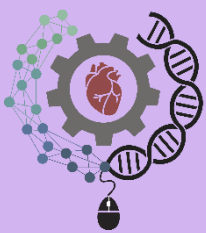




ESCUELA
POLITÉCNICA
SUPERIOR

Diseño de avatar RV para biofeedback de EMG.



Grado en Ingeniería Biomédica

Trabajo Fin de Grado.

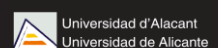
Autora:

Esther Bermejo Martínez

Tutores:

Gabriel Jesús García Gómez

Andrés Úbeda Castellanos



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Junio 2025

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a los tutores de este proyecto. Tanto Andrés como Gabriel, desde el primer momento orientaron la propuesta y me apoyaron en todo el proceso. Siempre han estado dispuestos a resolver las dudas, ofrecer soluciones y acompañarme. Además, me ofrecieron la oportunidad de tener acceso a los recursos del laboratorio Human Robotics, lo que fue clave para desarrollar la propuesta.

Resumen

La fusión de la medicina y las nuevas tecnologías en campos como la rehabilitación física abre las puertas a la posibilidad real de volver a vivir para muchos pacientes con lesiones medulares o enfermedades neuromusculares. Representa una segunda oportunidad para conectar con el entorno y su identidad. Las nuevas tecnología se integran con terapias innovadoras que se abren camino entre las tradicionales ofreciendo soluciones más complejas, eficaces y altamente adaptadas gracias a herramientas como la Realidad Virtual.

Existen diferentes tipos de sistemas de representación anatómica para pacientes en fisioterapia. En este trabajo se propone el diseño de un avatar en realidad virtual cuyo valor añadido es la visualización de la actividad muscular, es una plataforma interactiva, visual, personalizada que no solo mejora la adherencia terapéutica, sino que también va a despertar la motivación del paciente durante el programa de rehabilitación. En el contexto de la neurorrehabilitación, en concreto en la medición de electromiografía superficial la creación de este sistema que permite representar la actividad eléctrica de los músculos en un avatar virtual proporcionará información y facilitará el trabajo de los profesionales en este ámbito.

Actualmente los tratamientos buscan adaptarse al ritmo, a las capacidades y a las necesidades de cada persona, con esta solución se pretende contribuir a la no reducción de la movilidad en paciente con afecciones motoras, facilitar su interacción con el entorno y potenciar su recuperación de forma controlada. Desde la rehabilitación asistida hasta entornos inmersivos, las nuevas tecnologías biomédicas construyen una nueva forma de cuidar: más específica, más eficaz, con menos rechazo y más controlada.

Palabras Clave: Rehabilitación; Electromiografía; Realidad Virtual; Avatar personalizado, Biofeedback, Control motor, Terapia personalizada.

Dedicatoria

Mis padres se merecen una mención especial en este trabajo. Con su esfuerzo me han dado la oportunidad de poder perseguir mis sueños y han estado ahí incluso cuando la dedicación no obtenía recompensa. A mi hermano pequeño, por ser mi compañero en todo. A mis amigas Paula y Lucía, por apoyarme siempre. Y finalmente, a mi yaya porque, aunque me acompañaras en casi toda la aventura no has podido ver el final, pero siempre estuviste segura de que lo conseguiría.

