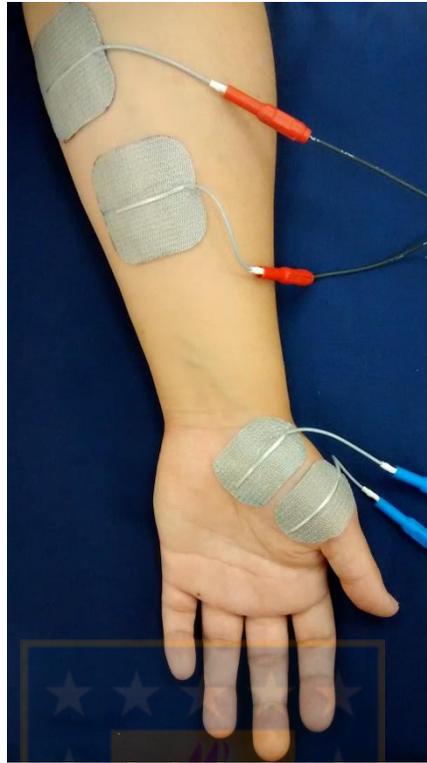


Figura n° 34. Ubicación de los electrodos para realizar el movimiento de cierre (elaboración propia).

Para el ejercicio combinado de apertura y cierre de la mano se estimulan primero los músculos extensores y luego los músculos flexores por lo que es necesario ubicar todos los electrodos indicados en sus posiciones.

Los resultados de los ejercicios de estimulación fueron los esperados. La mano del paciente sano a partir de una posición de descanso en neutro (figura n°35a) responde a la terapia haciendo los movimientos de apertura (figura n°35b), cierre (figura n°35c) y el ejercicio combinado de forma correcta e involuntaria.

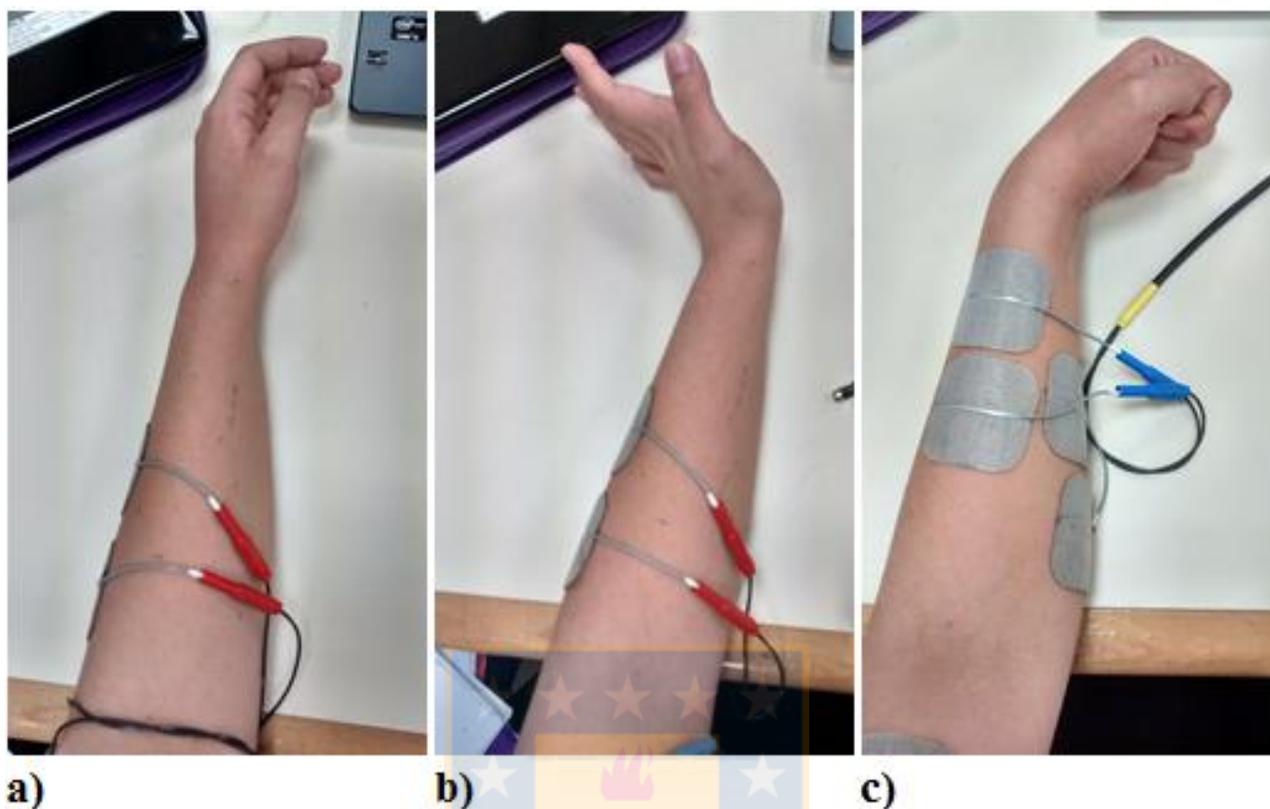


Figura n° 35. Posiciones de la mano de un paciente sano durante la terapia FES. En a) se observa la posición de inicio o de descanso, en b) se observa el movimiento de la apertura de los dedos y en c) el movimiento de cierre de los dedos (elaboración propia).

4.5. Pruebas en Paciente Secuelado

Se realizaron pruebas experimentales aplicando estimulación eléctrica funcional a una paciente (62 años) secuelada con hemiplejia espástica del miembro superior izquierdo tras un evento de accidente cerebrovascular 8 años atrás. La paciente tiene un rango de movimiento reducido en la articulación del hombro y tiene poca sensibilidad al tacto. Las pruebas fueron realizadas junto a un Kinesiólogo para asegurar no sobrepasar los rangos ni ejercer movimientos no indicados y se presentó a la paciente el consentimiento informado de las pruebas que se realizarían.

