

Sistema de Rehabilitación Asistido por Videojuegos para Brazo Basado en EMG

Rodrigo José Cauich Ayala

Ingeniería Biomédica, Universidad Modelo Campus Mérida

Proyectos VII

Ing. Ismael Eliezer Pérez Ruiz

22 de noviembre del 2024

Contenido

Resumen.....	4
Capítulo 1. Introducción	5
Antecedentes	5
Juegos para la salud	5
Videojuegos creados Karate Rehab (Rehabilitación del miembro superior)	5
Eficiencia de los videojuegos en el área de rehabilitación	5
Videojuegos comerciales en la rehabilitación de pacientes con ictus subagudo ...	6
Mexicanos desarrollan videojuegos para neuro-rehabilitación en motricidad	6
Planteamiento del problema.....	7
Objetivos	7
Objetivo General.....	7
Objetivos Específicos.....	7
Justificación	7
1.5 Método	8
Investigación y análisis previo:.....	8
Desarrollo del sistema de procesamiento de señales EMG:	8
Desarrollo del videojuego de rehabilitación	9
Validación con pacientes.....	9
Plan del proyecto.....	9
Esquema general	10
Capítulo 2. Marco teórico	12

Señales de EMG.....	12
Propiedades bioeléctricas del tejido muscular estriado	12
Adquisición de una señal de EMG.....	13
Filtros digitales.....	14
Características de los filtros digitales	14
Aplicaciones de los Filtros digitales	14
Funciones Principales	15
Ventajas de los filtros digitales sobre los filtros analógicos	15
Filtros FIR (Finite Impulse Response).....	15
Filtros IRR (Infinite Impulse Response).....	16
Filtros adaptativos.....	17
Rehabilitación de brazo y antebrazo	18
Bases de la rehabilitación de miembros superiores	18
Rehabilitación con Videojuegos.....	20
Rehabilitación a través de videojuegos vs métodos regulares	21
Rehabilitación de miembro superior con ambientes virtuales	21
Capítulo 3. Desarrollo	23
Selección de componentes	23
Adquisición de la señal de EMG	23
Configuración de los componentes	23
Adquisición de la señal	27

Procesamiento de la señal	28
Desarrollo del videojuego de rehabilitación	30
Validación con pacientes.....	32
Referencias.....	33

Resumen

El Sistema de Rehabilitación Asistido por Videojuegos para Brazo Basado en EMG combina la adquisición de señales electromiografías y videojuegos para facilitar el proceso de rehabilitación de pacientes con problemas de movilidad en el brazo. El sistema registra y amplifica la señal electromiografía de movimientos como flexiones y extensiones del brazo mediante el microcontrolador Psoc 5, para posteriormente enviar la información a una computadora mediante el puerto serial y aplicar a la señal filtros digitales para eliminar ruidos con el lenguaje de programación Python y la señal resultante se utiliza para controlar un videojuego enfocado para rehabilitación desarrollado en el motor de videojuegos Unity. Esta aplicación traduce los movimientos musculares del paciente en acciones dentro del juego promoviendo la realización de ejercicios terapéuticos de manera entretenida y motivadora. Finalmente se valida el sistema de rehabilitación con pruebas en pacientes supervisados por terapeutas, en el que se recopila información sobre el rendimiento del sistema y la retroalimentación de los pacientes y del terapeuta.

Capítulo 1. Introducción

Se planea mejorar el proceso de rehabilitación en pacientes con discapacidades motoras o lesiones en el brazo mediante el uso de videojuegos controlados por señales de ECG y que pueda ser adaptado a pacientes con diferentes capacidades con el uso filtros digitales.

Antecedentes

Juegos para la salud

Los juegos para la salud son juegos que tienen como objetivo promover la salud o prevenir, diagnosticar o tratar enfermedades (crónicas). Estos juegos, que generalmente se consideran juegos serios, tienen como objetivo influir en los resultados de salud aumentando el conocimiento del usuario y cambiando sus comportamientos a través del juego. [12]

Videojuegos creados Karate Rehab (Rehabilitación del miembro superior)

El estudio ha incluido a 6 pacientes con síndrome piramidal, un grupo de trastornos neurológicos que afectan las motoneuronas de manera selectiva, los cuales han interactuado con un Exergame diseñado para la rehabilitación de la flexión del hombro. Los datos de Mocap fueron analizados reportando mejorías hasta del 18 % en rangos de movimiento después de 4 meses de intervención con el videojuego. [13]

Eficiencia de los videojuegos en el área de rehabilitación

En salud, el uso del Kinect ha sido mayor en el área de la rehabilitación, siendo de gran interés en el campo de la Fisioterapia, ya que es una herramienta que facilita el análisis cinemático y lo más importante es que es no invasiva a la captura de movimiento. En 2003 se hizo un estudio con jóvenes de entre 11 a 15 años teniendo un total de 52 pacientes de los cuales, el 69% mostró que el estudio realizado fue muy bueno, aceptable e importante. [14]

Videojuegos comerciales en la rehabilitación de pacientes con ictus

subagudo

Estudio piloto prospectivo longitudinal con valoración pre- y postintervención. Se seleccionaron 14 participantes ingresados en el Hospital La Fuenfría. La intervención experimental se realizó durante ocho semanas en combinación con el tratamiento convencional de fisioterapia y terapia ocupacional. Cada sesión fue incrementándose en tiempo-intensidad y requerimientos motores mediante videojuegos comerciales vinculados a la videoconsola Xbox 360° y el dispositivo Kinect. El abordaje rehabilitador complementado con realidad virtual semiinmersiva parece ser útil para mejorar el equilibrio y el control postural, la independencia funcional en las actividades básicas de la vida diaria, la calidad de vida, así como la motivación y la autoestima, con excelente adhesión a las intervenciones, por lo que podría constituir una herramienta terapéutica coadyuvante en la rehabilitación neurológica del ictus en fase subaguda. [15]

Mexicanos desarrollan videojuegos para neuro-rehabilitación en motricidad

Expertos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) desarrollaron una serie de videojuegos, que ayudan a la neuro-rehabilitación de personas con alguna afectación en su motricidad superior (brazos y manos) por un evento vascular cerebral. "Estos pacientes se pueden ver beneficiados de la realización de terapias de rehabilitación por la ejecución de ciertos movimientos de manera repetitiva, debido a un proceso de plasticidad neuronal, es decir, la capacidad que tiene el cerebro de generar nuevas conexiones", explicó a Xinhua la especialista en neurociencias, Ana María Escalante Gonzalbo. La terapia que se ofrece en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Aplicaciones Interactivas para la Neuro-Rehabilitación (LANR) de la UNAM, permite a pacientes iniciar de forma temprana su rehabilitación, con la mayor frecuencia posible y en ambientes virtuales. [16]

Planteamiento del problema

La rehabilitación de lesiones en el brazo y trastornos neuromusculares puede ser un proceso largo y desafiante, a menudo desmotiva a los pacientes debido a la falta de interacción y retroalimentación en los métodos tradicionales. Los sistemas de rehabilitación actuales pueden no ser lo suficientemente personalizados o adaptativos para las necesidades individuales de cada paciente. Los videojuegos pueden proporcionar una forma interactiva y motivadora de realizar ejercicios, pero requieren integración con tecnologías de monitoreo para ser efectivos.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema de rehabilitación asistido por videojuegos para el brazo que sea controlado mediante señales de EMG para aumentar la motivación y efectividad en el proceso de rehabilitación de pacientes con lesiones o discapacidades motoras en brazo.

Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de registre de señales de EMG del brazo del paciente
- Desarrollar un videojuego de rehabilitación que sea controlado por la información de las señales de EMG
- Validar el sistema con pruebas en pacientes

Justificación

La rehabilitación eficaz y constante es muy importante para el éxito de la recuperación en pacientes con discapacidades motoras o lesiones. Los métodos tradicionales pueden ser monótonos y no siempre se adaptan a las necesidades específicas de cada persona, lo que puede llevar a un progreso lento y que resulta complicado para el paciente.

El uso de señales EMG permite una monitorización constante de la actividad muscular, lo que facilita la adaptación de los ejercicios a las capacidades actuales del paciente. La integración de filtros digitales puede proporcionar un sistema de rehabilitación dinámico y personalizado que permiten maximizar la efectividad del sistema.

