



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA
Unidad Iztapalapa



Instituto Nacional
de Rehabilitación
Luis Guillermo Ibarra Ibarra

Licenciatura en Ingeniería Biomédica
Reporte de Proyecto Terminal

Aplicación de Estimulación Eléctrica Funcional en Lazo
Cerrado Para el Control Contralateral de la Pinza
Gruesa de la Mano

Alumno: Enrique Mena Camilo
Matrícula: 2153009451

Asesores:
Dr. Omar Piña Ramirez
M.C. Jorge Airy Mercado Gutierrez

Marzo de 2020

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Justificación	2
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Objetivos	2
2. Marco teórico	4
2.1. Estimulación eléctrica funcional	4
2.2. Neuroprótesis	4
2.3. Señales de comando y retroalimentación	5
2.3.1. Señal de comando	5
2.3.2. Señal de retroalimentación	5
2.4. Esquemas de control	6
2.4.1. Control en lazo abierto	6
2.4.2. Control en lazo cerrado	6
2.4.3. Control adaptativo	6
2.5. Algoritmos de control	7
2.5.1. Control On-Off	7
2.5.2. Máquina de estados finitos (FSM)	7
2.5.3. Control lineal	7
2.6. Retroalimentación	7
2.7. Electromiografía de superficie	8
2.7.1. Procesamiento	8
2.7.2. Descriptores de amplitud	8
3. Antecedentes	10
3.1. Desarrollos previos al proyecto	10
3.1.1. Plataforma de software para neuroprótesis	10
3.1.2. Aplicación FES en lazo abierto	10
3.2. Sistemas FES existentes	11

4. Metodología	13
4.1. Sistema propuesto	13
4.2. Adquisición de datos en Simulink	14
4.3. Evaluación de bloque de adquisición y decodificación	15
4.4. Protocolo para registro de sEMG	17
4.5. Procesamiento de sEMG	18
4.6. Esquema de control	20
4.7. Tarea objetivo	21
5. Avances	22
5.1. Decodificación de stream de datos en Simulink	22
5.2. Evaluación de transferencia de datos entre prototipo de adquisición y compu- tadora	23
5.3. Protocolo para registro de sEMG	24
5.4. Procesamiento de sEMG	25
5.5. Mapeo sEMG-FES	29
6. Discusión	30
Referencias	32

Capítulo 1

Introducción

En la división de Investigación en Ingeniería Médica del Instituto Nacional de Rehabilitación “Luis Guillermo Ibarra Ibarra” (INR) se llevan a cabo diversos proyectos de investigación y desarrollo tecnológico, los cuales buscan desarrollar tecnología que permita aplicar nuevas técnicas de terapia de rehabilitación para personas con discapacidad motriz, o bien mejorar las técnicas ya existentes. Tal es el caso del proyecto de desarrollo de una neuroprótesis basada en estimulación eléctrica funcional (FES, por sus siglas en inglés) para rehabilitación de miembro superior, que busca satisfacer las necesidades del INR en cuestiones de terapia e investigación.

Para dicho proyecto el INR desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) que permite controlar los parámetros de los dispositivos comerciales RehaMove 2 (Hasomed GmbH, Alemania) para estimulación eléctrica, y Cyton Board (OpeBCI Inc, E.E.U.U.) para adquisición de biopotenciales, que la neuroprótesis necesita para su correcto funcionamiento. Una primera aplicación de la neuroprótesis se encuentra funcionando y se utilizado con sujetos sanos y pacientes del INR, aplicándoles estimulación eléctrica para generar movimientos de miembro superior. Sin embargo, actualmente el sistema opera en lazo abierto, es decir, se determina la secuencia de estimulación sin considerar información relevante como el movimiento generado y sus variables relacionadas. En el estado actual del sistema, los parámetros de la estimulación eléctrica son controlados por el experimentador, quien los adapta hasta obtener el patrón específico útil para el sujeto en rehabilitación, esto causa una dependencia del experimentador para la operación del sistema, y limita su utilidad para objetivos de rehabilitación, ya que no se consideran variables intrínsecas del paciente, como lo son: la intención de movimiento o actividad residual, que podrían contribuir a la modulación de los parámetros de estimulación y el movimiento resultante.

1.1. Justificación

Debido a que la neuroprótesis desarrollada en el INR se ha utilizado para trabajar en aplicaciones donde los sistemas involucrados para su funcionamiento trabajan sin tener interacción entre ellos, surge la necesidad de implementar alguna aplicación que permita la interacción entre sistemas y que además permita la participación del paciente de forma cuantitativa en la terapia.

Por ello, este proyecto plantea desarrollar una aplicación en lazo cerrado que involucre la actividad voluntaria del paciente para lograr la modulación de la estimulación eléctrica y esta a su vez permita la repetición de los movimientos relacionados al agarre de un objeto (flexión y extensión de los dedos), dotándolo así de control sobre los movimientos en su rehabilitación y disminuyendo la dependencia del experimentador al momento de realizar la terapia de estimulación.

1.2. Planteamiento del problema

Para realizar el diseño de la aplicación se utilizarán dos canales de electromiografía de superficie (sEMG, por sus siglas en inglés) para la extracción de algún rasgo descriptivo de su amplitud, el cuál servirá para realizar el diseño de un esquema de control que permita identificar el tipo de movimiento a realizar (flexión o extensión de los dedos) y a su vez sirva como modulador de la amplitud de corriente eléctrica a inyectar en el miembro contrario, buscando lograr un funcionamiento en tiempo real.

1.3. Hipótesis

Por lo tanto, la hipótesis de este proyecto consiste en que al integrar los diferentes bloques de un sistema de estimulación eléctrica funcional dentro de una plataforma de software con herramientas de tiempo real, se logrará implementar un lazo cerrado que permita llevar a cabo las tareas de adquisición de sEMG, procesamiento de este y aplicación de estimulación eléctrica, con un tiempo de latencia en la actualización de los parámetros de estimulación menor a 1 segundo.

1.4. Objetivos

Por ello, el objetivo de este proyecto se centra en diseñar e implementar un esquema de control que permita la modulación de la amplitud de estimulación eléctrica en tiempo real.

Teniendo como objetivos particulares los siguientes:

- Desarrollar un bloque de adquisición dentro de Simulink que permita la recepción de datos desde la computadora.
- Evaluar la calidad del funcionamiento del bloque de adquisición diseñado.
- Desarrollar un algoritmo que permita la identificación de los movimientos de flexión y extensión de dedos.
- Diseñar e implementar un esquema de control que permita la modulación de la amplitud de la estimulación eléctrica a través de señales de sEMG.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Estimulación eléctrica funcional

La estimulación eléctrica funcional es la aplicación de corriente eléctrica a tejido excitable para suplementar o reemplazar funciones que se han perdido en individuos con daños neurológicos. El propósito de la intervención FES es habilitar funciones que se han perdido en individuos con daño al sistema nervioso mediante la sustitución o asistencia a las habilidades voluntarias de dichos individuos. En las aplicaciones FES la estimulación es requerida para lograr una función deseada, por lo tanto, los sistemas FES usualmente se diseñan para ser controlados a partir de señales relacionadas a la actividad o intención del propio usuario. Los dispositivos FES que son usados para sustituir una función neurológica que se ha perdido son comúnmente llamadas neuroprótesis [9].

2.2. Neuroprótesis

Una neuroprótesis es un dispositivo que proporciona ráfagas cortas de impulsos eléctricos al sistema nervioso central o periférico a través de electrodos superficiales, para lograr producir funciones sensoriales o motoras. Estos dispositivos buscan sustituir o asistir una función dañada debido a una lesión o enfermedad en el sistema nervioso [12] [11].

En general, existen dos tipos de neuroprótesis: a) las neuroprótesis autónomas, las cuales son sistemas autocontenidos que imitan las funciones de una contraparte biológica, y b) las neuroprótesis por comando, las cuales son sistemas que reemplazan o asisten una función sensitiva o motora que se ha perdido o disminuido. Estas últimas están compuestas por un sistema de control que interpreta la intención del usuario, utilizan sensores para detectar el estado del sistema, genera la activación del sistema motor o sensorial del usuario, y proporciona una retroalimentación al usuario [11].

Las neuroprótesis motoras, las cuales son un ejemplo de neuroprótesis por comando, son sistemas que asisten a personas que han sufrido algún tipo de lesión en la médula espinal o

cerebro. Estas neuroprótesis pueden actuar directamente en el sistema nervioso central, en el sistema nervioso periférico o bien, en una combinación de ambos [11].

2.3. Señales de comando y retroalimentación

Como se muestra en la Figura 2.1, una neuroprótesis por comando requiere de dos señales esenciales para lograr su correcto funcionamiento, una de estas es una señal de comando y otra es una señal de retroalimentación [11].

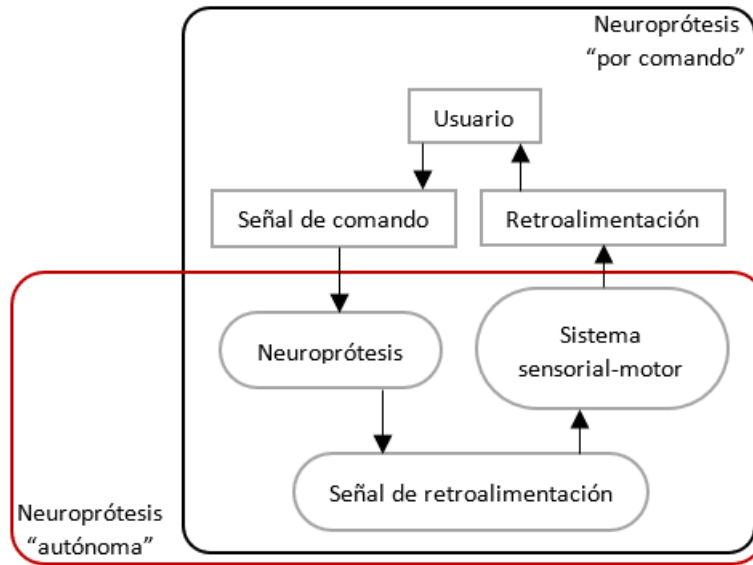


Figura 2.1: Esquema de los componentes generales de una neuroprótesis autónoma y por comando. Adaptado de [11].

2.3.1. Señal de comando

Son señales utilizadas como indicadores de eventos de determinada tarea. En el caso de las neuroprótesis son las señales que controlan las acciones de esta, especialmente las acciones relacionadas a la estimulación eléctrica (inicio, fin, incremento de intensidad, disminución de intensidad, etc.).

2.3.2. Señal de retroalimentación

Es un tipo de señal que brinda al sistema información relacionada a la respuesta a un determinado comando. Estas señales, en el caso de las neuroprótesis, suelen estar relacionadas con el monitoreo del movimiento que está realizando el sujeto debido a los efectos de la estimulación eléctrica y pueden registrarse mediante distintos tipos de sensores.

2.4. Esquemas de control

Existen dos tipos de control importantes dentro de las aplicaciones de una neuroprótesis, los cuales se diferencian esencialmente en los tipos de señales que ocupan. En la Figura 2.2 se ilustran a grandes rasgos las diferencias entre ambos esquemas de control.