En las posiciones de reposo de la mano y muñeca en una persona sana se tiene un rango de movimiento amplio dependiendo de la posición. Estos se observan en la figura n°36. Sin embargo al iniciar la sesión de estimulación la paciente mantenía una posición del brazo con la muñeca y los dedos en flexión como se observa en las imágenes de la figura n°37 debido a su espasticidad. En la figura n°37b se observa la presión que ejerce el pulgar sobre el índice.

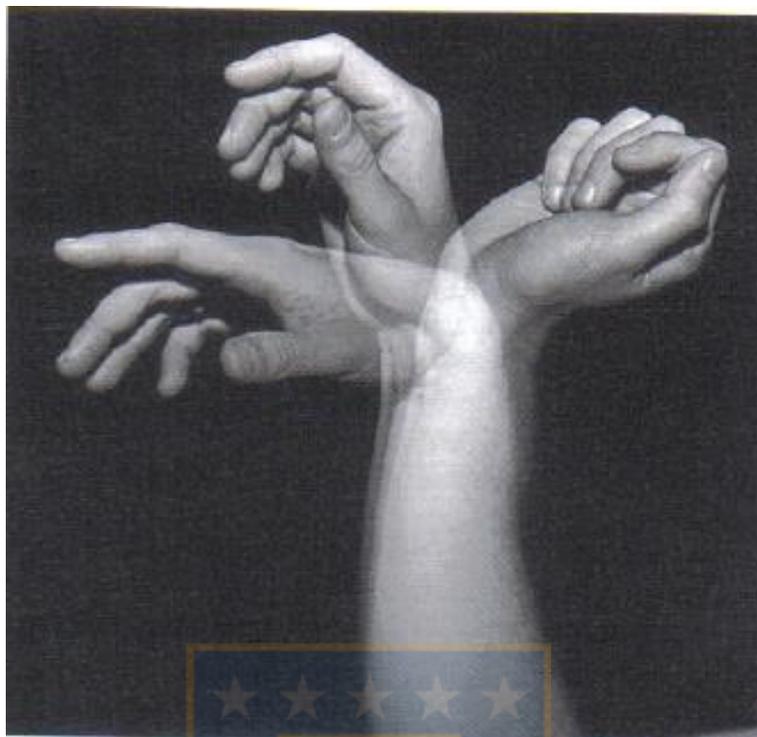


Figura n° 36. Rangos de movimiento de la muñeca en una persona sana [46]

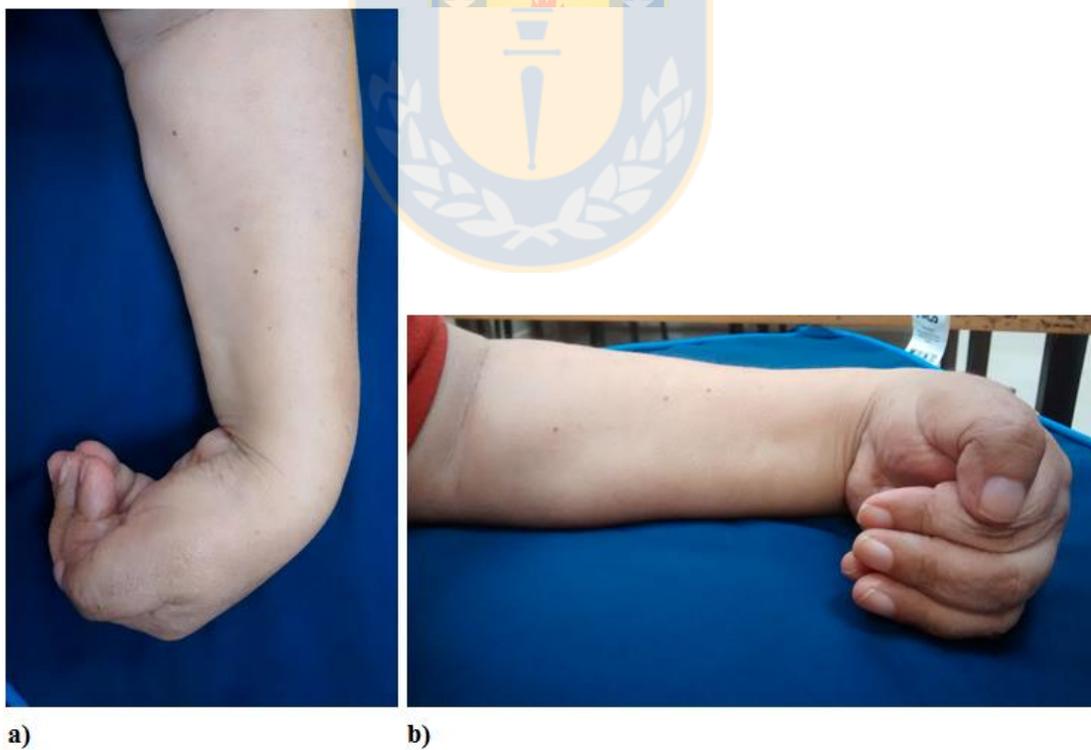


Figura n° 37. Posición inicial de reposo del brazo del paciente. Vista superior en a) y vista lateral en b) (elaboración propia).

La posición correcta que el paciente debe tener durante la terapia es con los pies en el piso, espalda recta sin apoyo, brazo apoyado en una mesa en la altura del antebrazo con el codo en flexión de 90° y el antebrazo y muñeca en neutro (ver figura n°38). Como los pacientes generan posturas adaptativas esta posición puede ser difícil o agotadora por lo que se debe corregir en caso de ser necesario.