El enfoque basado en videojuegos agrega un componente motivador que puede aumentar la participación y el compromiso del paciente con su rehabilitación. Este sistema tiene el potencial de ofrecer una experiencia de rehabilitación más interactiva, personalizada y eficaz, lo que puede resultar en una recuperación más completa y rápida.

1.5 Método

El desarrollo del proyecto se divide en varias etapas:

Investigación y análisis previo:

En esta etapa preliminar del proyecto, se realiza una investigación de las tecnologías disponibles, tanto en hardware como en software, para la adquisición, procesamiento y análisis de señales electromiografías.

Se examinan componentes que ofrezcan una precisión adecuada en la captura de datos musculares, y se investigan motores de videojuegos como Unity para la implementación de entornos interactivos y desarrollo del videojuego. Además, se investigan herramientas de software como MATLAB y lenguajes de programación como Python, con librerías especializadas para el análisis y filtrado de señales.

Desarrollo del sistema de procesamiento de señales EMG:

En la etapa de desarrollo del sistema de procesamiento de señales EMG, se va a utilizar un microcontrolador configurado para capturar las señales EMG generadas por los músculos del brazo, se utilizará un sistema basado en un PSoC5 con su ADC Delta Sigma, que permitirá una adquisición de la actividad muscular adecuada para la aplicación de este proyecto.

Una vez que las señales EMG son amplificadas y acondicionadas en el circuito, se transmiten a una computadora mediante un puerto USB o una interfaz serial, donde se implementa el sistema de procesamiento digital. Para mejorar la calidad de las señales, se aplican filtros digitales que eliminan los componentes de ruido que podrían comprometer el análisis de los datos. Se utilizan filtros como el filtro rechaza bandas (notch) para suprimir la interferencia de la corriente alterna (normalmente a 50/60 Hz) y otros artefactos además de implementar filtros adaptativos para mejorar su aplicación a diferentes pacientes.

Desarrollo del videojuego de rehabilitación

En el desarrollo del videojuego de rehabilitación, se diseña y programa un entorno interactivo que utiliza las señales EMG para controlar el juego en tiempo real, de modo que el paciente pueda realizar movimientos específicos que correspondan a ejercicios de rehabilitación, como flexiones o extensiones del brazo, y estos movimientos se traducen en acciones dentro del juego.

Validación con pacientes

En esta etapa, se llevará a cabo una validación del sistema de rehabilitación con un grupo de pacientes seleccionados. El propósito de esta fase es evaluar la efectividad y usabilidad del sistema en un entorno real de rehabilitación. Se seleccionarán pacientes con distintos niveles de movilidad y fuerza muscular para asegurar que el sistema sea adaptable y cumpla con las expectativas de rehabilitación en una variedad de perfiles. Durante las sesiones de prueba, se tendrán en cuenta los comentarios de los pacientes y de los terapeutas para verificar que el sistema cumple con los objetivos propuestos y que realmente aporta un beneficio en el proceso de rehabilitación de los pacientes.

Plan del proyecto

Etapa	Objetivo por cumplir	Fecha limite
-------	----------------------	--------------

Investigación y análisis preliminar	Revisión bibliográfica sobre el uso de señales de EMG.	15/10/2024
	Estudio de tecnologías existentes para la adquisición de señales EMG (sensores, microcontroladores, componentes).	20/10/2024
	Investigación sobre motores de videojuegos.	25/10/2024
Desarrollo del sistema de captura de señales EMG	Configuración del microcontrolador para adquirir las señales y enviarlas a través del puerto serial.	31/10/2024
	Implementación de filtros digitales para limpiar las señales de EMG.	30/11/2024
	Validación del sistema de captura con pruebas en entornos controlados.	30/12/2024
Desarrollo del videojuego de rehabilitación	Diseño de un videojuego interactivo enfocado en ejercicios de rehabilitación para el brazo.	01/03/2024
	Programación de la interacción del juego con las señales de EMG	30/03/2024
	Pruebas iniciales del videojuego	30/04/2025
Pruebas y validación del sistema	Evaluación del rendimiento del sistema en la captura de señales EMG y el funcionamiento del videojuego en pacientes.	01/06/2025

Esquema general

Esta tesis comienza por el capítulo 1, que consiste en una introducción sobre lo que consiste el proyecto, se plantea el problema y se justifica el proyecto, además de que se

detalla la metodología que se seguirá para poder desarrollar el sistema de rehabilitación y la manera en la que se validará el sistema.

En el capítulo dos de esta tesis se presenta el marco teórico que sustenta el proyecto. Incluye una descripción detallada de las señales electromiográficas (EMG), su adquisición y procesamiento, las propiedades bioeléctricas del tejido muscular, y los principios de filtrado digital utilizados para mejorar la calidad de las señales. También abarca la relación entre la rehabilitación y el uso de tecnologías interactivas como videojuegos, así como antecedentes sobre videojuegos que se han usado para rehabilitación y su efectividad.

Continuando con el capítulo 3, en este se explica el desarrollo del proyecto en el que se detalla el diseño y construcción del sistema de rehabilitación basado en EMG. Se describe la selección de hardware, como el microcontrolador PSoC 5, y su configuración para adquirir y amplificar las señales EMG. También se explica el procesamiento digital de estas señales en Python, incluyendo la implementación de filtros digitales para reducir el ruido. Adicionalmente, se aborda el desarrollo del videojuego en Unity, el cual utiliza las señales procesadas para controlar acciones dentro del videojuego.

Capítulo 2. Marco teórico

Señales de EMG

La captación de las señales eléctricas producidas por los músculos durante una contracción muscular se conoce como electromiografía. Estas señales son generadas por el intercambio de iones a través de las membranas de las fibras musculares debido a una contracción muscular.[1]

Propiedades bioeléctricas del tejido muscular estriado

Los músculos estriados son los efectores de la motilidad voluntaria. Las fibras musculares (FMs) estriadas son células alargadas con bandas claras y oscuras alternantes (estriaciones) debidas a la disposición longitudinal y paralela de las proteínas contráctiles en su interior. La contracción se verifica por el deslizamiento de estas proteínas entre sí. El sistema nervioso central codifica el grado de contracción de las FMs según la frecuencia de impulsos nerviosos de las motoneuronas alfa, cuyos cuerpos se sitúan en las astas anteriores de la médula espinal. Los impulsos nerviosos son potenciales de acción (PAs) de las motoneuronas que se transmiten a las células musculares a lo largo de sus axones, las ramificaciones terminales de éstos y las uniones neuromusculares.

El conjunto que forma una motoneurona alfa y las FMs inervadas por ella se conoce como unidad motora (UM) y constituye la unidad anatómica y funcional del músculo. El número de FMs de la UM varía de unos músculos a otros: desde muy pocas en los músculos oculomotores, que requieren finos ajustes hasta varios centenares en los grandes músculos de las extremidades inferiores

Como en toda célula viva, entre ambos lados de la membrana de las FMs existe una diferencia de potencial eléctrico (potencial de membrana en reposo) de unos 90 mV, siendo el interior de la célula negativo respecto al exterior.

Una propiedad básica de las FMs y de las neuronas es la posibilidad de que el potencial de membrana, en determinadas circunstancias, cambie y se haga momentáneamente positivo en el interior. Esta inversión del potencial o despolarización se denomina PA y se desencadena por la súbita apertura de los canales de sodio presentes en la membrana, con el consiguiente aumento de la permeabilidad para dicho ión. Los cambios de los flujos iónicos asociados al PA se transmiten a puntos adyacentes de la membrana, conduciéndose a lo largo de la fibra muscular a una velocidad de entre 3 y 5 m/s. En una contracción voluntaria débil sólo se activa un escaso número de UMs que descargan potenciales de acción a frecuencias bajas (en torno a 5 por segundo). El aumento de la fuerza de contracción implica un aumento progresivo de la frecuencia de descarga y el reclutamiento o activación de más UMs. [9]

Adquisición de una señal de EMG

Se pueden obtener señales Electromiográficas para el estudio del movimiento utilizando electrodos de superficie o intramusculares generalmente por pares (bipolares). La amplitud y anchura de banda de la señal EMG no están determinada únicamente por las fuentes electrofisiológicas y sus distancias hasta los electrodos, sino también por los tipos y tamaños de electrodos utilizados y por el espaciamiento entre electrodos. Los electrodos de superficie van unidos a la piel sobre el segmento muscular que se está estudiando.