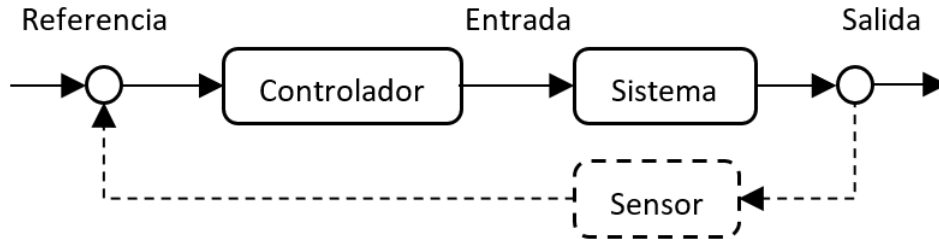


Figura 2.2: Esquema general de control en lazo abierto y control en lazo cerrado. El control en lazo abierto se ilustra con una línea sólida. El control en lazo cerrado se lleva a cabo cuando se incluye el elemento sensor, el cual se ilustra con una línea discontinua. Adaptado de [18].

2.4.1. Control en lazo abierto

En el control en lazo abierto se genera un comando a la línea de base, esperando que este comando produzca la salida correcta. Aquí no existe una medición de la salida generada, por lo cual tampoco existe alguna medición del error que pudiera utilizarse como mecanismo para la modulación del comando que se genera [18].

2.4.2. Control en lazo cerrado

El control en lazo cerrado requiere de la inclusión de algún elemento sensor en el sistema que se desea controlar. Este control retroalimentado genera un comando a la línea de base y el elemento sensor mide la salida del sistema en respuesta al comando. Esta medición de la salida puede utilizarse para determinar diferencias entre la salida esperada y la real, generando así una señal de error que puede utilizarse como retroalimentación hacia el controlador para realizar modificaciones en los comandos generados [18].

2.4.3. Control adaptativo

El control adaptativo utiliza sensores para medir la entrada y salida del sistema, utilizando dichas métricas para ajustar el controlador en respuesta a las perturbaciones en el entorno de control o el sistema controlado. Una ventaja de este tipo de control es que se pueden desarrollar estrategias de control sin requerir de un conocimiento completo del sistema que

se va a controlar, sin embargo, esto provoca que los controladores adaptativos rara vez sean óptimos [18].

2.5. Algoritmos de control

Existe una gran variedad de algoritmos de control que suelen ser usados dentro de las neuroprótesis, sin embargo, para este trabajo sólo se abordaran 3 algoritmos de control.

2.5.1. Control On-Off

El control control On-Off: es una política de control en la que cuando una variable cruza un umbral predefinido, se activa un programa que habilita o deshabilita determinadas funciones del esquema de control [18].

2.5.2. Máquina de estados finitos (FSM)

Este es un modelo de sistema que puede considerarse como una implementación más compleja del control on-off. En este modelo, la medición de una variable del sistema en combinación con el estado actual desencadena una serie de acciones y una transición de estado. Este tipo de modelo es periódico, entonces pueden realizarse transiciones de estado en respuesta al tiempo [18].

2.5.3. Control lineal

2.6. Retroalimentación

Existe más de una forma de implementar una retroalimentación dentro de un sistema de neuroprótesis. Esta retroalimentación puede ser la observación visual de la acción realizada por algún efector robótico dentro de una interfaz cerebro-computadora (neurofeedback), la adquisición de una señal eléctrica durante un periodo de estimulación eléctrica, la medición de algún elemento sensor que proporcione información sobre el estado del efector [18]. Otro ejemplo de como implementar retroalimentación en un sistema de neuroprótesis es el bio-feedback, el cual se trata de una técnica de retroalimentación donde no se requiere de algún elemento sensor en el efector del sistema, ya que esta técnica consiste en permitir al individuo usuario de la neuroprótesis aprender a cambiar su actividad fisiológica con el fin de mejorar el rendimiento del sistema [20].

2.7. Electromiografía de superficie

La electromiografía se define como la detección y análisis del electromiograma (EMG). El EMG puede detectarse directamente mediante la inserción de electrodos en las fibras musculares, o de forma indirecta colocando electrodos de superficie en las zonas de la piel localizadas justo encima del tejido muscular. A este último método se le suele conocer como electromiografía de superficie (sEMG, por sus siglas en inglés), el cual, al ser un método de detección no invasivo y permitir obtener información sobre la activación muscular, como la intensidad de la contracción muscular, la manifestación de la fatiga muscular y el reclutamiento de unidades motoras, se ha convertido en un método muy popular en la investigación.

2.7.1. Procesamiento

La actividad mioeléctrica en la superficie de la piel se encuentra dentro de un ancho de banda limitado que suele estar desde los 15 hasta los 400 Hz, con amplitudes dentro del rango de micro Volts o mili Volts, dependiendo de la intensidad de la contracción muscular [2].

La detección de la actividad mioeléctrica se realiza mediante el uso de un amplificador diferencial, el cual debe tener conectadas las entradas a un par de electrodos situados en la dirección de la fibra muscular a sensar, y además debe tener una referencia situada en el hueso más cercano a la fibra. Una vez detectado de forma eficaz la actividad mioeléctrica, esta debe someterse a un filtro anti-aliasing y posteriormente al proceso de conversión analógico-digital que permitirá se realice el procesamiento digital de la señal [2].

Usualmente se suele utilizar un filtro pasa banda con frecuencias de corte similares a las que componen la actividad mioeléctrica (15-400 Hz), acompañado de un filtro notch digital que permita atenuar la interferencia provocada por la línea [2].

2.7.2. Descriptores de amplitud

Existen diferentes indicadores que pueden ser utilizados para estimar la amplitud del sEMG, tal es el caso de la amplitud pico a pico, la cual nos proporciona un valor instantáneo de la amplitud del sEMG, sin embargo, no es un indicador de amplitud robusto [2].

Los descriptores de amplitud de sEMG más comunes consisten en la promediación de muestras rectificadas o elevadas al cuadrado de sEMG crudo a lo largo de una determinada tarea motora. Estos descriptores son conocidos como el valor rectificado promedio (ARV o MAV, por sus siglas en inglés)(Ecuación 2.1) y el valor cuadrático medio (RMS, por sus siglas en inglés)(Ecuación 2.2). Dichos descriptores suelen ser usados para estimar las variaciones temporales de la amplitud del sEMG en ventanas cortas entre 250 ms o 500 ms [2].

$$ARV = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |EMG[n]| \quad (2.1)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N EMG[n]^2} \quad (2.2)$$

Estos descriptores de amplitud suelen proporcionar información similiar, la gran diferencia entre ellos se encuentra en la función de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) que generan, donde el RMS suele ser un descriptor con PDF Gaussiana, mientras que el ARV suele ser una descriptor con PDF Laplaciana. En general, se suele utilizar el RMS debido que teóricamente la PDF de sEMG es Gaussiana, sin embargo, existen trabajos que han demostrado que en la práctica la PDF de sEMG es más cercana a una PDF Laplaciana, caso en el cual es recomendable utilizar el ARV como descriptor [3] [10].

Capítulo 3

Antecedentes

3.1. Desarrollos previos al proyecto

En el INR se han realizado trabajos previos relacionados al desarrollo de la neuroprótesis, los cuales han logrado que dicho sistema sea funcional y útil en pacientes del propio instituto. Estos trabajos incluyen una plataforma de software para control y configuración de la neuroprótesis y la implementación de una aplicación FES en lazo abierto comandada por EEG.

3.1.1. Plataforma de software para neuroprótesis

Consiste en una GUI implementada en MATLAB®, la cual consta de 4 pantallas que en conjunto permiten: a) realizar el registro de datos de un paciente o usuario en el que se probará el dispositivo, b) realizar el entrenamiento de un clasificador de movimientos voluntarios, c) ejecutar una aplicación FES en lazo abierto, o bien d) experimentar con los parámetros del estimulador y el sistema de registro de biopotenciales para determinar el patrón de estimulación óptimo para el paciente. Esta plataforma realiza una conexión a dispositivos comerciales: RehaMove 2 (Hasomed GmbH, Alemania) para estimulación eléctrica, y Cyton Board (OpenBCI Inc, E.E.U.U.) para adquisición de biopotenciales) que permiten la integración de las funciones de la neuroprotesis [8].

3.1.2. Aplicación FES en lazo abierto

La aplicación FES, que se encuentra inmersa en la plataforma de software para la neuroprótesis, está basada en una Interfaz Cerebro-Computadora. Dicha aplicación le muestra al sujeto una serie de 5 movimientos predefinidos, dentro de los cuales el sujeto debe seleccionar alguno cerrando los ojos. Una vez seleccionado y confirmado el movimiento objetivo, el sistema envía una secuencia de pulsos de estimulación eléctrica para asistir al sujeto a

realizar el movimiento elegido. En esta aplicación el patrón de estimulación eléctrica está predeterminado antes de iniciar la aplicación [7].

3.2. Sistemas FES existentes

En la literatura existe una diversidad de trabajos que implementan un lazo cerrado para aplicaciones FES, los cuales utilizan dispositivos de estimulación que varían entre dispositivos comerciales o prototipos, sin embargo, la revisión bibliográfica realizada para este proyecto se centró en trabajos que utilizaran el dispositivo RehaMove 2 (Hasomed GmbH, Alemania) como dispositivo de estimulación, y que además implementaran alguna aplicación para rehabilitación de miembro superior.

Trabajos como el documentado en [14], muestran la importancia de las aplicaciones que implementan una terapia por medio de un entrenamiento en espejo para facilitar la recuperación motora de miembros superiores e inferiores en pacientes con hemiplejía. Dicha importancia radica en lograr la ilusión de un movimiento sincrónico entre dos extremidades sanas, ilusión que ha demostrado puede promover la recuperación de la funcionalidad de la extremidad paralizada.

El trabajo documentado en [16] demuestra la gran capacidad que tienen los algoritmos implementados en una máquina de estados finitos para realizar el control de una neuroprótesis, además de demostrar que estos algoritmos permiten una comprensión rápida sobre el funcionamiento del esquema de control.

Otros trabajos como lo son [15] y [17] son de utilidad para el proyecto debido a que demuestran que al lograr una integración de los componentes y control de una neuroprótesis se pueden realizar aplicaciones que presenten un funcionamiento en tiempo real o muy cercano a este.

El Cuadro 3.1 resume la información de los trabajos mencionados anteriormente, mostrando información de estos como lo son autor, año de publicación, propósito del trabajo, señales de comando y retroalimentación utilizadas, y dispositivo de estimulación. Cabe mencionar que todos estos trabajos presentan una implementación dentro de los softwares MATLAB y Simulink.

Una revisión bibliográfica adicional se centró en trabajos que utilizaran señales de sEMG como señal de control, para rescatar los descriptores de amplitud comúnmente usados y los tipos de control utilizados para cada aplicación.

El Cuadro 3.2 resumen la información de los trabajos consultados para dicha revisión bibliográfica, mostrando información como autor, año de publicación, propósito de la aplicación, descriptor de amplitud utilizado y tipo de control implementado.