Figura n° 38. Posición correcta del paciente durante la terapia (elaboración propia).

En las pruebas con la paciente la posición le generaba cansancio en la espalda por una debilidad en los músculos del abdomen por lo que se apoyaba en el respaldo generando una diferencia en los parámetros de estimulación. La mala postura provoca el cierre de los dedos y flexión de la muñeca afecta involuntariamente. Se necesita más corriente (2-3mA) para lograr los mismos resultados de apertura de la mano y en algunos casos menor espacio de apertura.

Primero se posicionaron los electrodos para el ejercicio de apertura de la mano, se buscaron los parámetros de corriente y con ellos se hizo el ejercicio 10 minutos hasta que la mano tuvo un espacio óptimo y constante para tomar un objeto pequeño. Luego se posicionaron los electrodos en los músculos flexores para realizar el ejercicio combinado, se buscaron los parámetros de corriente adecuados y se confirmaron los parámetros del ejercicio anterior. A pesar de que no pasaron más de 2min los parámetros de corriente para contraer los músculos extensores ya habían cambiado por lo

que se repitió ese procedimiento. Se recomienda ubicar todos los electrodos a utilizar dentro de la terapia y buscar sus parámetros de estimulación al comienzo, esto facilita la eficacia de la terapia y minimiza el tiempo de duración. El ejercicio de apertura y cierre se realiza durante 10min continuados. Diez minutos de terapia equivalen a 50 repeticiones aproximadamente, siendo menos repeticiones cuando el evaluador detiene la terapia para modificar parámetros o ajustar electrodos.

En la búsqueda de la corriente apropiada, la ubicación correcta de los electrodos y en momentos en que varió la posición de la paciente en alguna oportunidad esta presentó molestia o dolor e inmediatamente presionó el botón de pánico. Si bien la persona puede avisar verbalmente el tratante tarda un tiempo en presionar el botón de pausa, en cambio el botón detiene inmediatamente la estimulación.

En el ejercicio de electroestimulación del músculo extensor de los dedos la mano afecta parte en una posición de descanso (figura n°39a y 39c) y con la estimulación se extienden los dedos y la muñeca (figura n°39b y 39d) aumentando progresivamente el ángulo de extensión a través del tiempo haciendo el ejercicio.



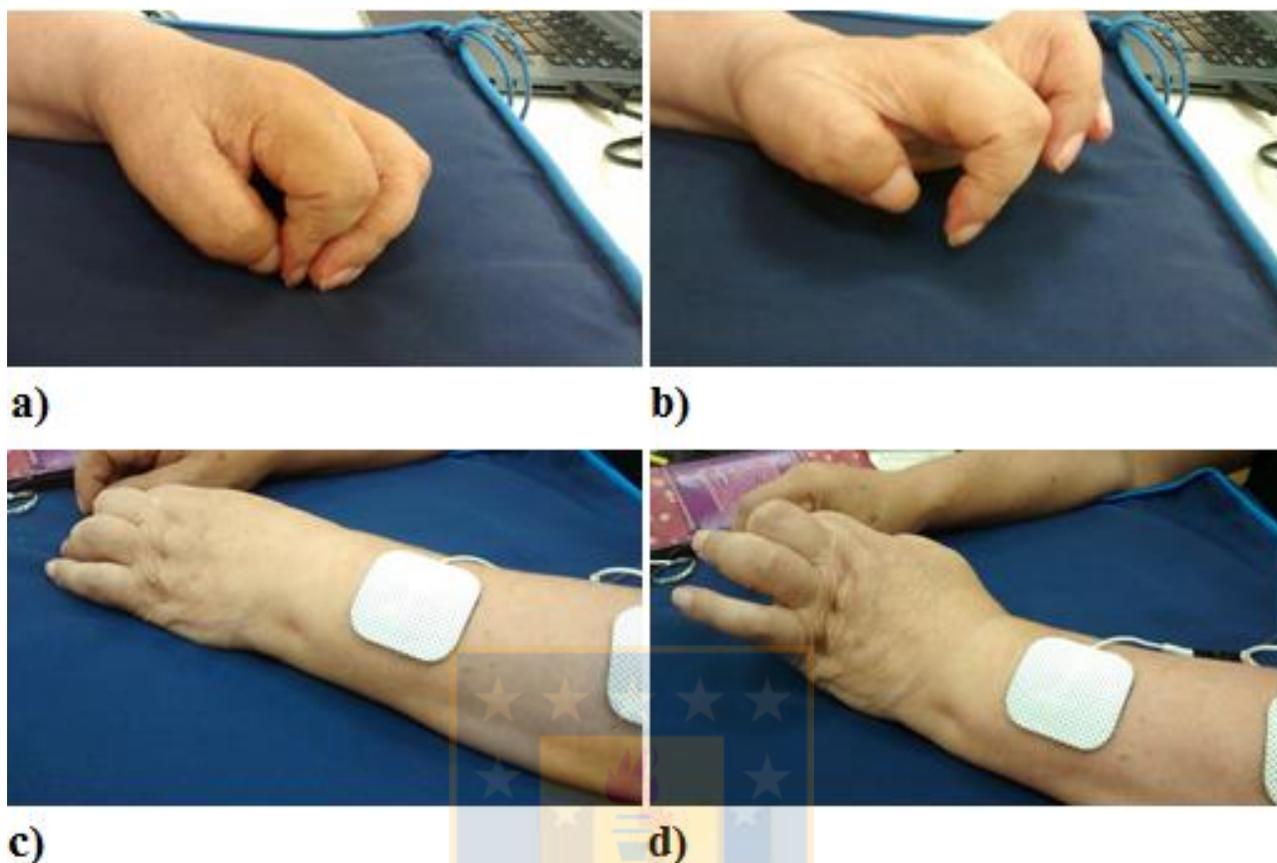


Figura n° 39. Ejercicio de apertura. En a) y en c) se observa la posición de la mano antes de aplicar la estimulación, en b) y en d) se observa la extensión de los dedos y de la muñeca con la estimulación (elaboración propia).