CONTENIDO

<u>1</u>	<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>9</u>
1.1	MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	9
1.2	METODOLOGÍA	10
<u>2</u>	<u>MARCO TEÓRICO</u>	<u>11</u>
2.1	REHABILITACIÓN FÍSICA EN PERSONAS CON DAÑO CEREBRAL	11
2.1.1	PATOLOGÍAS NEUROMUSCULARES	12
2.1.2	TIPOS DE REHABILITACIÓN FÍSICA	13
2.1.3	TIPOS DE REHABILITACIÓN ASISTIDA	15
2.2	EVALUACIÓN DEL CONTROL MOTOR BASADO EN ELECTROMIOGRAFÍA	19
2.2.1	¿QUÉ ES LA ELECTROMIOGRAFÍA?	19
2.2.2	PARÁMETROS MUSCULARES MEDIDOS CON ELECTROMIOGRAFÍA.	21
2.3	SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN ANATÓMICA DEL CUERPO HUMANO EN RV	23
2.3.1	¿QUÉ ES LA REALIDAD VIRTUAL?	23
2.3.2	APLICACIONES DE RV USADAS EN ANATOMÍA	26
<u>3</u>	<u>DISEÑO DE LA APLICACIÓN PROPUESTA</u>	<u>32</u>
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA	32
3.2	SOFTWARE Y HARDWARE EMPLEADO	34
3.2.1	SOFTWARE DE DESARROLLO DE REALIDAD VIRTUAL	34
3.2.2	SOFTWARE DE DESARROLLO UTILIZADO	35
3.2.3	HARDWARE UTILIZADO	37
3.3	DISEÑO DE LA APLICACIÓN	38
3.3.1	INTRODUCCIÓN	38
3.3.2	METODOLOGÍA DE DISEÑO	39
3.3.3	ANÁLISIS DE APLICACIÓN	44
3.3.4	INTERFAZ DE USUARIO (UI) Y EXPERIENCIA DE USUARIO (UX)	45
3.3.5	DISEÑO 3D Y MODELADO DEL AVATAR	53
3.4	MECÁNICA DE LA APLICACIÓN PROPUESTA	55
3.4.1	INTERACCIÓN CON EL AVATAR	55
3.4.2	OPCIONES Y CONFIGURACIONES	58

3.4.3	NAVEGACIÓN EN LA INTERFAZ	58
3.4.4	SISTEMA DE RETROALIMENTACIÓN	63
3.5	ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN PROPUESTA	64
3.5.1	ESTRUCTURA DE ESCENAS EN UNITY	64
3.5.2	ESTRUCTURA DE SCRIPTS Y PROGRAMACIÓN	65
<u>4</u>	<u>ANÁLISIS DE COSTES</u>	<u>74</u>
4.1	COSTES DEL PROYECTO	74
4.1.1	COSTES INDIRECTOS	74
4.1.2	COSTES DIRECTOS	75
4.1.3	COSTES TOTALES	75
4.2	COSTES IMPLEMENTACIÓN EN ÁMBITO CLÍNICO	77
<u>5</u>	<u>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</u>	<u>79</u>
<u>6</u>	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>82</u>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases de la Rehabilitación según FEDACE.....	11
Figura 2. Unidad motora. Fuente: Ático de Julie La neurona, los músculos y la unidad motora. Junio, 2018.....	20
Figura 3. Señal electromiográfica. Fuente: Electromiografía en las ciencias de la rehabilitación Ed. Guzmán, G. Méndez. Diciembre, 2018.....	22
Figura 4. Diferencia entre realidad virtual y realidad aumentada. Fuente:Granasoft Febrero, 2022.	24
Figura 5. Partes visor realidad virtual. Fuente: Gafas de realidad virtual. Marzo, 2023.....	25
Figura 6. BodyMap Pro. Fuente: More Than Simulators Solución aprendizaje de anatomía RV inmersiva.	27
Figura 7. 3D Organon VR Anatomy. Fuente: STEAM 3D Organon XR.....	29
Figura 8. Logo Notion. Fuente: Notion.com.....	35
Figura 9. Logo Unity.....	36
Figura 10. Visual Studio Code.....	36
Figura 11. Logo Pinterest.....	36
Figura 12. Logo Canva.....	36
Figura 13. EMG Ultium de Noraxon.....	37
Figura 14. Prototipo escena principal. Elaboración propia.....	40
Figura 15. Prototipo escena 'Avatar Controller'. Elaboración propia.....	41
Figura 16. Prototipo escena 'Calibration'. Elaboración propia.....	41
Figura 17. Prototipo escena 'Video Calibration' I. Elaboración propia.....	42
Figura 18. Prototipo escena 'Video Calibration' II. Elaboración propia.....	42
Figura 19. Prototipo escena 'Calibration' II. Elaboración propia.....	43
Figura 20. Escena 'Calibration'- Mensaje informativo I. Elaboración propia.....	43
Figura 21. Escena 'Calibration' - Mensaje informativo II. Elaboración propia.....	44
Figura 22. Escena Principal. Elaboración propia.....	45
Figura 23. Estructura de las interfaces del proyecto. Elaboración propia.....	46
Figura 24. Escena 'Avatar Controller' I. Elaboración Propia.....	47
Figura 25. Escena 'Avatar Controller' II. Elaboración Propia. Elaboración propia.....	48
Figura 26. Representación visual de activación muscular. Vista frontal del avatar. Elaboración propia.....	48
Figura 27 . Representación visual de activación muscular. Vista lateral del avatar. Elaboración propia.....	49
Figura 28. Representación visual de activación muscular. Vista ampliada del avatar. Elaboración propia.....	49