Autor	Año	Propósito	Señales utilizadas	Dispositivo
Christina Salchow, <i>et al.</i> [14]	2016	Entrenamiento en espejo aplicado a la mano	Electromiografía y movimiento de mano	RehaMove Pro
Mignxu Sun [16]	2014	Recuperación de funciones de miembro superior	Acelerometría	RehaStim 1
Daniel Simonson, <i>et al.</i> [15]	2017	Asistencia para apertura y cierre de mano	Posición del objeto y posición de la mano	STMISOLA
Billy Woods, <i>et al.</i> [17]	2018	Asistencia en miembro inferior para funciones de ciclismo	Mecanomiografía, fuerza aplicada a pedales y posición de cigüeñal	RehaStim 1

Cuadro 3.1: Revisión de sistemas FES reportados en la literatura con aplicaciones similares a las de este proyecto.

Autor	Año	Propósito	Descriptor sEMG	Tipo de control
Yu Zhou, <i>et al.</i> [21]	2018	FES contralateral para miembro superior	RMS	Regresión lineal
Tommaso Lenzi, <i>et al.</i> [6]	2012	Control de exoesqueleto	Envolvente lineal	Proporcional
Jung Hee Kim, <i>et al.</i> [5]	2015	Terapia en espejo para recuperación de miembro superior	RMS	On-Off
Gustavo Aguirre, <i>et al.</i> [1]	2015	Control de brazo robótico	Amplitud	Lógica difusa
Xin Yi, <i>et al.</i> [19]	2013	Cierre contralateral de párpado en conejos	RMS	On-Off
Sachs NA, <i>et al.</i> [13]	2006	Cierre contralateral de párpado en roedores	Integración	On/Off
Lucas Fonseca, <i>et al.</i> [4]	2019	Asistencia contralateral para cierre de mano	Envolvente	FSM

Cuadro 3.2: Revisión de tipos de control y descriptores de amplitud comúnmente usados en aplicaciones de control basado en sEMG

Capítulo 4

Metodología

4.1. Sistema propuesto

Para este proyecto se planteó un sistema que implementa un lazo cerrado utilizando bio-feedback. El sistema consiste en la adquisición de dos canales de sEMG, del brazo izquierdo, los cuales son procesados y sirven como entrada de un sistema de control que realiza la modulación de la amplitud de dos canales de estimulación eléctrica en el brazo derecho. Este sistema implementa un control contralateral para realizar un entrenamiento en espejo de las acciones de apertura y cierre de mano.

En la Figura 4.1 se muestra un esquema general del sistema desarrollado, en el cual se muestran en rojo los elementos sobre los cuales se trabajó en este proyecto.

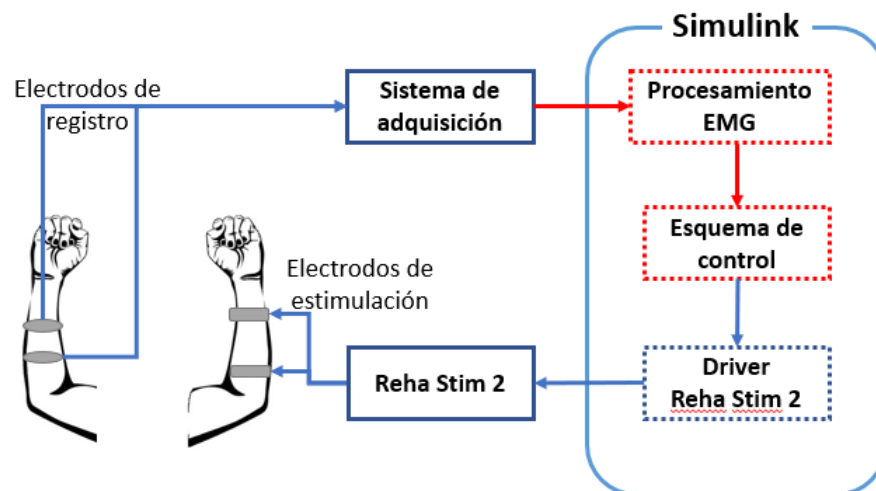


Figura 4.1: Sistema propuesto para el proyecto. Líneas continuas representan entes de hardware y líneas discontinuas representan entes de software. Elementos en rojo representan zonas de trabajo del proyecto.

4.2. Adquisición de datos en Simulink

Se utilizó el sistema Cyton Board (OpenBCI Inc., E.E. U.U. A.A.), el cual tiene una frecuencia de muestreo de 250 Hz, para realizar la adquisición de las señales de sEMG. Dicho sistema utiliza un chip ADS1299 (Texas Instruments) para realizar la conversión analógico-digital de las señales, el cual codifica los datos de cada muestra, utilizando complemento a 2, en un bus de datos esquematizado en la Figura 4.2.

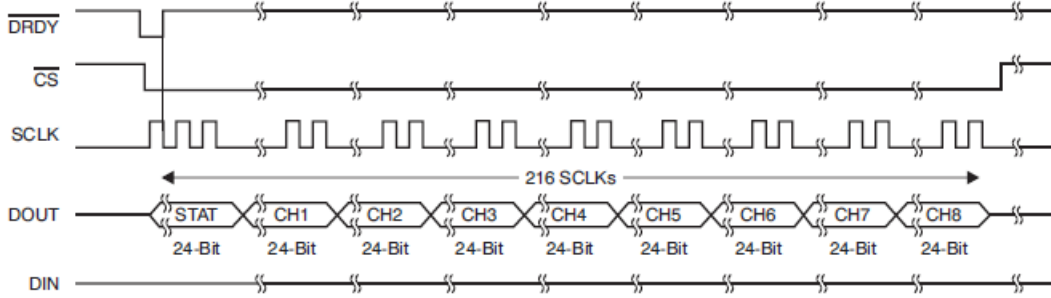


Figura 4.2: Estructura del bus de datos de salida del ADS1299

Para realizar la decodificación del bus de datos dentro de Simulink, se diseñó un subsistema encargado de la solicitud y decodificación de datos, para esto se utilizó el bloque *Query Instrument* del *Instrument Control Toolbox* para realizar la solicitud de datos, mientras que con bloques de la librería estándar de Simulink se realizó la decodificación de dichos datos.

El funcionamiento del subsistema responsable de la solicitud y decodificación de datos, esquematizado en la Figura 4.3, sigue los siguientes pasos:

1. Realizar la adquisición de N muestras, lo cual generará un vector columna con dimensión $(27*N,1)$.
2. Aplicar un reshape a dicho vector para obtener una matriz con dimensión $(27,N)$.
3. Obtener la transpuesta de dicha matriz para obtener una matriz con dimension $(N,27)$.
4. Para cada canal, extraer de la matriz anterior las columnas asociadas a dicho canal de tal forma que se obtenga una submatriz con dimensión $(N,3)$.
5. Realizar una multiplicación matricial de dicha submatriz con un vector ponderador de tal forma que al final se obtenga un vector con dimensión $(N,1)$ donde cada muestra n se encuentra en complemento a 2.
6. Extraer del vector anterior las muestras en las que se encuentra codificado un número negativo (si el bit 23 de la muestra es 1 entonces se trata de un número negativo).

7. Obtener el complemento a 1 de cada muestra del subvector obtenido, sumar 1 a cada muestra y por último multiplicar cada muestra por -1.
8. Regresar los elementos del subvector al vector original.

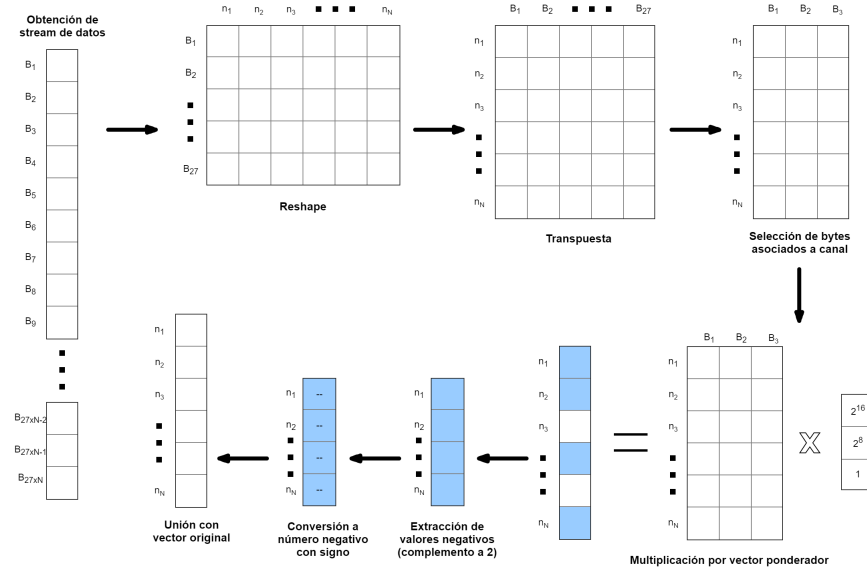


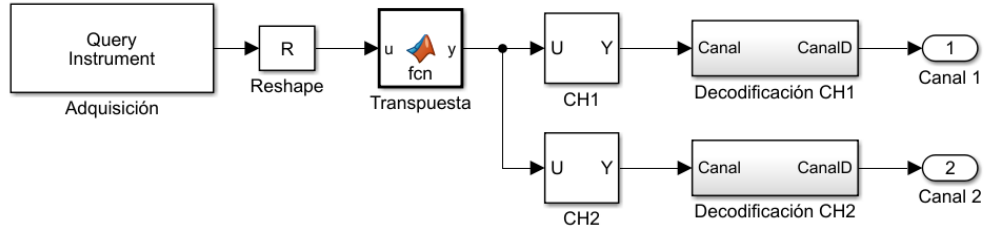
Figura 4.3: Funcionamiento del subsistema decodificador del stream de datos

La implementación final del subsistema diseñado en Simulink se observa en la Figura 4.4.

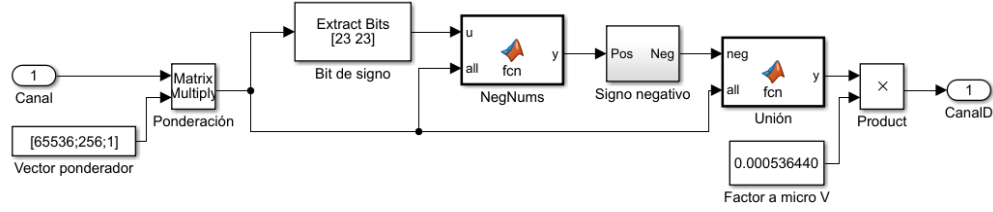
4.3. Evaluación de bloque de adquisición y decodificación

Para obtener una valoración sobre el funcionamiento del bloque diseñado dentro de Simulink para la adquisición y decodificación se generaron señales sintéticas dentro de MATLAB para que sirvieran como patrón de evaluación. Dichas señales consistieron en un banco de 5 senoidales a diferentes frecuencias (1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz y 50 Hz (Figura 4.5a)), dos senoidales de 50 Hz moduladas en amplitud con una exponencial decreciente (Figura 4.5c) y una recta con pendiente negativa (Figura 4.5b), y una senoidal de 50 Hz modulada de tal forma que simule un contracción muscular que sube, se mantiene por un tiempo y baja (Figura 4.5d). La duración de estas señales es de 5 segundos cada una, exepctuando la última que tiene una duración de 15 segundos, y todas se diseñaron con una frecuencia de muestreo de 250 Hz.