En el ejercicio de FES para apertura y cierre de los dedos el objetivo en un principio era soltar un alcohol gel y luego volver a tomarlo. Tras 3 sesiones de terapia el objetivo cambió a una mejor técnica tomando el alcohol gel con la mano sana y cambiándolo a la mano afectada. La mano hemipléjica parte en la posición de descanso (figura n°40a), se abre para alcanzar el objeto figura n°40b) y luego se cierra para mantenerlo en su mano (figura n°40c).

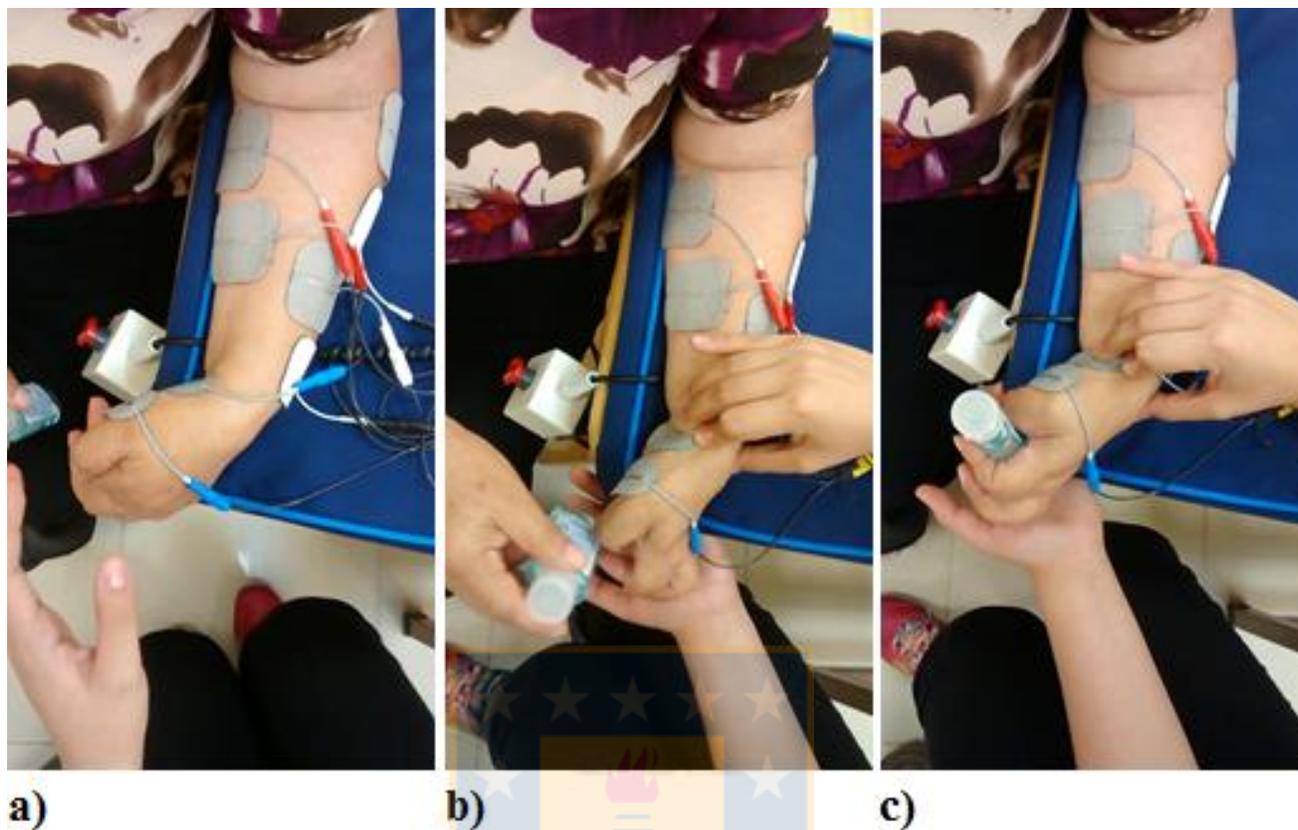


Figura n° 40. Ejercicio de apertura-cierre. En a) se observa la posición antes de aplicar la estimulación, en b) se observa la extensión de los dedos y en c) la flexión de los dedos para tomar el objeto (elaboración propia).

Al ubicar la mano en la posición neutra y estimular los músculos extensores la mano esta se desvía hacia cubital (figura n°41) y no llega la corriente hasta el pulgar. Sin embargo cuando el terapeuta presiona la muñeca en el inicio del radio para evitar esta desviación la mano genera una mayor apertura y menor desviación del eje neutro.



Figura n° 41. Desviación radial y desviación cubital de la mano. [46]

Si bien la posición de apertura de los dedos en un paciente normal corresponde a las vistas anteriormente en la figura n°23 y la figura n°35b en un paciente secuelado con espasticidad del miembro superior al estimular los músculos extensores de los dedos la mano se pone en una posición extrínseca-plus (figura n°42). Esto se debe a que los músculos extrínsecos de la mano (extensor de los dedos, flexor superficial de los dedos y flexor profundo de los dedos) se mantienen contraídos flexionando las articulaciones interfalángicas. La acción contraria tiene el nombre de intrínseca-plus en que se contraen los músculos intrínsecos (lumbricales e interóseos) y se flexionan las articulaciones metacarpofalángicas.