Los electrodos de superficie se utilizan para estudiar la actividad de todo el músculo superficial. El espaciamiento entre electrodos determina el volumen de registro o recepción del tejido, resultando los espaciamientos más pequeños en registros más selectivos. Los electrodos de superficie suelen ser de ranura, con pasta de electrodo llenando la cavidad para conseguir más contacto con la piel y reducir la impedancia de los electrodos.

Los electrodos comercializados pueden ser desechables, como los electrodos Electrocardiográficos (ECG), o reutilizables con una protección de plástico y un cuello adhesivo por ambos lados. Su diámetro va de 2 a 10 mm para la parte activa del electrodo.

Los electrodos de cloruro de plata-plata (Ag-Ag Cl) con pasta de cloruro se utilizan invariablemente debido a sus propiedades de estabilidad y reducción del ruido

La señal generada por una gran unidad motora tiene una amplitud de 0 volt (en reposo, es decir, cuando no existe contracción muscular) y 250 μV durante la contracción. Debido a que las señales mioeléctricas son de bajo valor, ruidos o artefactos como el ruido ambiente o en mayor medida el ruido de línea (50Hz – 60Hz) pueden provocar una falsa interpretación de los resultados.

Por lo tanto, el preamplificador de la unidad de procesamiento necesita ser no solo lo suficientemente sensible como para detectar y amplificar las pequeñas señales, sino que también debe discriminar los ruidos o artefactos de manera de visualizar solo actividad Electromiográfica. [2]

Filtros digitales

Un filtro digital es una herramienta esencial utilizada en el procesamiento de señales biológicas. Estos filtros se emplean para reducir el ruido y mejorar la calidad de las señales captadas de sistemas biológicos, como el corazón o el cerebro, permitiendo así un análisis más preciso y confiable.

Características de los filtros digitales

Reducción de Ruido: Una de las funciones principales del filtro es eliminar el ruido externo para mantener la pureza de la señal biológica.

Rango de Frecuencia: Los filtros se diseñan para centrarse en rangos de frecuencia específicos, permitiendo la observación de ciertos fenómenos biológicos.

Adaptabilidad: Es posible ajustar los parámetros del filtro según la señal específica que se desea analizar.

Aplicaciones de los Filtros digitales

Electrocardiograma (ECG): Los filtros ayudan a identificar las características clave de la señal cardíaca eliminando el ruido muscular y ambiental.

Electroencefalograma (EEG): Se recurren a los filtros para destacar las distintas ondas cerebrales, como las alfa, beta y delta.

Electromiografía (EMG): Los filtros permiten aislar las señales eléctricas generadas por la contracción muscular.

Funciones Principales

Filtrado de Ruido: Los filtros se utilizan para eliminar interferencias no deseadas en las señales captadas, como las producidas por el movimiento muscular o el ruido ambiental.

Detección de Patrones: Permiten aislar y analizar patrones específicos en las señales, lo que es crucial para detectar enfermedades o realizar estudios clínicos. [3]

Ventajas de los filtros digitales sobre los filtros analógicos

Los filtros digitales (FD) ofrecen pendientes en la banda de transición que superan a las de los filtros analógicos. Además, presentan una gran flexibilidad, ya que pueden ser programados para obtener diferentes respuestas en frecuencia simplemente cambiando sus coeficientes. En cambio, un filtro analógico requiere un rediseño y reensamblaje completo si se desea modificar su respuesta en frecuencia. Los filtros digitales también pueden ser de fase lineal, lo cual es especialmente beneficioso en aplicaciones de procesamiento de audio y transmisión de datos, ya que evita distorsiones por fase.

Otra ventaja de los FD es su mayor precisión, debido a la tolerancia de los circuitos digitales. Esto contrasta con los filtros analógicos (FA), cuyo desempeño depende directamente de la tolerancia de los componentes físicos empleados. Asimismo, los circuitos digitales son menos susceptibles al ruido, lo que contribuye a una mayor confiabilidad en ambientes con posibles interferencias.

Filtros FIR (Finite Impulse Response)

Son lineales y su salida depende solo de los datos de entrada, sin recurrir a valores previos de la salida.

Características de los filtros FIR

Los filtros FIR (Finite Impulse Response) presentan varias características específicas. Poseen un polo múltiple en el origen de orden N , y son de naturaleza no recursiva, lo que implica que solo consideran ceros en su diseño y, por ende, son estables. Además, al ser de memoria finita con una longitud de N , no necesitan las entradas previas al tiempo discreto $N-1$, lo cual simplifica su implementación.

Una de las ventajas de los filtros FIR es que permiten obtener una respuesta con fase lineal, lo cual es crucial en aplicaciones donde la distorsión causada por una fase no lineal podría afectar negativamente el desempeño. Estos filtros son especialmente efectivos en la reducción de ruido, ya que pueden mantener cambios abruptos en señales codificadas en el tiempo. Sin embargo, los FIR no son muy eficaces para separar bandas de frecuencias.

Por otro lado, los errores en la aritmética de precisión finita tienen un impacto menor en los filtros FIR en comparación con los filtros IIR (Infinite Impulse Response), y la cuantización del ruido debido a la precisión aritmética es despreciable. Sin embargo, un inconveniente de los FIR es que para cumplir con ciertas especificaciones se requiere un mayor número de coeficientes en comparación con los necesarios en los filtros IIR, lo cual puede aumentar la complejidad computacional. [4]

Filtros IIR (Infinite Impulse Response)

Emplean tanto los datos de entrada como los valores pasados de salida, lo que permite una respuesta de fase no lineal.

Características de los filtros IIR

Los filtros IIR (Infinite Impulse Response) presentan una serie de ventajas y desventajas en comparación con los filtros FIR (Finite Impulse Response). Una de sus

principales ventajas es que, debido a su recursividad, pueden lograr grandes pendientes en la banda de transición utilizando solo unos pocos coeficientes, lo que los hace eficientes en términos de recursos. Además, los filtros IIR pueden emular el comportamiento de un filtro analógico, logrando una buena aproximación en la respuesta al impulso y la respuesta en frecuencia, especialmente cuando la frecuencia de muestreo es muy alta en comparación con las frecuencias de interés.

Sin embargo, los filtros IIR tienen algunas desventajas significativas. Pueden ser inestables, lo cual hace necesario un diseño cuidadoso. Los errores introducidos en el cálculo de la salida $y(n)$ debido a la precisión finita en los cálculos matemáticos, pueden hacer que el sistema se vuelva inestable si los polos se desplazan fuera del círculo unitario. Además, como la respuesta al impulso $h(n)$ es infinita, no es posible calcular la suma de convolución de manera práctica.

Otra limitación es que los filtros IIR no pueden tener una fase lineal, a diferencia de los filtros FIR. Sin embargo, esto se compensa en cierta medida, ya que los IIR suelen ofrecer una mejor respuesta de magnitud en frecuencia, lo cual es beneficioso en aplicaciones que requieren una atenuación más eficaz en ciertas bandas de frecuencia.[4]

Filtros adaptativos

Los filtros adaptativos son sistemas dinámicos que ajustan sus parámetros en tiempo real para adaptarse a las características de la señal o del ruido en condiciones variables. Su capacidad de adaptación les hace útiles en entornos donde las señales o ruidos cambian constantemente, como en aplicaciones de procesamiento de señales biomédicas (ECG, EEG, EMG). [10]

Características de los filtros IIR

Los filtros adaptativos son especialmente útiles en entornos de condiciones cambiantes, ya que ajustan continuamente sus parámetros para adaptarse a variaciones en la

señal o en el ruido. Esta capacidad los convierte en una excelente opción para eliminar ruidos de frecuencia variable, mejorando así la calidad de la señal en aplicaciones de procesamiento en tiempo real sin necesidad de conocer previamente las características exactas del ruido.