El proceso de evaluación se realizó de la siguiente manera:

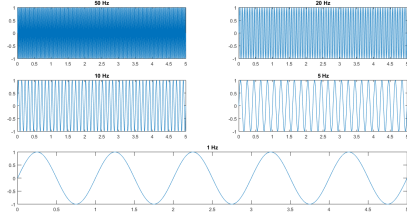


(a) Vista general del sistema diseñado para realizar adquisición y decodificación del stream de datos.

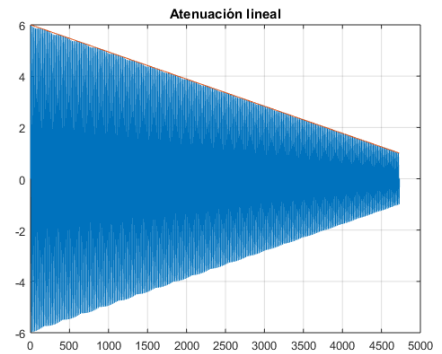


(b) Vista interna del subsistema encargado de la decodificación del stream de datos.

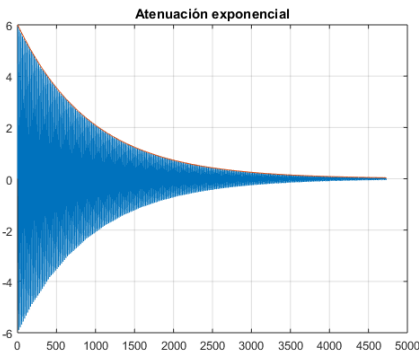
Figura 4.4: Sistema decodificador de stream de datos implementado en Simulink



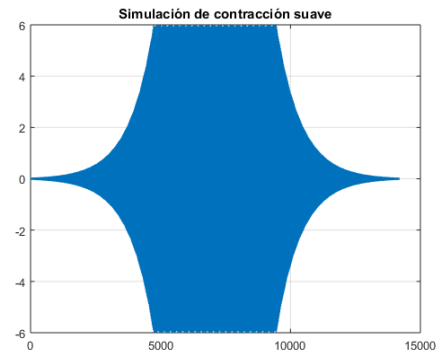
(a) Senoidales puras a diferentes frecuencias



(b) Senoidal de 50 Hz con atenuación lineal



(c) Senoidal de 50 Hz con atenuación exponencial



(d) Senoidal de 50 Hz simulando una contracción muscular

Figura 4.5: Señales creadas para la evaluación del protocolo de comunicación

1. Utilizando un jack de audio de 3.5 mm, se conectó una punta a la salida de audio de la computadora, mientras que la otra punta se conectó al canal 1 del sistema de adquisición.
2. Se inició la solicitud de datos utilizando el subsistema decodificador implementado en Simulink y se inició el contenido de un cronómetro.
3. Tras haber transcurridos 2 segundos en el cronómetro, se procedió a la reproducción de la señal tratándola como una señal de audio en MATLAB.
4. Al marcar el cronómetro 10 segundos (20 segundos para la señal de larga duración), se detuvo la adquisición en el sistema de Simulink.
5. Se calculó la métrica de correlación entre ambas señales como indicador de la calidad de la transferencia de datos.

Se realizaron tres repeticiones de cada señal, obteniendo un total de 24 registros para la obtención de la correlación, dando un resultado de correlación promedio de 0.9615 ± 0.0604 .

4.4. Protocolo para registro de sEMG

Para garantizar una repetibilidad en los registros de sEMG se implementó un protocolo para realizar la adquisición de dicha señal. Dicho protocolo tiene las características mostradas a continuación:

- Frecuencia de muestro de sistema de adquisición: 250 Hz.
- Canales 1 y 2 para realizar adquisición.
- Electrodo: Covidien H124SG
- Canal 1: Digitorum flexor
 - Medir antebrazo de lado ventral de codo a muñeca.
 - Palpar músculo al 25 % de la medida obtenida.
 - Colocar dos electrodos separados 2 cm (Figura 4.6a).
- Canal 2: Digitorum extensor
 - Medir antebrazo de lado dorsal de codo a muñeca.
 - Palpar músculo al 50 % de la medida obtenida.
 - Colocar dos electrodos separados 2 cm (Figura 4.6b).
- Referencia: Colocar electrodo en codo.



(a) Ubicación de electrodos para digitorum flexor.



(b) Ubicación de electrodos para digitorum extensor.

Figura 4.6: Posicionamiento de electrodos para realizar registros de sEMG. Recuperado de [2].

4.5. Procesamiento de sEMG

Se diseñaron tres filtros Butterworth para realizar el procesamiento de sEMG: un filtro pasa altas con frecuencia de corte de 15 Hz, para eliminar las variaciones en la línea base del registro; un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 100 Hz, para eliminar armónicos de 60 Hz y demás interferencias de alta frecuencia; y un filtro rechaza banda centrado en 60 Hz, para reducir la interferencia de la línea. Las gráficas de respuesta en frecuencia de estos filtros se muestran en las Figuras 4.7 a 4.9.

Se implementó dentro de Simulink un bloque responsable de obtener el valor RMS de ventanas de registro de 100 ms de sEMG para utilizar dicho descriptor de amplitud como señal de control. Adicionalmente se implementó un filtro de mediana de 10 muestras (Ecuación 4.1), el cual tiene como propósito conseguir una señal de RMS suavizada

$$y[n] = \text{mediana}(x[n] : x[n - N]) \quad (4.1)$$

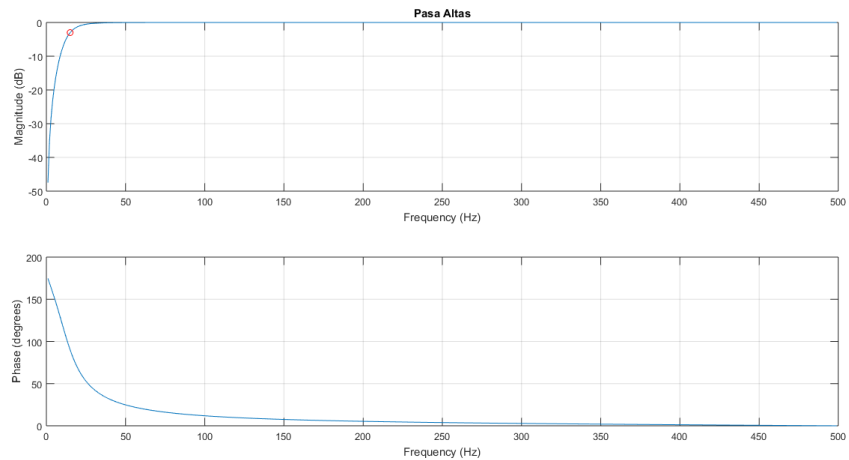


Figura 4.7: Filtro pasa altas para conseguir línea base estable.

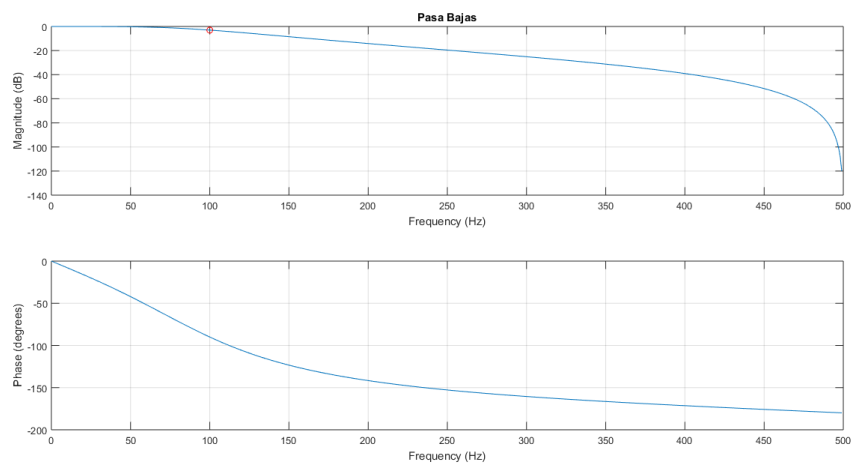


Figura 4.8: Filtro pasa bajas para eliminar interferencias de alta frecuencia y armónicos de 60 Hz.

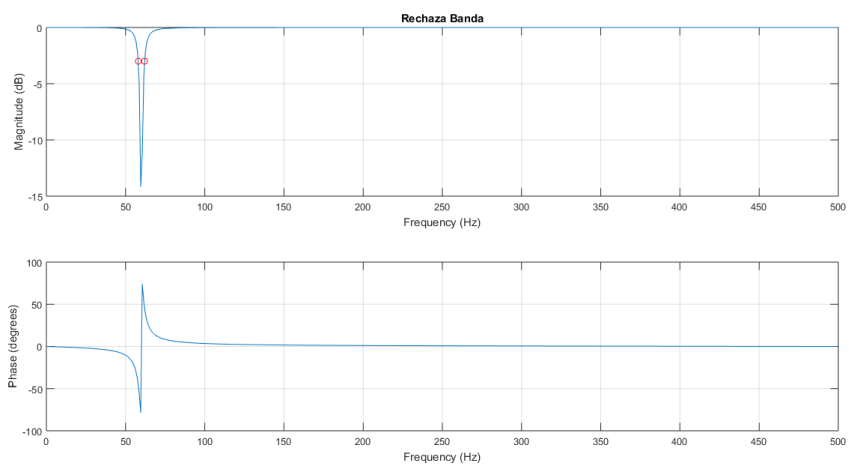


Figura 4.9: Filtro rechaza banda para reducir interferencia de 60 Hz.

4.6. Esquema de control

Se diseñó un sistema basado en una combinación de máquina de estados finitos con un control lineal. El sistema requiere de un proceso de calibración previa donde se obtienen 8 umbrales tras la repetición de 4 movimientos, dos umbrales corresponden a los valores RMS promedio de los dos canales de adquisición a lo largo de la tarea *cierre de mano ligero*, otros dos corresponden a los valores RMS promedio de la tarea *cierre de mano completo*, mientras que los 4 restantes corresponden a los valores RMS promedio de las tareas *apertura de mano ligera* y *apertura de mano completa*. **AGREGAR FOTO DE POSTURAS DE MANOS.** Además, tras la calibración se obtiene también un factor denominado *detector de movimiento*, el cual se obtiene tras calcular la diferencia promedio entre los canales de adquisición a lo largo de la tarea de apertura de mano. Adicionalmente se realiza una calibración de la estimulación eléctrica, la cual utiliza el sistema de colocación de electrodos de estimulación descrito en [ANA], donde se obtiene los valores en amplitud de los umbrales motores y funcionales de las tareas de apertura y cierre de mano.

El detector de movimiento se utiliza para realizar el control por máquina de estados finitos (Figura 4.10), la cual consisten en determinar si la diferencia de amplitudes entre canales ha pasado el valor del detector de movimiento, si es así, el control prosigue con la tarea de apertura de mano, en caso contrario, el control procede a la tarea de cierre de mano.