Figura 29. Escena 'Calibration' vista inicial. Elaboración propia.....	50
Figura 30. Escena 'Video Calibration'. Elaboración propia.	50
Figura 31. Escena 'Stimulation' reproducción del vídeo ejercicio guiado para estimulación del deltoides anterior.....	51
Figura 32. Escena 'Video Calibration' mensaje emergente aviso cambio de escena. Elaboración propia.....	51
Figura 33. Escena principal mensaje emergente de ausencia de avatar. Elaboración propia.....	52
Figura 34. Bíceps desde cerca, apreciación de los detalles de diseño. Elaboración propia	54
Figura 35. Obtención y procesamiento de los datos del Noraxon en MATLAB. Elaboración propia.	56
Figura 36. Escena principal con selección. I. Elaboración propia.....	59
Figura 37. Escena Principal con selección. II. Elaboración propia	60
Figura 38. Escena Avatar Controller, avatar en posición inicial. Elaboración propia.	60
Figura 39. Escena Avatar Controller, avatar girado 90 grados. Elaboración propia.....	61
Figura 40. Brazo izquierdo del avatar humanoide girado y visto de cerca. Elaboración propia.	61
Figura 41. Escena 'Video Calibration'. Reproductor de vídeos principal. Elaboración Propia.	62
Figura 42. Diagrama resumen de las funcionalidades de la plataforma. Elaboración Propia.	63
Figura 43. Servidor TCP. Elaboración propia.	66
Figura 44. Recepción de datos por parte del cliente (equipo EMG Noraxon). Elaboración propia.	66
Figura 45. Procesamiento de mensajes recibidos y envío al controlador del Avatar. Elaboración Propia.	67
Figura 46. Actualización porcentaje activación del objeto gradiente. Elaboración Propia	67
Figura 47. Creación de objetos gradiente de color. Elaboración Propia	68
Figura 48. Objeto prefab, gradiente de estimulación muscular. Elaboración Propia.	68
Figura 49. Funciones públicas de MuscleActivationProgress. Elaboración Propia.	69
Figura 50. Obtener datos de estimulación. Elaboración Propia.	70
Figura 51. Cambio de color de músculos del avatar. Elaboración Propia.....	70
Figura 52. Interpolación lineal para obtención de color RGB a partir del porcentaje de activación. Elaboración Propia.....	71
Figura 53. Rotate Avatar – script –. Elaboración Propia.....	72
Figura 54. Zoom Avatar – script –. Elaboración Propia	72
Figura 55. Esquema conceptual de los trabajos futuros. Elaboración propia.....	80

ÍNDICES DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de costes directos del proyecto. Elaboración propia.	76
Tabla 2. Tabla de costes indirectos del proyecto. Elaboración propia.	76
Tabla 3. Tabla de costes totales de implementación en el ámbito sanitario.	78

1 INTRODUCCIÓN

En neurorrehabilitación los profesionales a menudo se enfrentan al reto de conseguir herramientas accesibles, sencillas y usables para la monitorización de la actividad muscular en tiempo real. En un entorno clínico dónde los recursos son limitados, especialmente el tiempo disponible durante la consulta, la electromiografía es una técnica clave para monitorizar la actividad muscular de forma eficiente y controlada. Aun así, su lectura puede ser compleja y acabar restando al profesional un tiempo valioso que se podría dedicar a otra parte del tratamiento. Este proyecto propone simplificar todo ese proceso, ofrece la representación visual de la actividad muscular en tiempo real mediante un avatar virtual, que finalmente, facilita la toma de decisiones durante la terapia de rehabilitación.