Sin embargo, esta adaptación constante también tiene sus desventajas. Requiere mayores recursos de procesamiento y memoria, lo cual puede ser un problema en sistemas con recursos limitados, como dispositivos portátiles o embebidos. Además, la convergencia del filtro adaptativo puede ser lenta o incluso inestable en señales con características muy variables, lo que puede resultar en una adaptación no óptima o en fluctuaciones indeseadas.

Un factor importante en el diseño de estos filtros es la elección de la tasa de aprendizaje. Si la tasa es demasiado alta, el filtro puede volverse inestable; si es demasiado baja, el filtro puede tardar en adaptarse a cambios en la señal o en el entorno. De igual manera, los filtros adaptativos suelen depender de condiciones iniciales específicas, y su rendimiento puede verse comprometido si estas condiciones no son las adecuadas.

En aplicaciones en tiempo real, otro aspecto a considerar es el tiempo de adaptación del filtro a nuevas condiciones, ya que esto puede introducir retrasos indeseados en la señal procesada, afectando la eficiencia y efectividad en la mejora de la calidad de la señal. [4] [10]

Rehabilitación de brazo y antebrazo

Bases de la rehabilitación de miembros superiores

El grado de movilidad se reduce, en muchas ocasiones, tras un accidente cerebrovascular o el reposo en cama durante un periodo prolongado de tiempo. La reducción del grado de movilidad puede causar dolor, afectar el nivel funcional del afectado y aumentar el riesgo de excoriación (erosión de la piel) y úlceras de decúbito o por presión.

Amplitud de movimiento

La amplitud de movimiento limitada perjudica la función y tiende a causar dolor y predisponer a los pacientes a las úlceras por decúbito. La amplitud de movimiento debe ser evaluada con un goniómetro antes de la terapia y en forma regular a partir de entonces.

Los ejercicios de amplitud de movimiento estiran las articulaciones rígidas. El estiramiento suele ser más eficaz y menos doloroso cuando la temperatura del tejido se eleva a cerca de 43° C. Hay varios tipos de ejercicios para la amplitud de movimiento.

Activo: este tipo se utiliza cuando los pacientes puedan realizar el ejercicio sin asistencia; los pacientes deben mover sus miembros por sí mismos.

Activo asistido: este tipo se utiliza cuando los músculos están débiles o cuando el movimiento de la articulación causa incomodidad; los pacientes deben mover sus miembros, pero con ayuda de un terapeuta.

Pasivo: este tipo se utiliza cuando los pacientes no pueden participar en forma activa en el ejercicio; no exige esfuerzo por parte de ellos.

Fuerza y acondicionamiento

Muchos ejercicios tienen como objetivo mejorar la fuerza muscular. La fuerza muscular puede aumentar con ejercicios de resistencia progresiva. Cuando un músculo es muy débil, la gravedad sola es resistencia suficiente. Cuando la fuerza muscular es aceptable, se agrega resistencia manual o mecánica adicional (p. ej., pesos, tensión con resortes). Los ejercicios de acondicionamiento general combinan varios ejercicios para tratar los efectos del debilitamiento, el reposo prolongado en cama o la inmovilización. Los objetivos son restablecer el equilibrio hemodinámico, aumentar la capacidad y la resistencia cardiorrespiratorias y mantener la amplitud de movimiento y la fuerza muscular.

Facilitación neuromuscular propioceptiva

La facilitación neuromuscular propioceptiva ayuda a promover la actividad neuromuscular en pacientes con daño de la motoneurona superior y espasticidad; esto les permite sentir la contracción muscular y ayuda a mantener la amplitud de movimiento de la articulación afectada. Por ejemplo, aplicar una resistencia intensa al flexor del codo izquierdo (bíceps) de los pacientes con hemiplejía derecha hace que el bíceps hemipléjico se contraiga y se flexione el codo derecho.

Ejercicios de coordinación

Los ejercicios de coordinación son actividades orientadas a una tarea que mejoran las habilidades motoras mediante la repetición de un movimiento en el que actúan más de una articulación y un músculo en forma simultánea (p. ej., levantar un objeto, tocar una parte del cuerpo). [5] [11]

Rehabilitación con Videojuegos

La rehabilitación mediante videojuegos, también conocido como gaming rehabilitation, es un proceso donde se utiliza como metodología a videojuegos de consolas para orientar y mejorar las dificultades físicas y mentales de los pacientes a través de procesos terapéuticos. Plataformas que cuentan con control de movimiento, en particular la Nintendo Wii, el Kinect de la consola Xbox de Microsoft, el Eye Toy de Sony y escenarios de realidad virtual han sido eficaces en este campo de investigación.

Estas metodologías se han aplicado a grupos de gente de todas las edades, desde niños pequeños a personas de edad avanzada en todo el mundo y se han utilizado diferentes tipos de casos que van desde la rehabilitación del ictus, parálisis cerebral y otras alteraciones neurológicas, a las personas con tendinitis y esclerosis múltiple. Los investigadores han promovido este tipo de tecnología basada en la personalización de los sistemas de juego a los pacientes, lo que permite una mayor dedicación e interacción. [6]

Rehabilitación a través de videojuegos vs métodos regulares

A lo largo de su desarrollo, los videojuegos en la rehabilitación se han ganado una gran cantidad de apoyo por sus diferencias en comparación con los métodos terapéuticos tradicionales. La mayor de estas diferencias es la participación de los usuarios y el disfrutar. Ha sido ampliamente demostrado que las personas se sienten más involucradas en un entorno de juego y menos contenidas en una consulta médica al interactuar en un entorno de realidad virtual. Se han visto los métodos de rehabilitación tradicionales plantean dificultades a los que participan en ellos. A veces estas dificultades impiden que entre un 30% y 66% de las personas alcancen sus metas durante su tratamiento. [7]

Rehabilitación de miembro superior con ambientes virtuales

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

Los efectos de la realidad virtual y la tecnología háptica usando juegos en computador, mostraron un cambio positivo de actitud en los usuarios. Se utilizó para la rehabilitación de un grupo de 29 pacientes, 17 mujeres y 12 hombres con edades entre 44 y 85 años. La rehabilitación se inició entre el primer mes y 140 meses después del evento cerebro-vascular y mejora tanto las habilidades cognitivas como las motoras.

El sistema de rehabilitación virtual de propiocepción fue desarrollado para pacientes con ECV para usar realimentación propioceptiva en rehabilitación en rehabilitación de miembro superior bloqueando la realimentación visual. Para evaluar su efecto terapéutico, 10 pacientes con ECV mayor a 3 meses, entrenados con rehabilitación con realimentación de propiocepción por una semana y con realimentación visual por otra semana en orden aleatorio. Las funciones de propiocepción se prueban antes, después y al final de la

formación. De los resultados se muestra la efectividad y posible uso de los entornos virtuales para recobrar la propiocepción en pacientes con ictus.

La comparación de un programa de rehabilitación clásico con uno basado en realidad virtual en el caso de pacientes con dificultades de movilidad en el hombro mostró que la rehabilitación virtual es una buena alternativa para los pacientes ambulatorios o domiciliarios y en otros campos podría usarse en aplicaciones de telesalud; Es otro caso que demuestra la posibilidad de transferir las habilidades adquiridas en el mundo virtual al mundo real.

Las terapias de realidad virtual son una alternativa de complemento a las terapias tradicionales permitiendo el abordaje individualizado de acuerdo con las necesidades del paciente. [8]

Capítulo 3. Desarrollo

Selección de componentes

Se investigaron microcontroladores para adquirir una señal de EMG y convertidores analógico-digitales como el ADS1298 y ADS1299, sin embargo se optó por utilizar el microcontrolador PSOC5 que cuenta con un ADC Delta sigma que cuenta con una resolución de hasta 20 bits, que es más que suficiente para el propósito de este proyecto, además de que cuenta con PGAs y seguidores de voltaje que pueden configurarse desde el mismo controlador sin tener que agregar componentes físicos adicionales y que permiten adquirir y amplificar señales biológicas con una buena resolución.