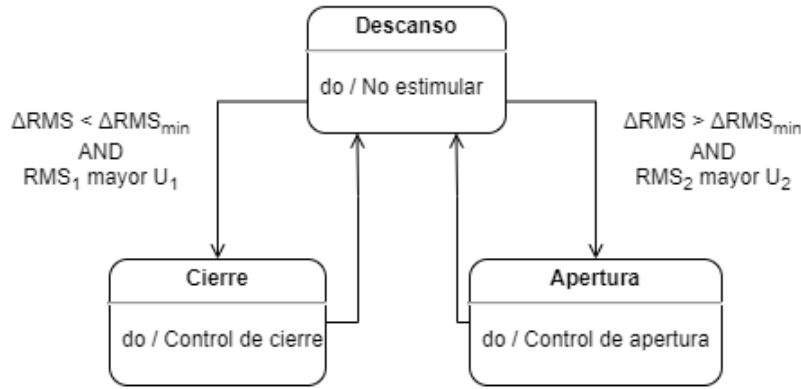


Figura 4.10: Máquina de estados finitos encargada de la detección de movimiento e inicio del control lineal.

Dentro del control de cada tarea, se utilizan los umbrales de las tareas ligeras para realizar la activación del control lineal, el cual modula la amplitud de la corriente eléctrica, del canal asociado al movimiento detectado, utilizando la recta descrita por la Ecuación 4.2, donde A representa la amplitud que inyectará el estimulador eléctrico, A_{max} es el umbral funcional de estimulación eléctrica, A_{min} es el umbral motor de estimulación eléctrica, D representa el valor RMS actual, mientras que D_{max} y D_{min} representan los umbrales RMS de la tarea completa y ligera del canal asociado al movimiento detectado (canal 1 para cierre de mano y canal 2 para apertura de mano). Adicionalmente se aplica la función máximo entero a la recta debido

a que el dispositivo de estimulación eléctrica sólo admite valores enteros, y también se aplica un criterio de saturación de corriente eléctrica para evitar que tras una contracción muscular muy fuerte se genere un valor de amplitud de corriente eléctrica dañino para el sujeto.

$$A = \frac{A_{max} - A_{min}}{D_{max} - D_{min}}(D - D_{min}) + A_{min} \quad (4.2)$$

4.7. Tarea objetivo

INCLUIR TAREA OBJETIVO DE ENTRENAMIENTO CON TRAPEZOIDAL EN LÍNEA

Capítulo 5

Avances

5.1. Decodificación de stream de datos en Simulink

Como una primera comprobación del funcionamiento del sistema diseñado en Simulink se aprovechó la utilidad que tiene el prototipo de adquisición de enviar señales test (ondas cuadradas con frecuencia de 2 Hz). Se configuraron los 8 canales del prototipo de adquisición para que enviaran dicha señal test, cada uno con una ganancia diferente. Posteriormente se realizó un registro de forma continua en el que se visualizó en un scope el resultado del sistema decodificador. Adicional a esto, se realizaron registros de sEMG de un solo canal mientras se realizaba la tarea de cierre de mano. En la Figura 5.1 se muestra el resultado de la adquisición de las señales test, mientras que en la Figura 5.2 se muestra el resultado de un registro de sEMG. Ambos registros se realizaron configurando el prototipo de adquisición a una frecuencia de muestreo de 1 kHz.

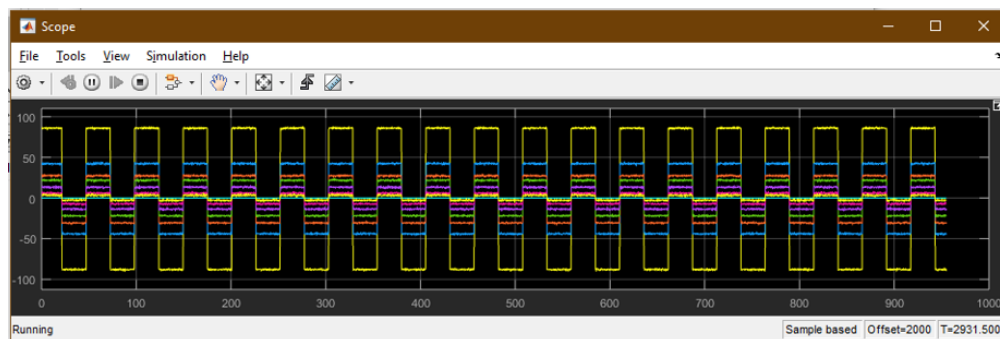


Figura 5.1: Resultado de la adquisición de los 8 canales del prototipo de adquisición configurado con señales test a diferentes ganancias.

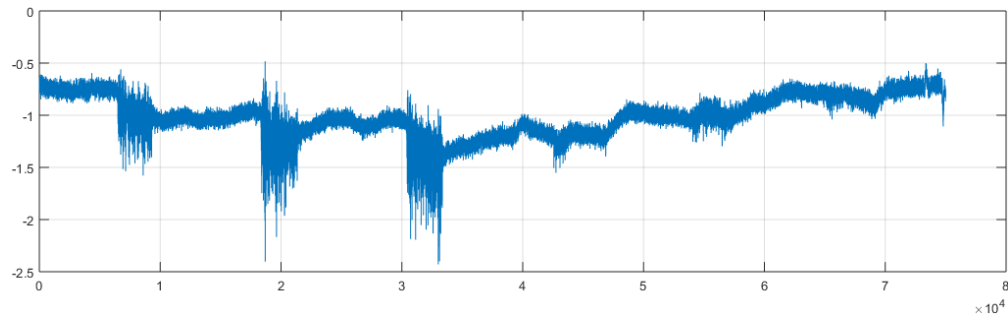


Figura 5.2: Registro de sEMG de un solo canal a una frecuencia de muestreo de 1 kHz.

5.2. Evaluación de transferencia de datos entre prototipo de adquisición y computadora

Adicional al procedimiento realizado para la evaluación de la comunicación, se realizó una medición de la frecuencia de muestreo real del sistema, esto se realizó midiendo con un osciloscopio la frecuencia con la que se activa el pin DRDY del ADS1299 (la activación de este pin indica que se ha realizado la adquisición de una muestra). El resultado de esta medición arrojó como resultado que la frecuencia de muestreo real del prototipo de adquisición es de 964.3 Hz. En la Figura 5.3 se muestra una captura de pantalla de la medición realizada.

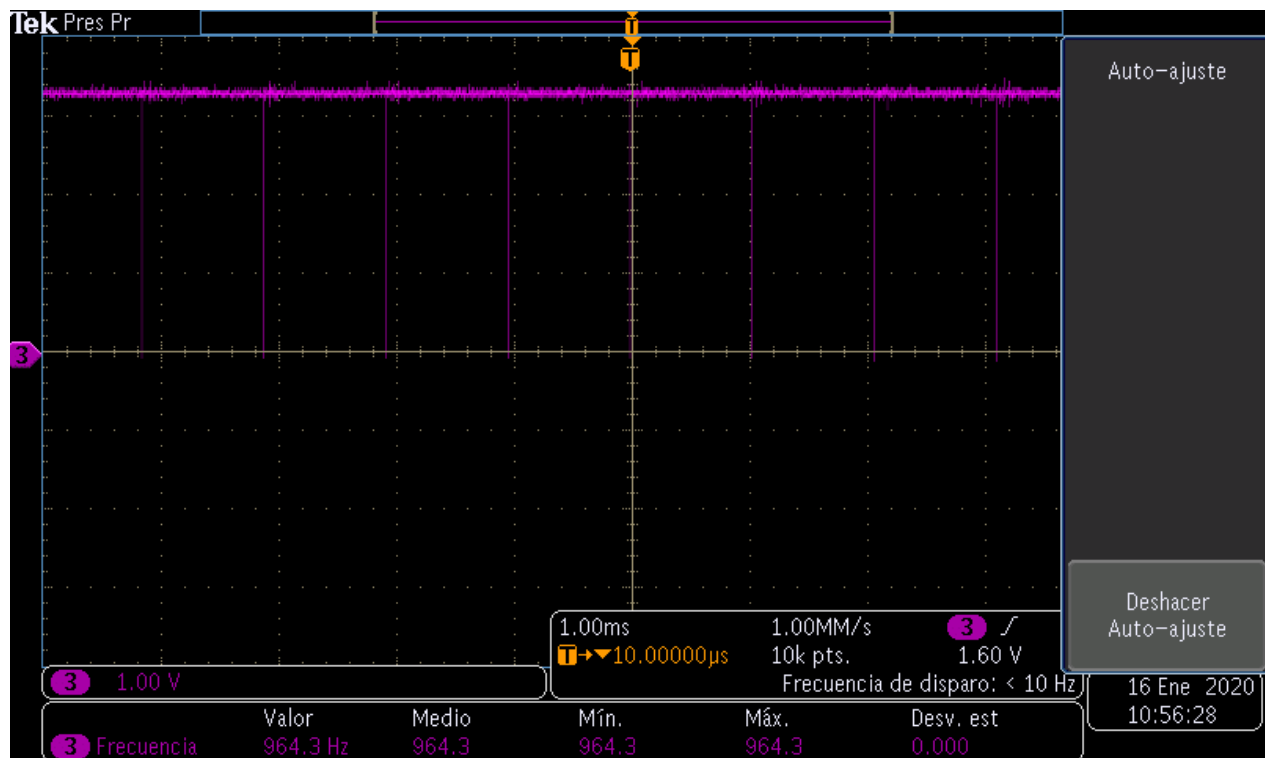


Figura 5.3: Resultado de la medición de la frecuencia de muestreo real del prototipo de adquisición.

Posterior a esto se realizó un ajuste a la frecuencia de muestreo a las señales sintéticas en MATLAB, esto para que la frecuencia de muestreo sintética coincidiera con la frecuencia de muestreo real del prototipo de adquisición. Teniendo las señales sintéticas ajustadas a la nueva frecuencia de muestreo se procedió a calcular la correlación entre la señal sintética y la señal adquirida con el prototipo de adquisición. Una vez obtenidos todos los valores de correlación se calculó el promedio de estos, obteniendo como resultado una correlación promedio de 0.9615. En el Cuadro 5.1 se muestran los resultados de la correlación obtenida para cada registro realizado.

Señal	Registro 1	Registro 2	Registro 3
Sen 1 Hz	0.9868	0.9899	0.9899
Sen 5 Hz	0.8554	0.9750	0.9980
Sen 10 Hz	0.9985	0.9946	0.9912
Sen 20 Hz	0.9923	0.9930	0.9947
Sen 50 Hz	0.9828	0.9732	0.9851
Sen 100 Hz	0.9320	0.9309	0.9374
Atenuación lineal	0.9677	0.9851	0.8869
Atenuación exponencial	0.7149	0.9523	0.9874
Contracción	0.9877	0.9896	0.9916

Cuadro 5.1: Resultados de la correlación obtenida entre las señales sintéticas y los registros realizados con el prototipo de adquisición.