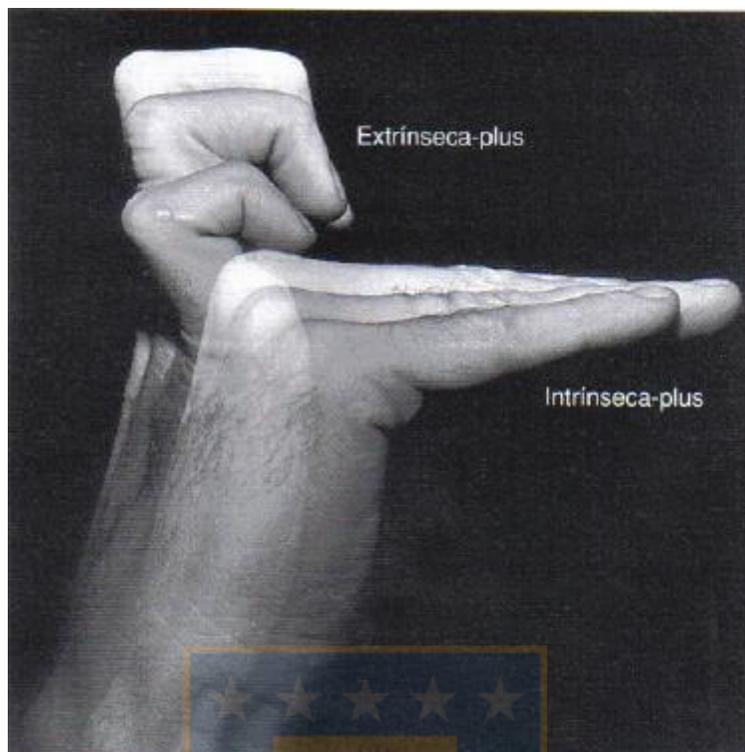


Figura n° 42. Posiciones de los dedos extrínseca-plus e intrínseca-plus. [46]

Antes de la estimulación la muñeca estaba en neutro y los dedos flexionados (figura n°43a). Específicamente el dedo anular presentó un ángulo de 15° de flexión. Durante la estimulación de extensión (figura n°43b) la muñeca se extendió 27° y a su vez el dedo anular se extendió 23° . Durante la estimulación de flexión (figura n°43c) la muñeca se flexionó 47° y a su vez el dedo anular se flexionó 30° .

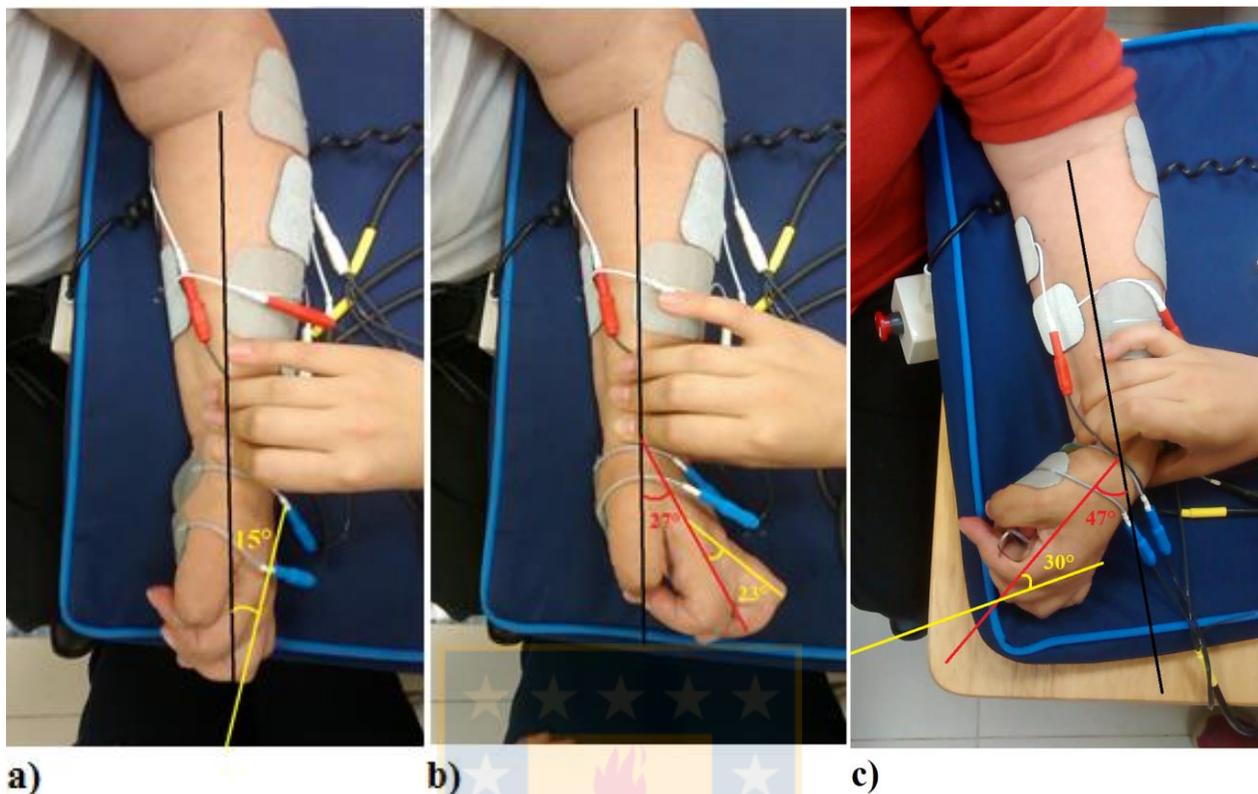


Figura n° 43. Ángulos de la muñeca (color rojo) y del dedo anular (color amarillo). En a) se muestra la posición de la mano antes de la EE, en b) la posición durante la EE de extensión y en c) durante la EE de flexión. (Elaboración propia).