Adquisición de la señal de EMG

Configuración de los componentes

Para adquirir una señal de EMG se utilizaron dos amplificadores operacionales en modo de seguidores de voltaje para poder mantener la integridad de la señal y evitar la pérdida de información.

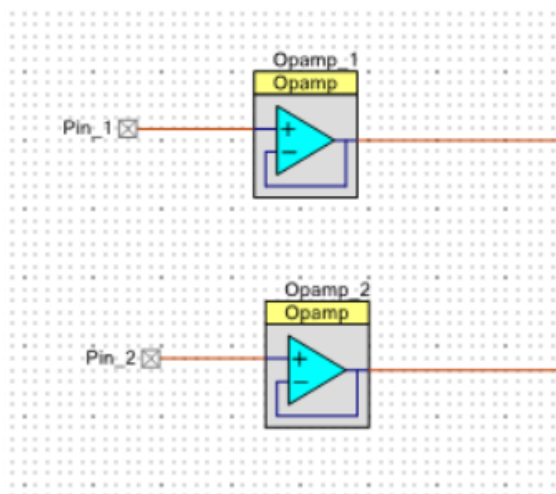


Ilustración 1. Seguidores de voltaje

Los amplificadores operacionales en modo de seguidores de voltaje se conectaron a dos PGA (Programmable Gain Amplifier) para poder amplificar las señales, se configuraron

utilizando el valor de ganancia mas alto que nos permite el componente para poder trabajar la señal de una mejor manera.

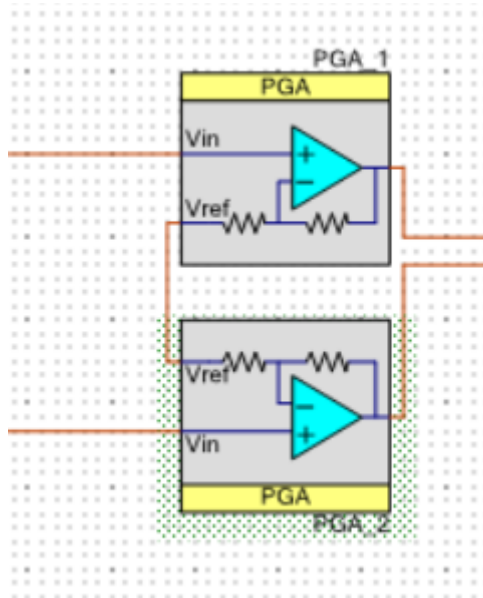


Ilustración 2. PGA (Programmable Gain Amplifier)

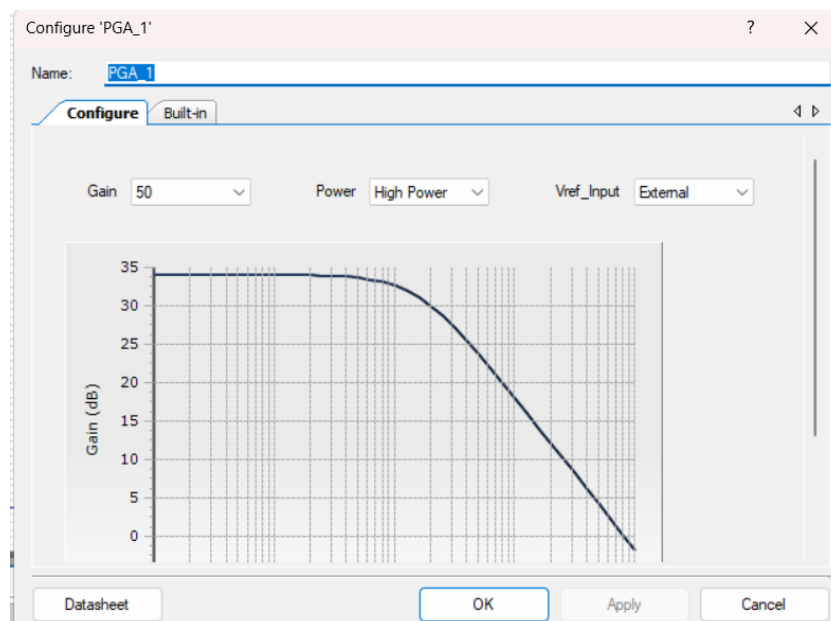


Ilustración 3. Configuración del PGA

Para terminar el proceso de adquisición de la señal, se utiliza un ADC Delta sigma para convertir la señal analógica a una digital y está configurado para funcionar en modo continuo, lo que permite realizar conversiones de forma ininterrumpida, con una resolución de 17 bits. La tasa de muestreo está establecida en 1000 muestras por segundo (SPS), lo cual

es adecuado para señales biológicas como EMG además de que se configura en modo diferencial, lo que permite medir la diferencia entre las señales de dos electrodos, con un rango de ± 6.144 V.

El buffer interno tiene una ganancia configurada en 8, lo que amplifica la señal antes de ser convertida. El modo de buffer Level Shift asegura que la señal de entrada se ajuste dentro del rango operacional definido, que va desde el nivel de referencia (V_{dda}) con un margen de aproximadamente 650 mV, garantizando que la señal no se sature ni pierda información.