5.3. Protocolo para registro de sEMG

Se realizaron dos registros de sEMG utilizando el protocolo de registro descrito en la metodología y el dispositivo OpenBCI, estos registros obtenidos no cuentan con marcadores de movimiento debido a que se le iba indicando por voz el momento en el cual realizar una u otra acción. En la Figura 5.4 se muestra uno de los registros crudos de sEMG obtenidos tras esta prueba.

Utilizando una GUI para obtener registros de sEMG con marcadores de movimiento se puso a prueba nuevamente el protocolo de registro. Para esta prueba se configuró la GUI para realizar 4 repeticiones de la secuencia *descanso-cierre-descanso-apertura*, donde los movimientos de descanso se configuraron con una duración de 9 segundos, y los movimientos de cierre y apertura se configuraron con una duración de 3 segundos. Para esta prueba se realizaron registros utilizando el dispositivo OpenBCI y el sistema prototipo. En la Figura 5.5 se muestra un registro crudo con el dispositivo OpenBCI, mientras que en la Figura 5.6 se muestra un registro crudo con el dispositivo prototipo.

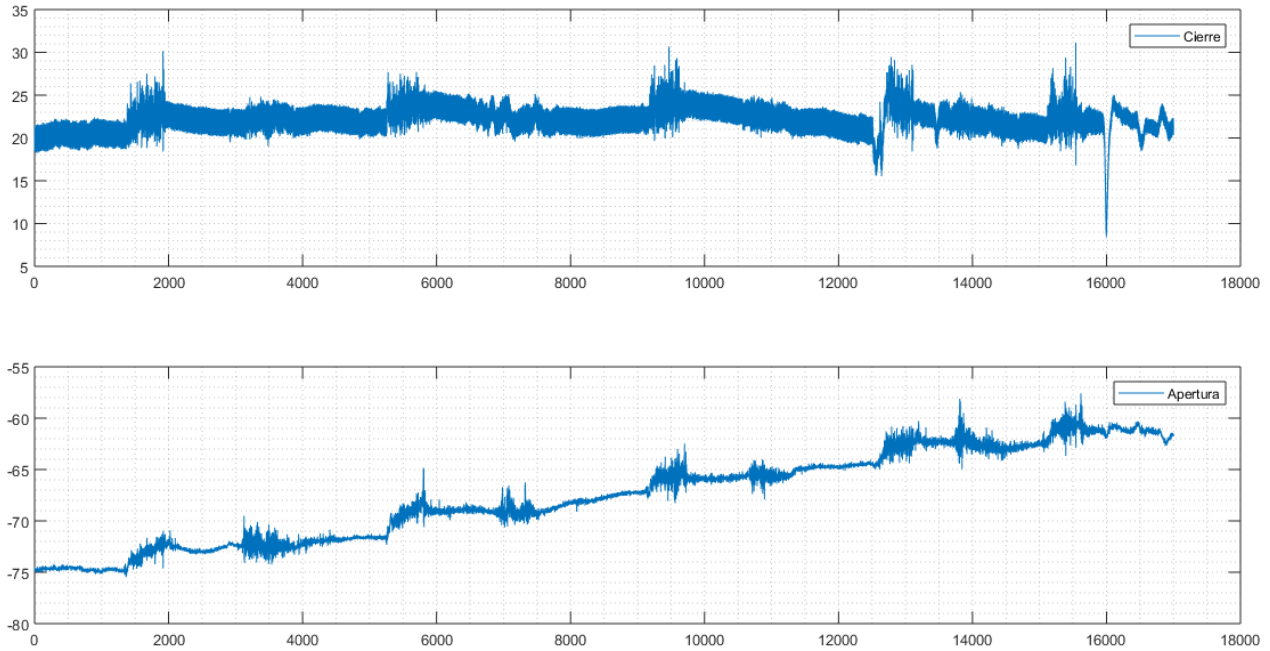


Figura 5.4: Registro crudo de sEMG sin marcadores de movimiento obtenido tras una primera prueba del protocolo de registro propuesto. Arriba: Registro para cierre de mano. Abajo: Registro para apertura de mano.

5.4. Procesamiento de sEMG

Utilizando los registros obtenidos del entrenamiento para probar los filtros diseñados se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 5.7 (para el dispositivo OpenBCI) y la Figura 5.8 (para el dispositivo prototipo).

Teniendo los registros filtrados se realizó una comparación visual entre los descriptores de amplitud. Para ello se graficó el resultado de aplicar ambos descriptores a cada canal, obteniendo como resultado la Figura 5.9.

Utilizando un filtro de mediana de 10 muestras se suavizó el descriptor RMS como prueba de viabilidad del filtro de mediana. La Figura 5.10 muestra el resultado de este filtro suavizador.

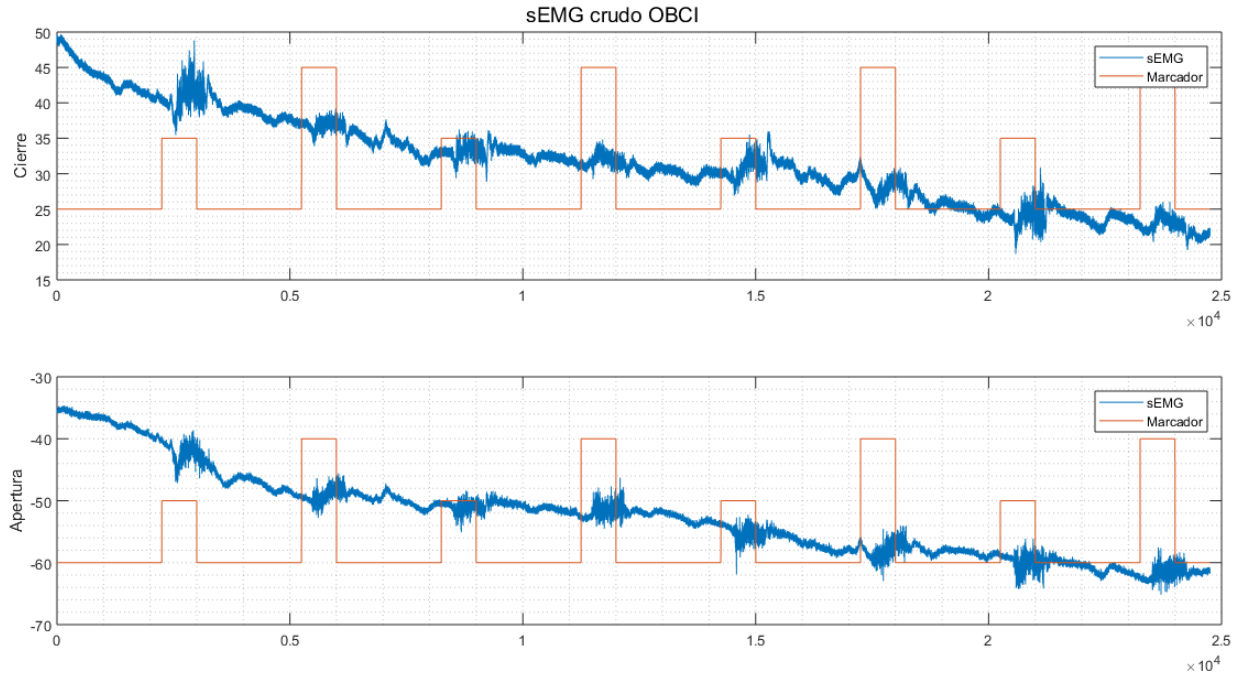


Figura 5.5: Registro de entrenamiento crudo realizado con el dispositivo OpenBCI. Arriba: Canal para cierre de mano. Abajo: Canal para apertura de mano. Naranja: Marcador de movimiento (línea estable: descanso; cuadro pequeño: cierre; cuadro grande: apertura)

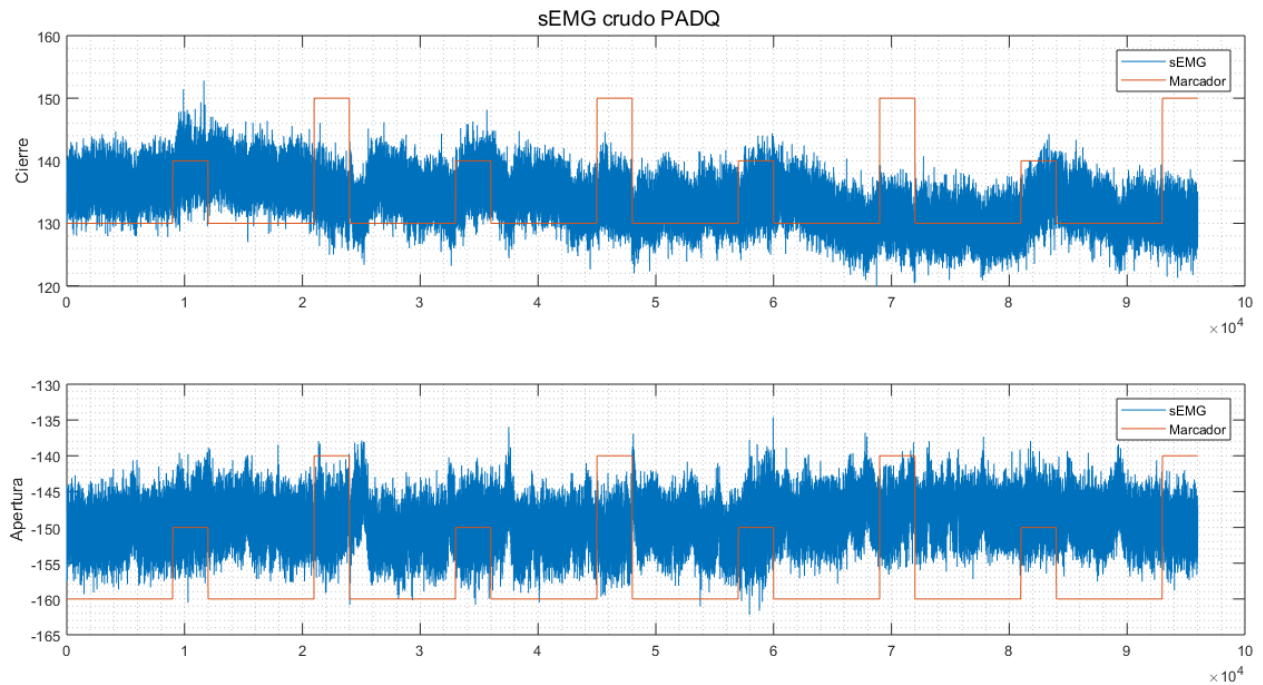


Figura 5.6: Registro de entrenamiento crudo realizado con el dispositivo prototipo. Arriba: Canal para cierre de mano. Abajo: Canal para apertura de mano. Naranja: Marcador de movimiento (línea estable: descanso; cuadro pequeño: cierre; cuadro grande: apertura)