Es una herramienta que no sólo se considera una avance por la optimización del proceso de la medición de la actividad muscular sino también por la mejora de la precisión. Los cables del equipo, o dudas sobre la correcta activación a menudo son incertidumbres a las que se enfrentan el personal clínico en la consulta que se pueden solucionar gracias a este sistema inalámbrico se consigue la transformación de las terapias en procesos más eficaces y seguros.

1.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años ha habido una prevalencia en aumento de enfermedades neuromusculares y otras condiciones que llevan al paciente a pasar por un proceso de rehabilitación física prolongado. En este contexto, el auge de la medicina personalizada ha impulsado el desarrollo de plataformas tecnológicas enfocadas en adaptar terapias a las necesidades de cada paciente. La implicación de la Realidad Virtual (RV) con herramientas interactivas da lugar a nuevas posibilidades para personalizar y mejorar los procesos de rehabilitación.

Este Trabajo de Fin de Grado se sitúa en esta línea de innovación, con el objetivo de desarrollar un sistema que combine la RV y señales electromiográficas (EMG) para generar retroalimentación visual a través de un avatar. Esta propuesta no sólo pretende facilitar el seguimiento del estado funcional del paciente, sino también contribuir a la motivación y adherencia al tratamiento.

La rehabilitación física constituye una etapa clave en la recuperación funcional de numerosos pacientes, aun así, muchos procesos aun contienen barreras físicas o psicológicas, y repercute inevitablemente en su efectividad, que depende en la mayoría de los casos de la implicación activa del paciente. En este sentido, plataformas como la desarrollada, con herramientas para visualizar el proceso y evaluar las secuelas del daño de forma más precisa, pueden representar un valor añadido

para el sistema sanitario. En el desarrollo de esta plataforma se aborda la personalización de procesos de rehabilitación con el fin de otorgar mayor grado de independencia a los pacientes y contribuir al ejercicio digno de sus derechos.

El objetivo principal es el diseño de una plataforma que contiene un avatar para visualizar sobre él, el biofeedback obtenido de una electromiografía. Los objetivos específicos que se busca alcanzar son los siguientes:

- Realizar un estudio base sobre la rehabilitación física en pacientes con daño cerebral, haciendo énfasis en patologías neuromusculares y terapias rehabilitadoras asistidas.
- Realizar un estudio teórico sobre la evaluación del control motor basado en electromiografía. Concepto y parámetros musculares medidos.
- Realizar un estudio sobre sistemas de representación anatómica del cuerpo humano en realidad virtual.
- Diseño del sistema de virtualización como representación del concepto.
- Implementar funcionalidad interna de la plataforma.
- Validar la plataforma para conocer su ajuste a los objetivos determinados.

1.2 METODOLOGÍA

Se toma como punto de inicio la necesidad general y social de mejorar procesos de rehabilitación física mediante soluciones tecnológicas personalizadas por lo que la metodología utilizada se fundamenta en el enfoque **top-down**. Se investiga entonces en dos grandes campos de estudio la rehabilitación física y sus retos actuales englobando los tipos de rehabilitación física y las patologías neuromusculares; por otro lado, el estudio de tecnologías de realidad virtual para sistemas de representación y su capacidad para ofrecer entornos inmersivos. Con esta base teórica se procede a diseñar la solución tecnológica presentada.