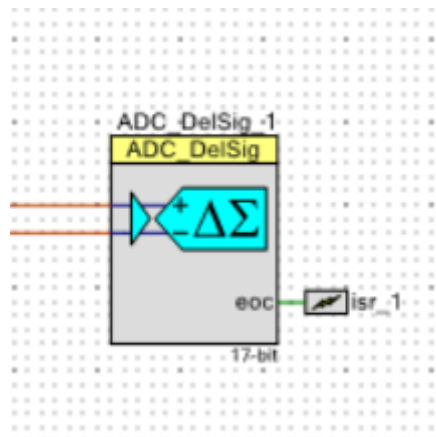


Ilustración 4. ADC Delta Sigma

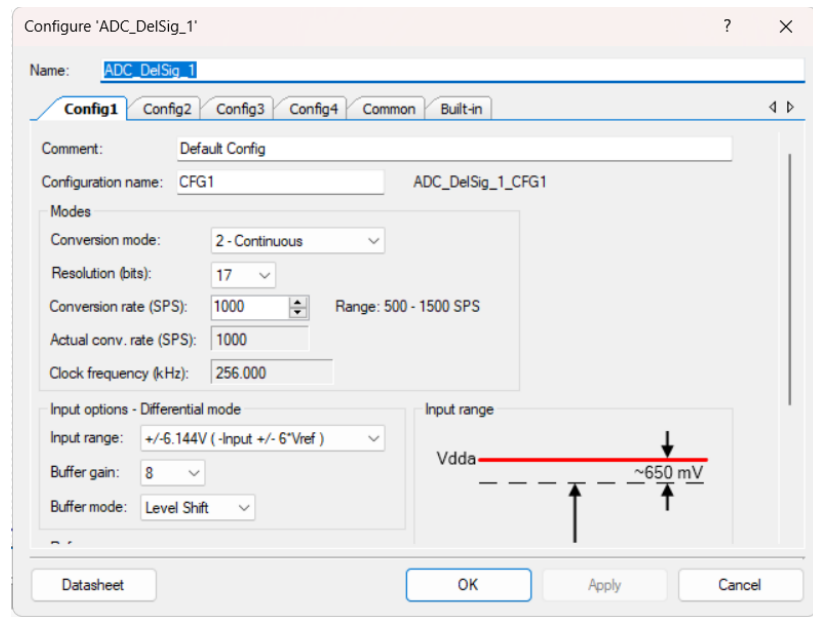


Ilustración 5. Configuración del ADC

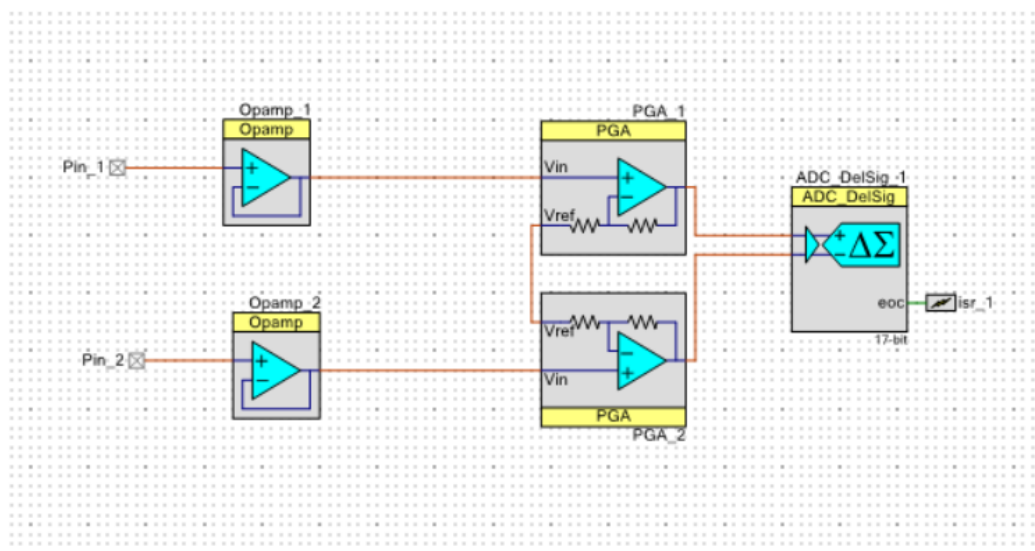


Ilustración 6. Componentes utilizados para adquirir a señal

Finalmente se implementó un componente UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) para poder enviar la información de la señal por el puerto serial de una computadora, con la finalidad de que pueda ser observada y filtrada.

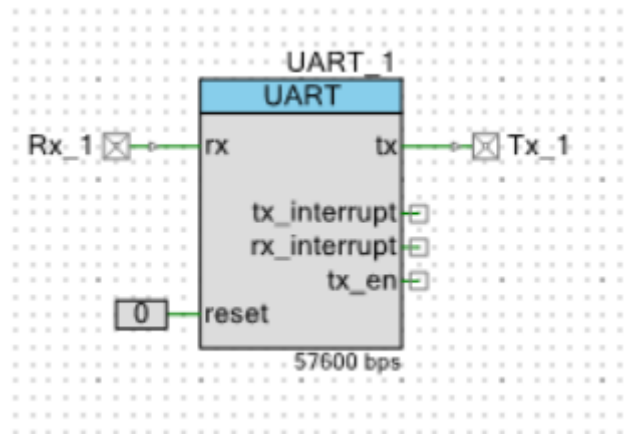


Ilustración 7. Componente UART

Adquisición de la señal

Para adquirir la señal se colocaron dos electrodos en los músculos extensores de los dedos y se colocó un electrodo en el codo para que sirva de referencia. Para poder observar la señal sin que se hayan aplicado filtros se tomaron los valores del puerto serial que se registraron durante un minuto y se graficaron en Matlab.

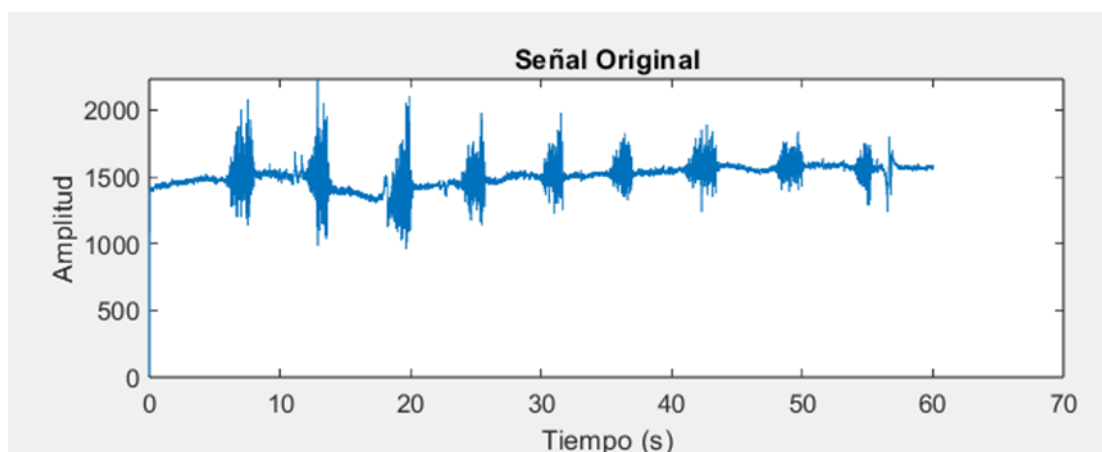


Ilustración 8. Señal de EMG sin filtros

De igual manera se utilizó la transformada de Fourier en el mismo programa para poder identificar las frecuencias que contaminan la señal y poder diseñar los filtros digitales. Se observó que hay un gran ruido en las frecuencias bajas menores a 1 Hz e incluso era muchísimo mayor que el ruido de 60 Hz.

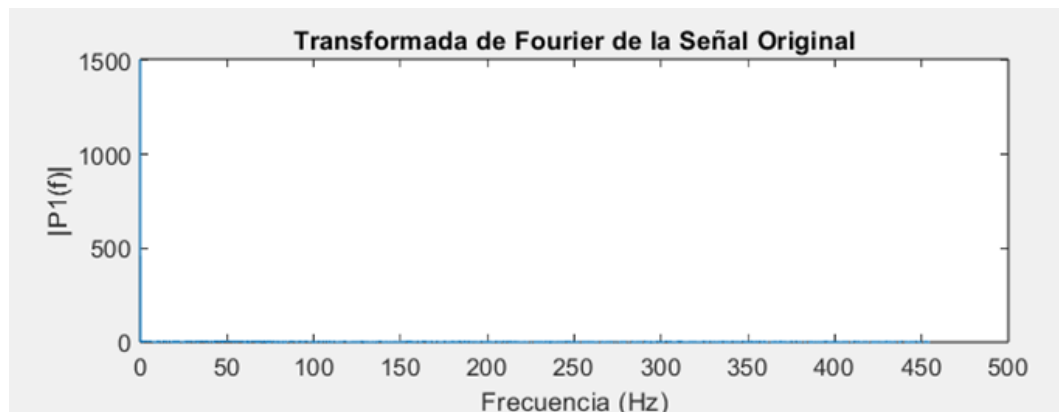


Ilustración 9. Transformada de Fourier de la señal sin filtrar

Procesamiento de la señal

Filtros IIR

Con la información de la transformada de Fourier se diseñaron en Python filtros IIR de orden 2 debido a que requieren un número menor de coeficientes que un filtro FIR, se diseñó un filtro pasa altas de 1Hz para eliminar el ruido de las frecuencias bajas, un filtro rechaza banda para eliminar el ruido de 60Hz y para se incluyó también un filtro de 450Hz para estabilizar la señal.

Aplicar estos filtros dio como resultado una señal más limpia y a través de la transformada de Fourier se pudo ver como estos filtros cortan en las frecuencias que se eligieron, dejando solo las frecuencias que aportan información útil para la aplicación de este proyecto.