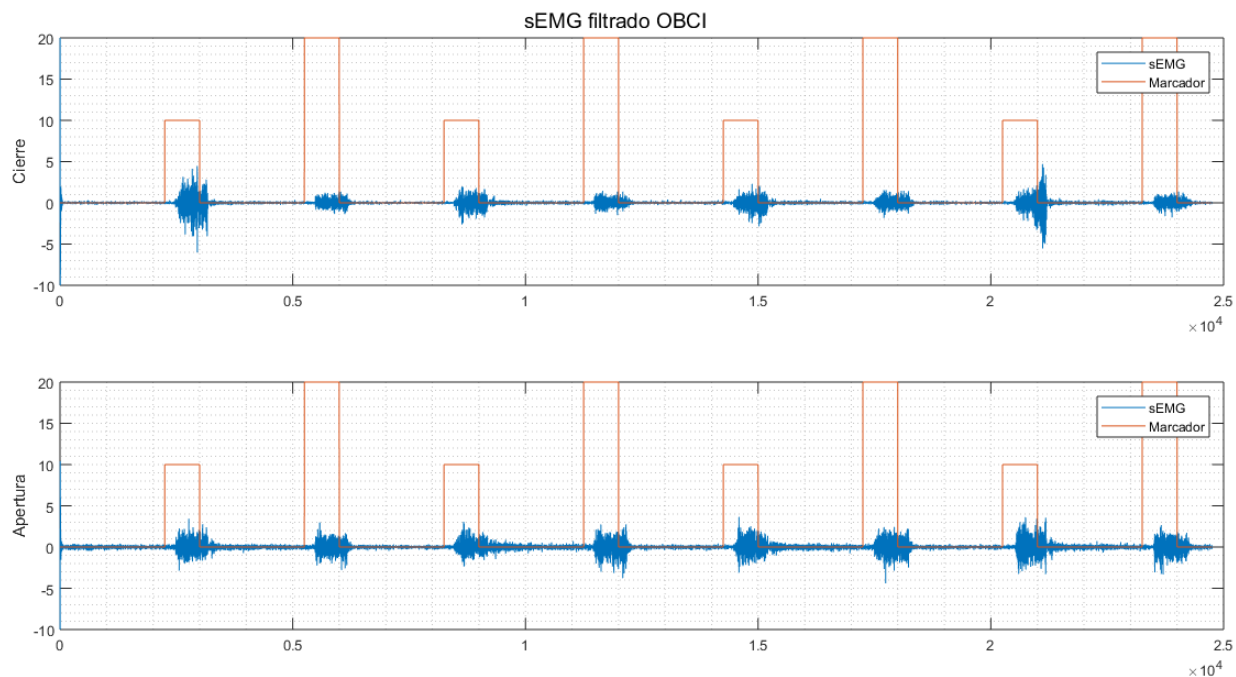


Figura 5.7: Registro de entrenamiento filtrado realizado con el dispositivo OpenBCI. Arriba: Canal para cierre de mano. Abajo: Canal para apertura de mano. Naranja: Marcador de movimiento (línea estable: descanso; cuadro pequeño: cierre; cuadro grande: apertura)

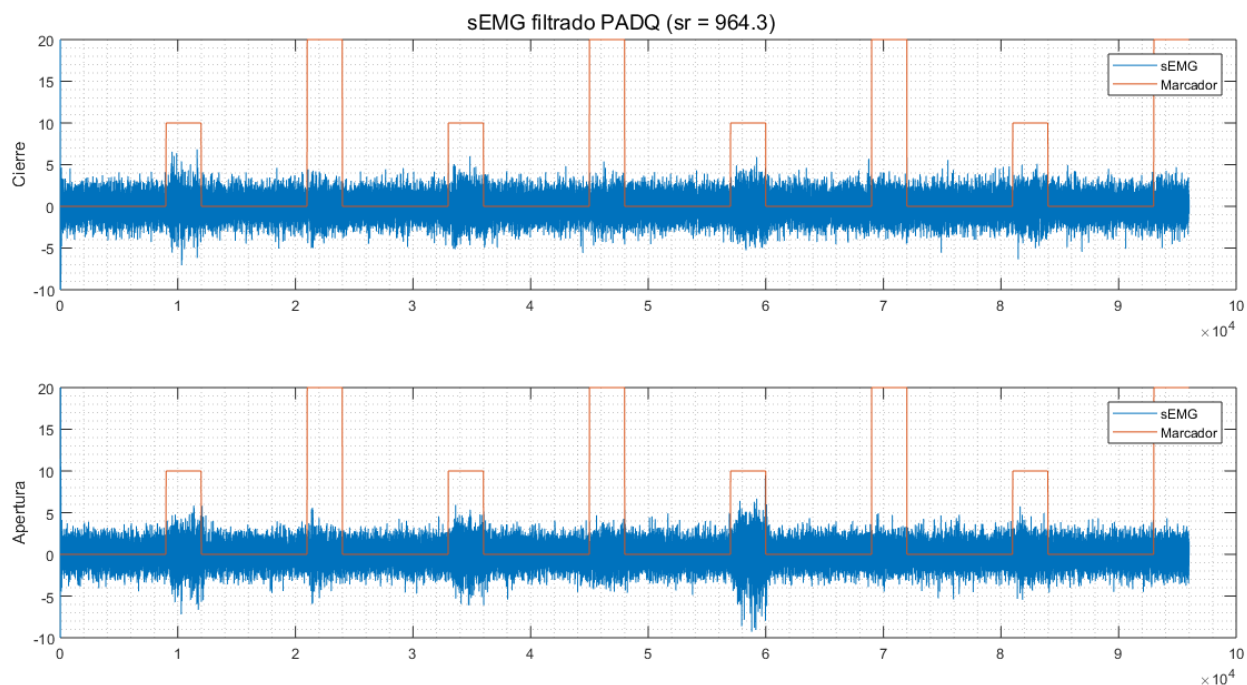


Figura 5.8: Registro de entrenamiento filtrado realizado con el dispositivo prototipo. Arriba: Canal para cierre de mano. Abajo: Canal para apertura de mano. Naranja: Marcador de movimiento (línea estable: descanso; cuadro pequeño: cierre; cuadro grande: apertura)

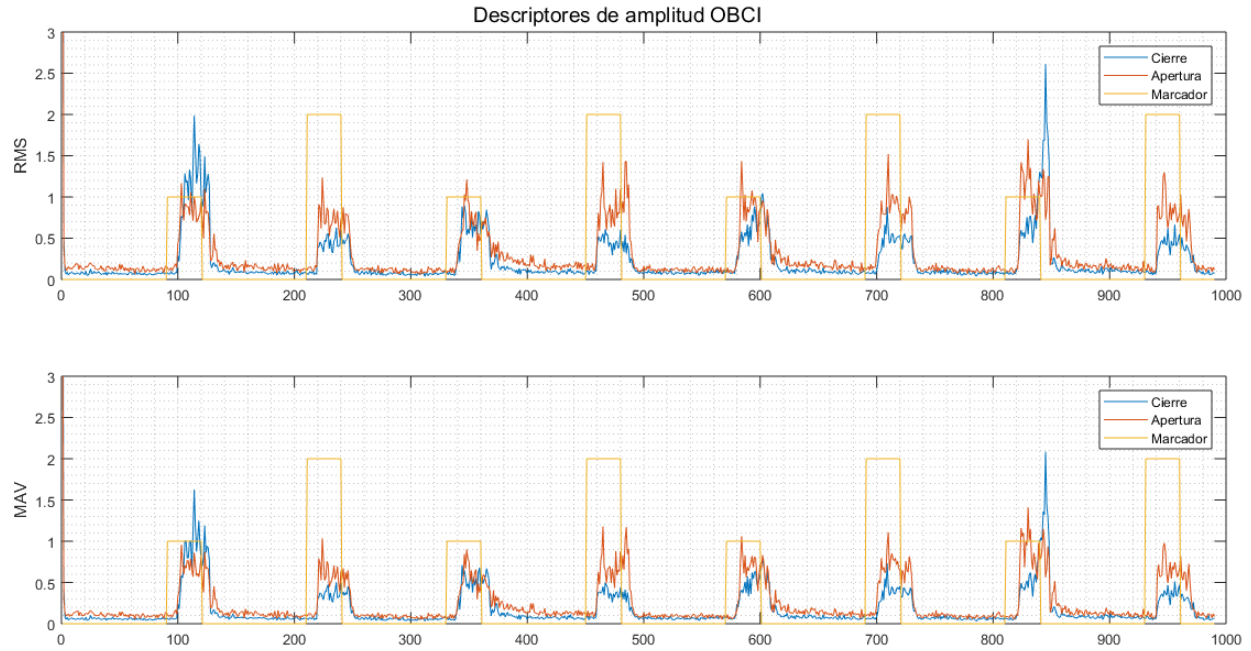


Figura 5.9: Comparación visual entre descriptores de amplitud RMS (arriba) y ARV/MAV (abajo). Azul: Canal para cierre de mano. Naranja: Canal para apertura de mano. Amarillo: Marcador de movimiento.

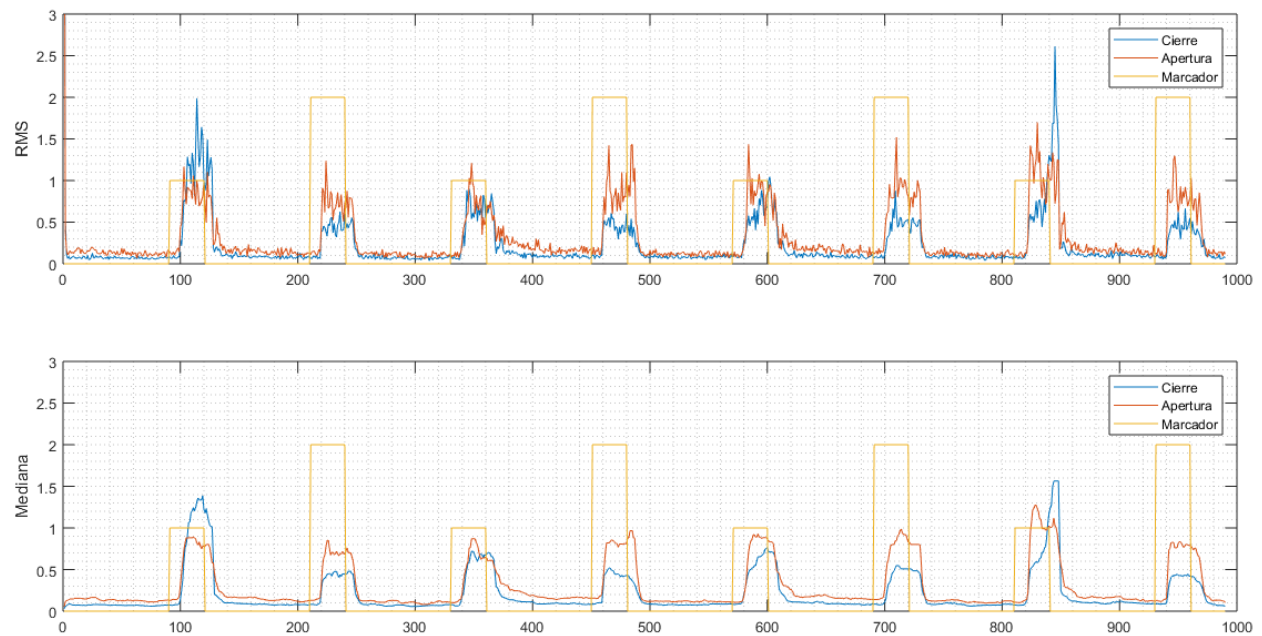


Figura 5.10: Resultado de suavizado con filtro de mediana móvil. Arriba: Valor RMS. Abajo: Filtro de mediana móvil. Azul: Canal para cierre de mano. Naranja: Canal para apertura de mano. Amarillo: Marcador de movimiento.