El estudio anterior fundamentará la implementación de la plataforma de RV que permitirá personalizar tratamientos de rehabilitación. El sistema se valida mediante simulaciones funcionales, con el objetivo de observar su comportamiento, facilidad de uso y potencial de aplicación clínica o experimental. Los resultados evalúan la eficacia del feedback visual para facilitar la comprensión del movimiento, aumentar la motivación del usuario y contribuir al seguimiento rehabilitador de una forma más personalizada e interactiva.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 REHABILITACIÓN FÍSICA EN PERSONAS CON DAÑO CEREBRAL

La rehabilitación física es un derecho que figura entre las prestaciones básicas comunes y obligadas del Sistema Nacional de Salud. (Ministerio de Sanidad) Debe estar centrada en las necesidades del paciente además de en él mismo para conseguir el objetivo final: vivir con independencia y poder ejercer sus derechos dignamente. En el caso de pacientes que han sufrido daño cerebral, por ejemplo, debido a un ictus, el proceso de rehabilitación consta de varias fases (ver Figura 1). Se debe comenzar el tratamiento de rehabilitación desde la fase aguda de la lesión y mantener la continuidad a medida que la lesión evoluciona. Al principio los recursos necesarios serán en su mayoría sanitarios, hasta la fase subaguda donde se irán introduciendo recursos sociales para alcanzar finalmente la autonomía personal e inclusión (FEDACE).

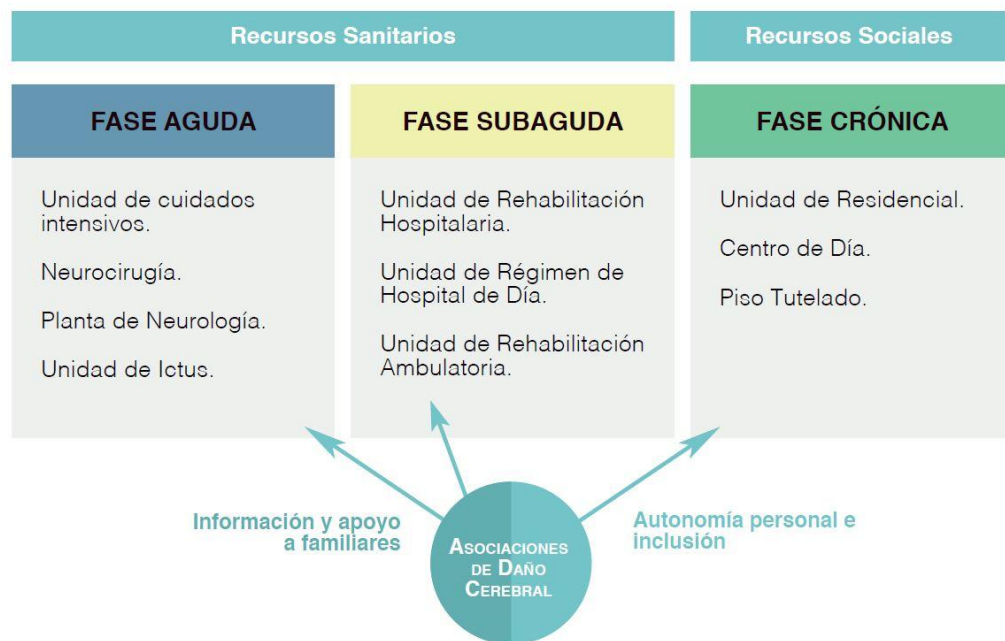


Figura 1. Fases de la Rehabilitación según FEDACE

En el proceso se evaluarán las secuelas del daño, las dificultades provocadas, se potenciarán las habilidades conservadas y se promoverá la integración social además de prevenir complicaciones futuras (FEDACE, s.f.) . En definitiva, este proceso se ajustará todo lo posible al paciente, y finalmente cuando haya finalizado la rehabilitación física se reorientará para alcanzar el siguiente objetivo: preservar la mejoría alcanzada.

2.1.1 Patologías neuromusculares

Muchos pacientes llegan a rehabilitación física tras haber sufrido alguna lesión (cerebral o física) o traumatismo, sin embargo, los pacientes que más tiempo pasan en estas terapias son aquellos que sufren una enfermedad neuromuscular. Las patologías neuromusculares según la Federación Española de Enfermedades Neuromusculares quedan definidas como un conjunto de 150 patologías que se caracterizan por la pérdida de fuerza muscular y son causadas por afecciones de la musculatura y del sistema nervioso. Son enfermedades causadas por genética, alteraciones genómicas o adquiridas.