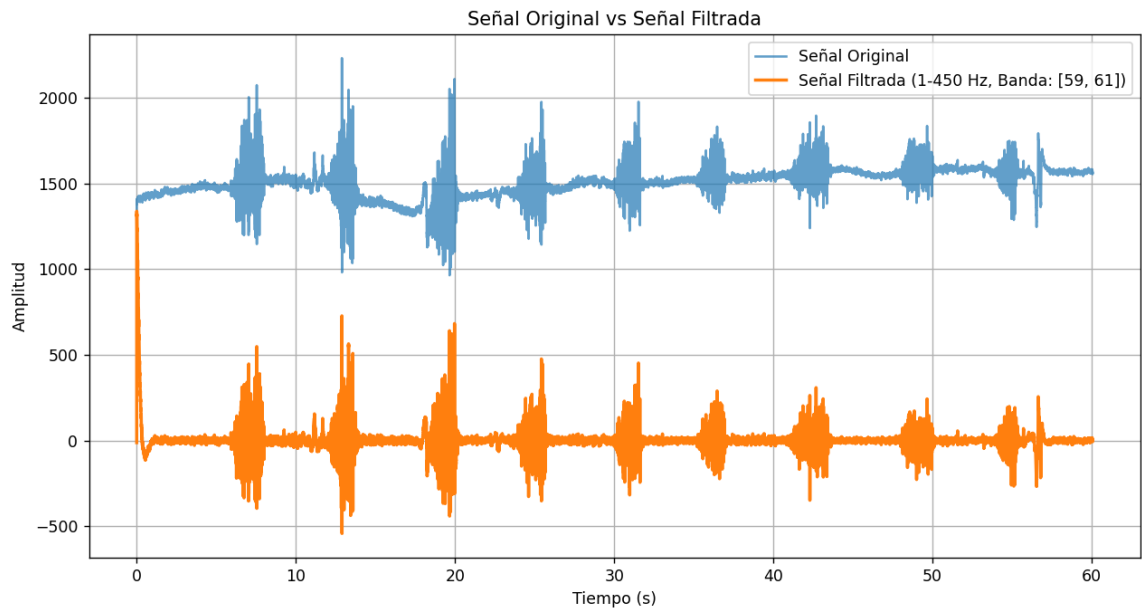


Ilustración 10. Comparación entre la señal original y filtrada

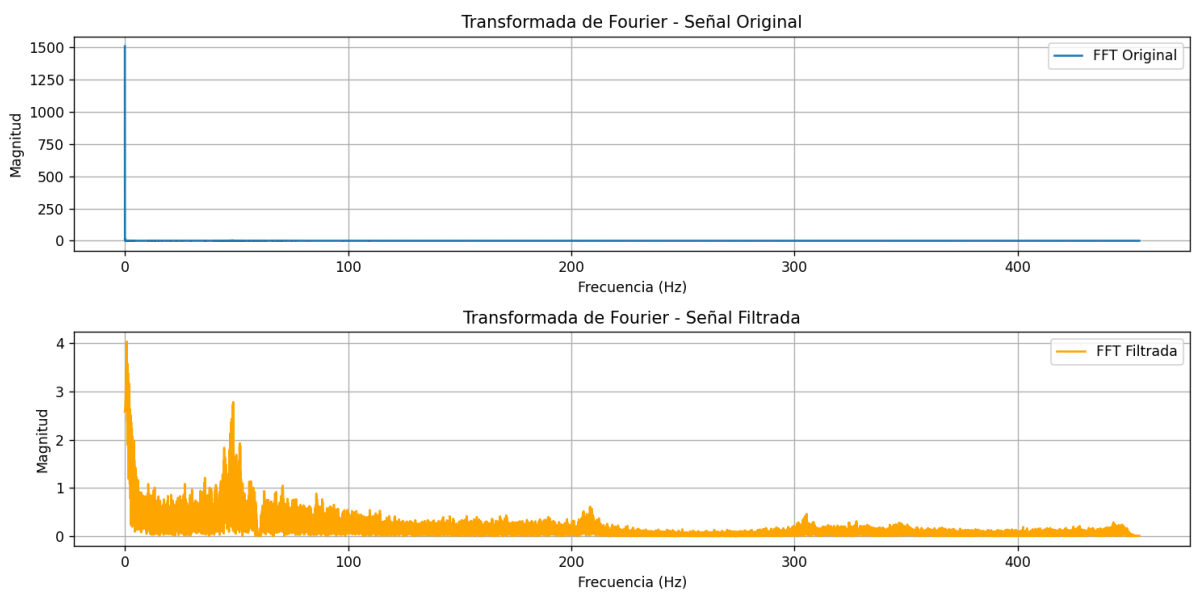


Ilustración 11. Comparación entre la Transformada de Fourier de la señal sin filtrar y la señal filtrada

Filtros adaptativos

Por otra parte, se diseñó en Python un filtro adaptativo LMS (Least Mean Squares) con una longitud de filtro de 16 y una tasa de aprendizaje de 0.001 para poder comparar cual

es el filtro que se puede adecuar mejor a diferentes pacientes. Se pudo observar que el filtro se adapta de manera adecuada a la señal y se puede observar el EMG de una manera clara.

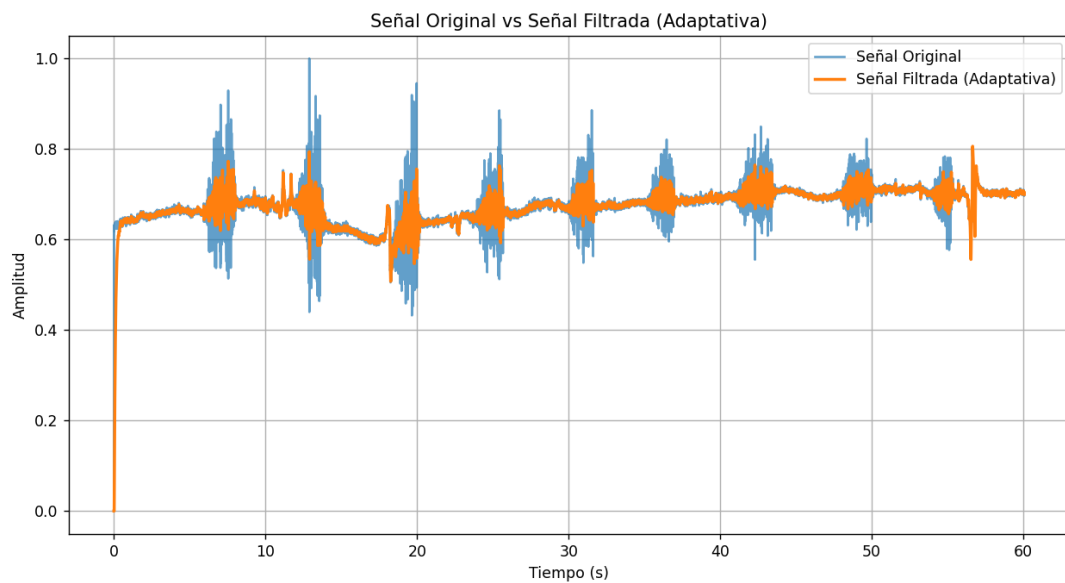


Ilustración 12. Comparación entre la señal original y la señal tras aplicar el filtro adaptativo

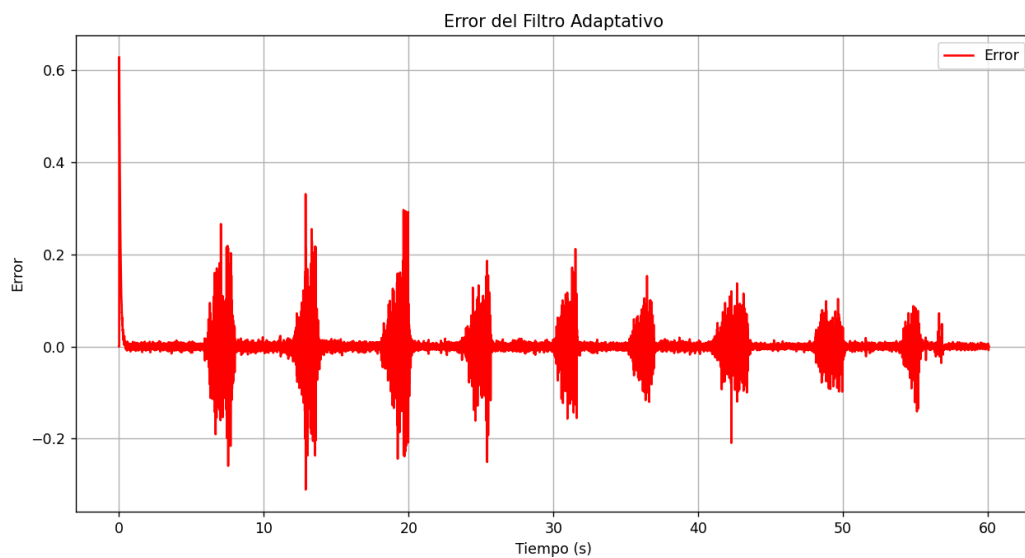


Ilustración 13. En esta imagen se puede observar la señal de EMG que se obtiene tras graficar el error del filtro adaptativo

Desarrollo del videojuego de rehabilitación

El videojuego se va a desarrollar en el programa Unity, que es de uso gratuito y que utiliza el lenguaje de programación C#, además de que incluye herramientas que facilitan la

creación de videojuegos y que pueden exportarse fácilmente como aplicaciones de dispositivos móviles o como aplicaciones de escritorio.