5.5. Mapeo sEMG-FES

Utilizando la ecuación de la recta definida en el capítulo Metodología, se aplicó una transformación lineal al valor RMS para convertirlo a un valor entero entre 1 y 15, el cual representará la amplitud de la corriente eléctrica inyectada al sujeto. El resultado de dicho mapeo lineal se observa en la Figura 5.11.

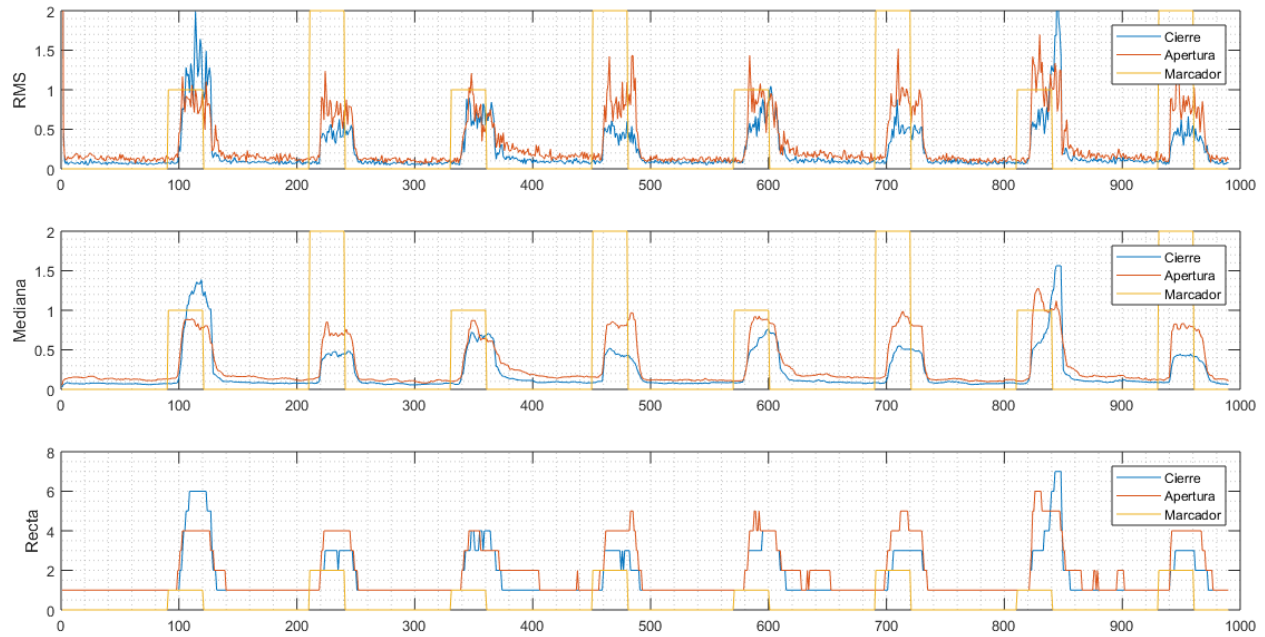


Figura 5.11: Comparación visual entre RMS (arriba), RMS suavizado con filtro de mediana (centro) y mapeo lineal (abajo). Azul: Canal para cierre de mano. Naranja: Canal para apertura de mano. Amarillo: Marcador de movimiento.

Capítulo 6

Discusión

Se ha demostrado que el sistema implementado en Simulink para realizar la adquisición y decodificación funciona adecuadamente, y gracias a la métrica de correlación obtenida se puede fundamentar su buen funcionamiento.

El protocolo de registro, a pesar de no ser selectivo en su totalidad, permite distinguir en la mayoría de los casos entre actividad sEMG relacionada a un movimiento u otro. Sin embargo, se ha observado que se deben de dar indicaciones claras al sujeto experimental, ya que se ha observado que al realizar contracciones fuertes en cualquier movimiento, la actividad de sEMG en ambos canales es muy similar.

El esquema de filtrado diseñado para los registros de sEMG es útil ya que permite obtener una señal de sEMG en la que se pueden distinguir las contracciones de los momentos de reposo. En cuanto a los descriptores de amplitud se optará por utilizar el valor RMS debido a que proporciona valores más grandes que el valor ARV/MAV. Cabe destacar que se ha observado que, en cuanto a morfología de las señales obtenidas tras aplicar el descriptor, se obtiene una forma muy similar para ambos descriptores. Un punto importante relacionado al procesamiento es el método de suavizado; este genera una onda suave que permite obtener un mapeo con mejor estabilidad que sin suavizar, sin embargo, este procedimiento de suavizado utiliza un buffer de 10 muestras de valor RMS, recordemos que cada muestra de RMS se obtiene a partir del procesamiento de ventanas de 0.1 segundos de sEMG, lo cuál implica que se está generando un retraso total de 1 segundo en la actualización del parámetro a mapear, lo cual nos coloca en el límite del tiempo prometido; para solucionar esto se probaran ventanas más cortas.

El mapeo lineal es útil hasta cierto punto, pero si se opta por utilizar dicho mapeo es muy probable que sea necesario utilizar una lógica de control adicional que ayude a obtener un mapeo más estable. Adicional a esto aún está como alternativa a probar el obtener una relación entre los descriptores y la amplitud de la corriente de estimulación a través de una calibración a 5 posturas de la mano (cierre total de la mano, cierre parcial, descanso, apertura parcial de mano y apertura total).

Hay que destacar que todo el trabajo realizado se ha probado de forma exitosa con el dispositivo OpenBCI debido a que el prototipo presenta problemas en el circuito encargado de la conversión analógico-digital. Afortunadamente todo lo desarrollado tiene la posibilidad de migrarse al dispositivo de forma sencilla, por lo cual en cuanto se solucionen los problemas con el prototipo se migrará todo a este.

Referencias

- [1] AGUIRRE-VARGAS, G., FLORES-ABAD, Á., ALBA-BAENA, N., ACOSTA-GUADARRAMA, J. C., AND CANALES-VALDIVIEZO, I. Control de Señales EMG para el Movimiento de un Brazo Robótico de Tres Grados de Libertad. *Cultura Científica y Tecnológica* 12, 55 (2015).
- [2] CAVALCANTI-GARCIA, M., AND VIERIRA, T. Surface electromyography: Why, when and how to use it. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte* 4, 1 (2011), 17–28.
- [3] CLANCY, E. A., AND HOGAN, N. Probability Density of the Surface Electromyogram and Its Relation to Amplitude Detectors. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 46, 6 (1999), 730–739.
- [4] FONSECA, L., TIGRA, W., NAVARRO, B., GUIRAUD, D., FATTAL, C., BÓ, A., FACHIN-MARTINS, E., LEYNAERT, V., GÉLIS, A., AND AZEVEDO-COSTE, C. Assisted grasping in individuals with tetraplegia: Improving control through residual muscle contraction and movement. *Sensors (Switzerland)* 19, 20 (oct 2019), 4532.
- [5] KIM, J. H., AND LEE, B. H. Mirror Therapy Combined With Biofeedback Functional Electrical Stimulation for Motor Recovery of Upper Extremities After Stroke: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Occupational Therapy International* 22, 2 (2015), 51–60.
- [6] LENZI, T., DE ROSSI, S. M. M., VITIELLO, N., AND CARROZA, M. C. Intention-Based EMG Control for Powered Exoskeletons. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 59, 8 (2012), 2180–2190.
- [7] MERCADO, J., CASTILLO, J., TOLEDO, C., QUINZANOS, J., AND GUTIERREZ, J. A Simple Approach for EEG-FES Triggered Upper Limb Rehabilitation. *Rehabweek 2019 / International Functional Electrical Stimulation Society Conference* (2019).
- [8] MERCADO, J., FUENTES, J., TOLEDO, C., CASTELLANOS, N., AND GUTIERREZ, J. Design of a Flexible Platform for prototyping of FES-based Motor Rehabilitation Systems. *22 Annual Conference of the International Functional Electrical Stimulation Society* (2018).

- [9] PECKHAM, P. H., AND KNUTSON, J. S. Functional Electrical Stimulation for Neuromuscular Applications.
- [10] PHINYOMARK, A., THONGPANJA, S., QUAIN, F., AND LAURILLAU, Y. Optimal EMG Amplitude Detectors for Muscle- Computer Interface. In *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology* (Krabi, Thailand, 2013), pp. 1–6.
- [11] POPOVIĆ, D. B. Principles of command and control for neuroprostheses. In *Implantable Neuroprostheses for Restoring Function*. 2015, pp. 45–58.
- [12] POPOVIC, M. R., AND THRASHER, A. T. Neuroprostheses. In *Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering*, G. E. Wnek and G. L. Bowlin, Eds., 2 ed. 2008, ch. Neuroprost, pp. 1056–1065.
- [13] SACHS, N., CHANG, E., AND WEILAND, J. Contralateral EMG-Triggered Electrical Stimulation of the Eyelid. In *11th Annual Conference of the International FES Society* (Zao, Japan, 2006), no. September, pp. 286–288.
- [14] SALCHOW, C., VALTIN, M., SEEL, T., AND SCHAUER, T. Development of a Feedback-Controlled Hand Neuroprosthesis: FES-Supported Mirror Training.
- [15] SIMONSEN, D., SPAICH, E. G., HANSEN, J., AND ANDERSEN, O. K. Design and Test of a Closed-Loop FES System for Supporting Function of the Hemiparetic Hand Based on Automatic Detection Using the Microsoft Kinect Sensor. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 25, 8 (2017), 1249–1256.
- [16] SUN, M. *A Functional Electrical Stimulation (FES) Control System For Upper Limb Rehabilitation*. PhD thesis, University of Salford, 2014.
- [17] WOODS, B., SUBRAMANIAN, M., SHAFTI, A., AND FAISAL, A. A. Mechanomyography based closed-loop Functional Electrical Stimulation cycling system. *2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob)* (2018), 179–184.
- [18] WRIGHT, J., MACEFIELD, V. G., VAN SCHAIK, A., AND TAPSON, J. C. A Review of Control Strategies in Closed-Loop Neuroprosthetic Systems. *Frontiers in Neuroscience* 10 (2016).
- [19] YI, X., JIA, J., DENG, S., SHEN, G., XIE, Q., AND WANG, G. A Blink Restoration System With Contralateral EMG Triggered Stimulation and Real-Time Artifact Blanking. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems* 7, 2 (2013), 140–148.

- [20] YUCHA, C. B., AND MONTGOMERY, D. *Evidence-Based Practice in Biofeedback and Neurofeedback*, vol. 6656. AAPB Wheat Ridge, CO, 2008.
- [21] ZHOU, Y., FANG, Y., GUI, K., LI, K., ZHANG, D., AND LIU, H. sEMG Bias-driven Functional Electrical Stimulation System for Upper-Limb Stroke Rehabilitation. *IEEE Sensors Journal* 18, 16 (2018), 6812–6821.