La evolución de la extensión máxima de la muñeca se observa en la figura n°44. Antes de la terapia la paciente presentó un ángulo de 54° de flexión de la muñeca como apertura máxima (figura n°44a). Luego de la intervención con kinesiólogo la paciente presentó un ángulo de 6° de flexión de la muñeca (figura n°44b). Finalizada la terapia luego de la estimulación eléctrica funcional la muñeca presentó un ángulo de extensión de 13° (figura n°44c). Por lo tanto la paciente en una sesión de terapia aumentó su rango de movimiento en 67° .

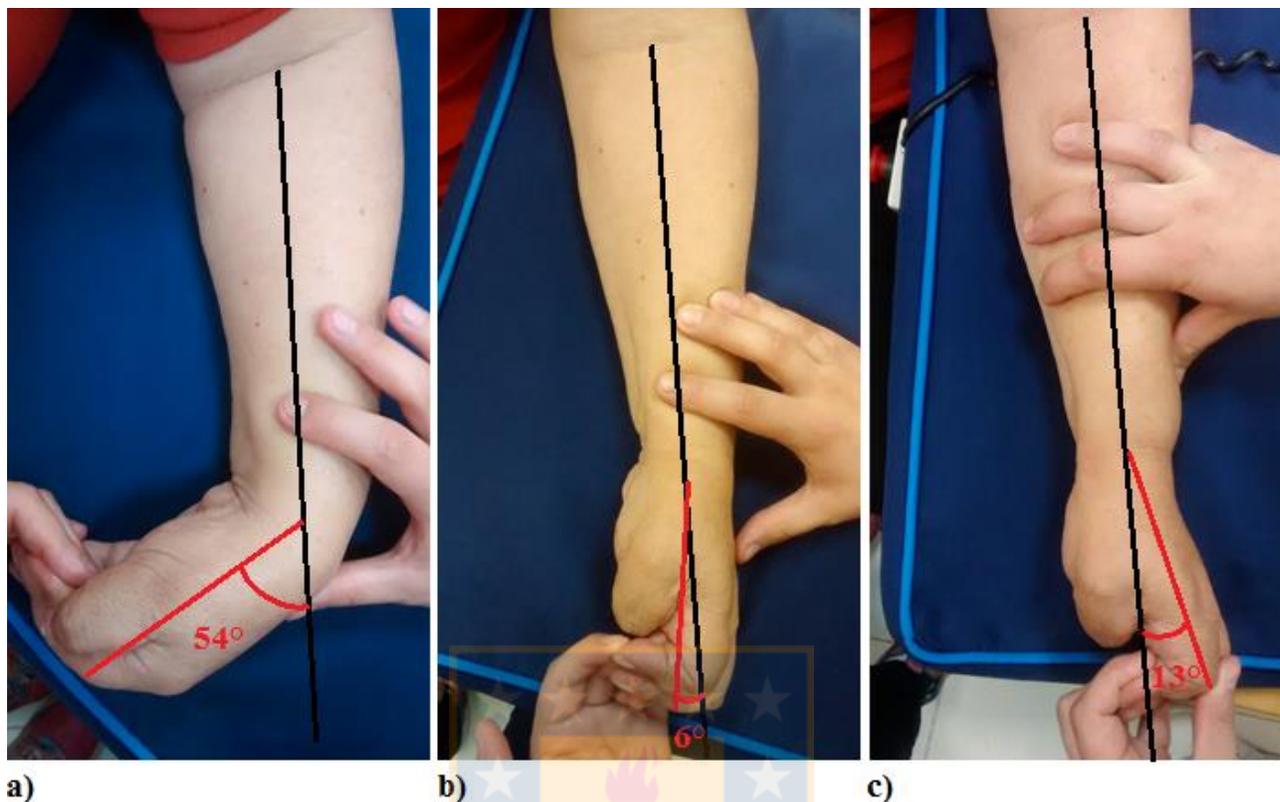


Figura n° 44. Evolución de la extensión de la muñeca en reposo. En a) los ángulos están tomados antes de la terapia, en b) después de la intervención con kinesiólogo y en c) después de la EEf. (Elaboración propia).

En resumen la terapia se divide en tres partes: ejercicios kinesiológicos, EE de la extensión de la mano y FES de extensión y flexión de la mano. La duración de cada etapa y repeticiones se dan a conocer en la TABLA II. También se observan los ángulos antes, durante y después de cada ejercicio.

TABLA II. Sesión de Terapia

Ejercicio	Duración	Repeticiones	Ángulo antes	Ángulo durante	Ángulo en reposo
Antes	-	-	-	-	54° flexión
Terapia Kinesiológica	40min aprox.	-	54° flexión	-	6° flexión
EE Extensión de la Mano	10min	50	0° muñeca 15° flexión anular	27° extensión muñeca 23° extensión anular	-
FES Extensión y Flexión	15min	50	0° muñeca 15° flexión anular	27° extensión muñeca 23° extensión anular 47° flexión	13° extensión

				muñeca 30° flexión anular	
Total	65min	-	-	-	67°



Capítulo 5. Conclusiones

5.1 Conclusiones

La evidencia ha demostrado que durante los primeros 6 meses (fase aguda) luego de un ACV al realizar rehabilitación del miembro superior con estimulación eléctrica funcional se pueden mejorar condiciones de espasticidad en la hemiplejía. A pesar de esto en Chile no se realiza rehabilitación con equipos FES en estos pacientes.

Estudios destacan que se puede volver a generar movimiento del miembro superior hemipléjico años después de un ACV, por lo que se incentiva su rehabilitación con el uso de FES.

Dentro de las ventajas de rehabilitar el miembro superior está la recuperación de la manipulación de objetos y la ejecución de tareas bimanuales como: soporte, apoyo.