Para parte visual del juego se van a utilizar los programas gratuitos Inkscape y Libresprite, que permiten crear modelos y visuales que se pueden importar al programa Unity, la aplicación debe tener una interfaz fácil de entender y que se atractiva para cualquier usuario.

Para que el videojuego se comporte de manera adecuada a las señales de EMG se van a utilizar los filtros diseñados en Python y van a enviar la información a la aplicación diseñada en Unity, de modo a que Python realice todo el procesamiento de la señal y la aplicación solo deba recibir la información ya lista para activar acciones dentro del juego.

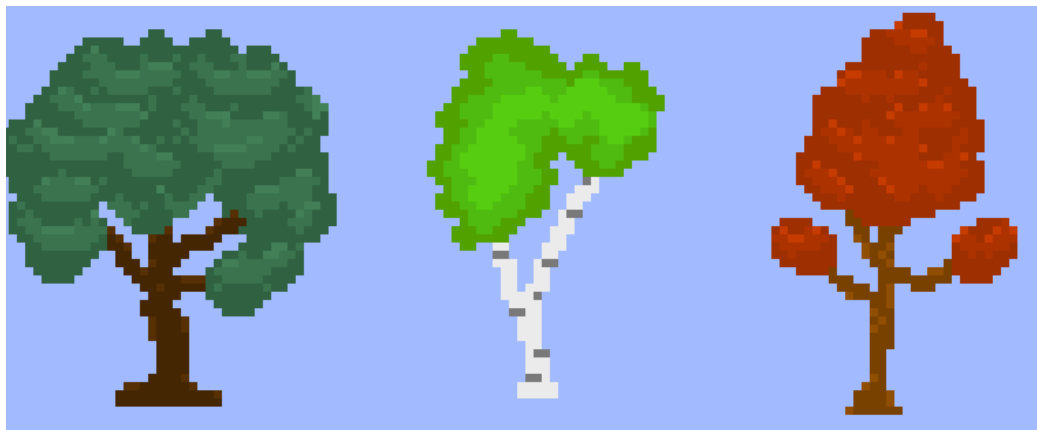


Ilustración 14. Modelos diseñados en Libresprite

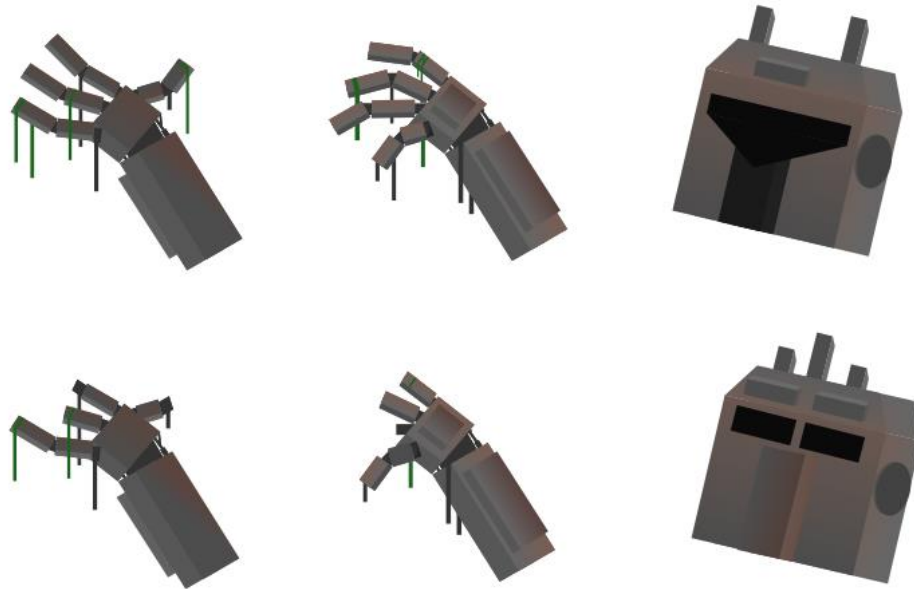


Ilustración 15. Modelos diseñados in Inkscape

Validación con pacientes

Una vez que el videojuego sea funcional se va a evaluar la efectividad del sistema en un entorno real. Para ello, se va a seleccionar un grupo piloto de pacientes con diferentes niveles de movilidad en el brazo. Durante esta fase, se llevan a cabo sesiones de rehabilitación supervisadas por un terapeuta físico en donde los pacientes interactúan con el videojuego y se evalúa la respuesta del sistema con los movimientos que realiza el paciente. Además, se recopila retroalimentación tanto de los pacientes como de los terapeutas, lo que permite obtener información cualitativa sobre la experiencia de uso y posibles áreas de mejora.

Referencias

- [1] Gila, L., Malanda, A., Carreño, R., I., J, R. F., & Navallas, J. (s. f.). Métodos de procesamiento y análisis de señales electromiográficas.
https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272009000600003
- [2] Cano, A. M. A. y. D. C. T. (s. f.). Electromiografía (EMG) - dalcame.
<https://www.dalcame.com/emg.html>
- [3] Filtro de bioseñales: definición & técnicas | StudySmarter. (s. f.). StudySmarter ES.
<https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-biomedica/filtro-de-biosenales/#:~:text=Un%20filtro%20de%20biose%C3%B1ales%20es,del%20dato%20para%20su%20an%C3%A1lisis.>
- [4] Escobar Salguero, L. (2006). *Diseño de Filtros Digitales*. Facultad de Ingeniería UNAM. <https://odin.fi-b.unam.mx/labdsp/files/libros/filtros.pdf>
- [5] Isaac, Z. (2023, 4 noviembre). Fisioterapia (FT). Manual MSD Versión Para Profesionales. <https://www.msdmanuals.com/es/professional/temas-especiales/rehabilitaci%C3%B3n/fisioterapia-ft>
- [6] Jorge. (2018). Realidad virtual y aumentada, su aplicación como nuevas tecnologías en el área de neurorrehabilitación. Recuperado de <https://repositorio.hospitalelcruce.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/907/COCCARO%20T%20C.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] García, et al. (2013). Serious game health. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875952113000153?via%3Dihub>
- [8] Guzmán, D. E., & Londoño, J. (2016). Rehabilitación de miembro superior con ambientes virtuales: revisión. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 37(3), 271-285.
- [9] Guzmán-Muñoz, E., & Méndez-Rebolledo, G. (2018). *Electromiografía en las Ciencias de la Rehabilitación*.

<https://www.redalyc.org/journal/817/81759607022/html/#:~:text=La%20se%C3%B1al%20electromiogr%C3%A1fica%20permite%20construir,comportamiento%20bioel%C3%A9ctrico%20muscular%201%2C3>.

[10] Arce, S. (s. f.). *Filtrado adaptativo*. <https://aholab.ehu.es/prj/ruido/>

[11] Isaac, Z. (1445, 18 mayo). *Fisioterapia*. Manual MSD Versión Para Público General.

<https://www.msdmanuals.com/es/hogar/fundamentos/rehabilitaci%C3%B3n/fisioterapia>

[12] García, et al. (2013). Serious games health. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875952113000153?via%3Dihub>

[13] López. (2018). Videojuegos como herramientas para la rehabilitación física, neuro rehabilitación y el entrenamiento cognitivo. Recuperado de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/dd74cae-53c7-4ea4-a737-fdbbb7d0ef17/content>

[14] Cora. (2018). Implementación de videojuegos con Kinect en pacientes que reciben fisioterapia: Revisión exploratoria. Recuperado de <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/6cded042-2f38-4b48-838c-aac3605c5722/content>

[15] Mañas, M. C., Vázquez, S. C., & De la Cuerda, R. C. (2017). Videojuegos comerciales en la rehabilitación de pacientes con ictus subagudo: estudio piloto. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6137194>

[16] Admin, & Admin. (2019, 20 marzo). Desarrollan videojuegos para la neuro-rehabilitación. Gaceta UNAM. <https://www.gaceta.unam.mx/desarrollan-videojuegos-para-la-neuro-rehabilitacion/>