Dada la importancia de un grupo multidisciplinario en la rehabilitación y de los efectos de la utilización de estimulación eléctrica funcional en pacientes secueledos de ACV, se realizaron 4 sesiones de terapia combinada a una paciente de 62 años con hemiplejía espástica del brazo izquierdo tras un ACV. Se realizó una terapia dividida en tres partes: terapia con kinesiólogo (manipulación de los tejidos blandos, estiramientos y terapia manual), terapia con electroestimulación (en los músculos extensores de los dedos) y terapia con EEF (ejercicio con apertura y cierre de la mano al tomar un objeto) en los músculos extensores de los dedos, flexores de los dedos y abductor del pulgar. La terapia tuvo duración de una hora.

La estimulación eléctrica funcional aumenta los rangos de movimiento de la muñeca y de los dedos durante el ejercicio. Sin la estimulación la paciente mantuvo una posición con la muñeca en 0° y los dedos flexionados 15°. Con estimulación eléctrica en los músculos extensores de los dedos la muñeca se extendió 27° y los dedos 23°. Con estimulación eléctrica en los músculos flexores de los dedos la muñeca se flexionó 47° y los dedos se flexionaron 30°.

Con el protocolo de terapia empleado aumentan los rangos de movimiento del miembro superior en reposo progresivamente a través de las distintas etapas. Antes de la terapia con kinesiólogo la muñeca se mantuvo con una flexión de 54°. Antes de la electroestimulación la muñeca se mantuvo en 6° de flexión en reposo. Luego de la terapia FES la muñeca logró alcanzar los 13° de extensión.

5.2 Trabajo Futuro

Realizar la terapia propuesta en un grupo de 15 personas secueledas con hemiplejia espástica del miembro superior luego de un accidente cerebrovascular, con una duración de 6 a 8 meses por paciente para observar y evaluar la recuperación de la funcionalidad.



Bibliografía

- [1] “*Estadísticas Vitales Anuario 2013*” [online] Instituto Nacional de Estadísticas Chile, 2013. Disponible en: http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario_de_publicaciones/pdf/completa_vitales_2013.pdf
- [2] J. Espinoza, J. Espinoza, and L. Morán. “*Principales Causas de Muerte en Chile por Regiones*” [online], Instituto Nacional de Estadísticas Chile, pp 119-127, 2003. Disponible en: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/demografia_y_vitales/estadisticas_vitales/pdf/causas_de_muerte_regiones%202003.PDF
- [3] “*El atlas de cardiopatías y accidentes cerebrovasculares*” [online] World Health Organization, 2004. Disponible en: http://www.who.int/cardiovascular_diseases/resources/atlas/en/#
- [4] Dr. P. Lavados “*Unidades de Tratamiento del Ataque Cerebrovascular (UTAC) en Chile*”, Revista Médica Chile, 2005.
- [5] A. Moyano. “*El accidente cerebrovascular desde la mirada del rehabilitador*” Hospital Clínico Universidad de Chile, 2010.
- [6] I. Morales and J. Villalón. “*Chile y los Adultos Mayores Impacto en la Sociedad del 2000*”. Instituto Nacional de Estadísticas 31, 1999.
- [7] Ch. H. Wu “*El Pez Eléctrico y el Descubrimiento de la Electricidad Animal*” Elementos: Ciencia y Cultura. 2007
- [8] M. Glanz MD, S. Klawansky MD PhD, W. Stason MD, C. Berkey PhD and T. Chalmers MD. “*Functional Electrostimulation in Poststroke Rehabilitation: A Meta-Analysis of the Controlled Trials*” American Congress of Rehabilitation Medicine and the American Academy of Physical Medicine and Rehabilitation, 1996.
- [9] J. Cauraught PhD, K. Light PhD PT, S. Kim MS, M. Thigpen PT MHS and A. Behrman PhD PT. “*Chronic Motor Dysfunction After Stroke Recovering Wrist and Finger Extension by Electromyography-Triggered Neuromuscular Stimulation*” Motor Control Laboratory, Center

for Exercise Science, University of Florida, Marzo 2000.

- [10] T. Sentandreu, J. Salom, J. Tomás, J. Meléndez, T. de la Fuente and C. Company. *“Electroestimulación en el tratamiento de la mano hemipléjica espástica después de un ictus: estudio aleatorizado”* Escuela Universitaria de Fisioterapia, Hospital Doctor Peset, Departamento de Metodología de las Ciencias del Comportamiento, Departamento de Psicología Evolutiva y de la Educación, Valencia, España. Octubre 2010.
- [11] C. Criollo, D. López and M. Jojoa *“Diseño e implementación de un módulo electromecánico para la rehabilitación física de la mano derecha afectada como secuela de un ataque cerebrovascular”* Revista Universidad y Salud, Octubre 2011[2].
- [12] A. P. Laquidara, L. M. Zerbino, C. Lagraña and E. Yedinak *“Automioestimulador: Biofeedback aplicado a la rehabilitación”* Universidad Nacional de La Plata, 2013
- [13] J. Gutiérrez, M. Núñez and P. Carrillo *“Avances Tecnológicos en Neurorehabilitación”*. Revista de Investigación Clínica, 2014.
- [14] *“Accidente Cerebrovascular”* [online] Medline Plus, Biblioteca Nacional de Medicina de los Estados Unidos . Enero 2015. Disponible en: <https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/000726.htm>
- [15] L. Ritter PHD RN and B. Coull MD *“Lowering the Risks of Stroke in Women (and Men)”* [online] Sarver Heart Center. The University of Arizona. 2015. Disponible en: <http://heart.arizona.edu/heart-health/preventing-stroke/lowering-risks-stroke>
- [16] *“Accidente Cerebrovascular”* [online] Geosalud, 2016. Disponible en: http://www.geosalud.com/Enfermedades%20Cardiovasculares/accidente_cerebrovascular.htm
- [17] *“Post-Stroke Rehabilitation”* US Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Institutes of Health. Septiembre 2014
- [18] *“Guía Práctica Clínica para el Manejo de Pacientes con Ictus en Atención Primaria”* Capítulo 6.3 Secuelas y Complicaciones y tras un Ictus. Ministerio de Sanidad y Política Social España, 2009.
- [19] J.Carr *“Rehabilitación de pacientes en el ictus”* Capítulo 5. Australia, 2004
- [20] Úrsula Costa Boned *“Modelado del Proceso de Neurorehabilitación del Ictus Mediante un*

- Nuevo Sistema de Valoración Cinemático*". Pp 31-33. Universidad Autónoma de Barcelona. 2014
- [21] "Armeo Therapy Concept" Hocomo. p. 5: Features and Functions.
- [22] "ALEX" Kinetek wearable robotics. Products. Disponible en: <http://www.wearable-robotics.com/kinetek/products/alex/>
- [23] "SaeboReJoyce" Saebo. Intensive Training with Saebo NeuroGaming. Disponible en: www.saebo.com/saebo-rejoyce/
- [24] "Gloreha Professional 2" Gloreha Hand Rehabilitation Glove. Disponible en: <http://www.gloreha.com/professional/>
- [25] "RT200 FES Rehabilitation Therapy Sistem" Restorative Therapies. Disponible en: http://www.restorative-therapies.com/rt200_fes_rehabilitation_therapy_system
- [26] "Helping Patients Regain More Natural Hand Function- With Wireless Freedom" Bioness. Disponible en: http://www.bioness.com/Healthcare_Professionals/Exoskeletal_Products/H200_for_Hand_Paralysis.php
- [27] "SaeboFlex/SaeboReach" Saebo. Grasp and Release. Purposeful and meaningful activities. Disponible en: www.saebo.com/saeboflex/
- [28] "Stroke Rehabilitation with NeuroMove" Zynex Neurodiagnostics. Disponible en: <http://www.zynexneuro.com/neuromove/>
- [29] V. Quintana "¿Qué es la Electroestimulación o Electroterapia? Ondas Rusas, FES, TENS" [online] Kinesiología Ramos-Mejía, 2016. Disponible en: <http://www.kinesiologiaramosmejia.com/que-es-la-electroestimulacion-o-electroterapia-ondas-rusas-tens-fes/>
- [30] F. Saavedra "Diseño y Construcción de un Estimulados FES para mejorar la calidad de vida en pacientes con pie caído (dropped foot)". Capítulo 2. Universidad de Concepción. Abril, 2012
- [31] Dr. Juan Plaja. "Analgesia por medios físicos". Capítulo 13. España 2002.
- [32] Dr. L. Pacheco "Contracción Muscular", ítem g. [online] Departamento de Fisiología,

- Facultad de Medicina, Universidad de Costa Rica. Disponible en: http://163.178.103.176/Fisiologia/gen_activ_basica4_32.html
- [33] G. Kraft, S. Fitts and M. Hammond. *“Techniques to Improve Function of the Arm and Hand in Chronic Hemiplegia”* American Congress of Rehabilitation Medicine and the American Academy of Physical Medicine and Rehabilitation. Marzo, 1992.
- [34] N. Kawashima, M. Popovic and V. Zinavovic. *“Effect of Intensive Functional Electrical Stimulation Therapy on Upper-Limb Motor Recovery after Stroke: Case Study of a Patient with Chronic Stroke”* Department of Rehabilitation for Movement Functions, Research Institute of National Rehabilitation Center for Persons with Disability. Canada 2013.
- [35] F. Crepon, J. Doubrere, M. Vanderthommen, E. Castel-Kremer and G. Cadet *“Electroterapia, Electroestimulación”* [online] EMC Kinesiterapia- Medicina Física volume 29, issue 1, (1-20). 2008. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S129329650870745X>
- [36] J. Rodriguez *“Electroterapia en Fisioterapia”* 2a Edición. Capítulo 2: 77, 85, 86. Buenos Aires, Madrid. Junio 2004.
- [37] *“Electroestimulación y sus Efectos en la Salud”* [online] Instituto de Salud Pública de Madrid. Disponible en: http://www.madridsalud.es/salud_publica/salud_ambiental/Tecnicas_de_Electroestimulacion.pdf
- [38] C. Jarney *“Atlas consiso de los músculos.”* Capítulo 5: Músculos del antebrazo y la mano. España, 2008.
- [39] F. Netter *“Atlas de Anatomía Humana”* 6ª Edición. Láminas: 427, 428, 429, 463. 2014.
- [40] Y. Hara *“Rehabilitation with Functional Electrical Stimulation in Stroke Patients”* Physical Medicine & Rehabilitation, 2013
- [41] J. Rodriguez *“Electroterapia en Fisioterapia”* 2a Edición. Capítulo 3: 105, 106. Buenos Aires, Madrid. Junio 2004.
- [42] M. Popovic and B. Craven *“Functional Electrical Stimulation Therapy: Individualized Neuroprosthesis for Grasping and Reaching”* International Handbook of Occupational Therapy Interventions. 2009.

- [43] U. Costa “*Modelado de Proceso de Neurorehabilitación del Ictus Mediante un Nuevo Sistema de Valoración Cinemático*” P. 33, Departamento de Medicina, Universidad Autónoma. Barcelona 2014.
- [44] “*RehaMove2*” Hasomed Flyer New Therapy. Disponible en: www.rehamove.com
- [45] T. Schauer, R.Stephan. “*Simulink Interface for soft real-time control of the RehaStim2 stimulator*”. Berlín, Alemania. 2012
- [46] D. Newman “*Fundamentos de Rehabilitación física: Cinesiología del Sistema Musculoesquelético*” p. 184, 223, 234