La mayoría de las enfermedades neuromusculares son crónicas y, en un alto porcentaje, degenerativas, lo que provoca diferentes grados de discapacidad, pérdida de autonomía personal y una carga psicosocial considerable. Los tratamientos para estas patologías son mayormente paliativos, no curativos, y su disponibilidad es muy limitada, lo que dificulta el acceso a ellos. Más del 50% de estos trastornos se manifiestan en la infancia, aunque pueden aparecer en cualquier etapa de la vida (ASEM, 2024).

En España, aproximadamente 60.000 personas padecen alguna enfermedad neuromuscular, siendo estas las más prevalentes dentro de las enfermedades raras o poco comunes. Entre las principales enfermedades neuromusculares se encuentran las amiotrofias espinales, distrofias musculares, enfermedades musculares inflamatorias, miopatías, miositis osificante progresiva, neuropatías hereditarias sensitivo-motoras, trastornos de la unión neuromuscular y parálisis periódicas familiares.

En primer lugar, las amiotrofias espinales constituyen un grupo de enfermedades caracterizadas por la pérdida o degeneración de las neuronas del asta anterior de la médula espinal, lo que impide la transmisión correcta del impulso nervioso, y como resultado afecta tanto el movimiento como el tono muscular (Barros, Moreira, & Ríos, 2018). Por otro lado, en las distrofias musculares el daño se produce directamente en el músculo, provocando una progresiva destrucción del músculo y el reemplazo de este por grasa o tejido fibrótico. Estas condiciones tienen principalmente un origen genético.

A diferencia de las anteriores, las enfermedades musculares inflamatorias son adquiridas y de causa inmunológica. También existen otras patologías, como las miopatías que no tienen un origen concreto, se caracterizan por un déficit o anomalías en los grupos musculares. De manera similar, la miositis se refiere a la inflamación de los músculos, en concreto, de las fibras musculares. Asimismo, se encuentra dentro de las principales enfermedades neuromusculares el trastorno degenerativo más común del sistema nervioso periférico: la enfermedad de Charcot Marie Tooth (ECMT) o neuropatía sensitiva y motora hereditaria. Está asociada a un conjunto de alteraciones genéticas que afectan la

estructura, formación y mantenimiento de la mielina. Se estima que afecta a 1 de cada 2.500 personas sin guardar relación con la edad, género o etnia; su etiología es únicamente genética.

Las enfermedades neuromusculares dañan los nervios que controlan a los músculos, interrumpiendo las señales que el cerebro envía para generar movimiento. Con el tiempo, esta interrupción puede llevar al debilitamiento o desgaste progresivo de los músculos. El grado de afectación que cada patología tiene en el paciente depende del tipo de enfermedad, este determina el tratamiento que se va a aplicar en cada proceso. Las terapias de rehabilitación son cada vez más especializadas y complejas, lo que exige un abordaje integral en distintos niveles de atención.

En concreto, la lesión o daño cerebrales puede ser causada por un traumatismo, impacto o sacudida de la cabeza y su sintomatología se puede clasificar en tres niveles leve, moderada o grave. Entre ellos se encuentran síntomas físicos y psicológicos. Los indicadores de lesión moderada o grave son:

- Dolor de cabeza que empeora o no desaparece.
- Vómitos o náuseas repetidos.
- Convulsiones o espasmos
- No poder despertarse del sueño
- Pupilas más dilatadas de lo normal en uno o ambos ojos.
- Problemas para hablar
- Debilitación o entumecimiento en brazos y piernas.
- Pérdida de coordinación
- Aumento de la confusión, inquietud o agitación.

En la rehabilitación física se aborda el desarrollo de fuerza física, coordinación y flexibilidad (MedlinePlus, 2024). La movilización temprana en la rehabilitación es cada vez más crítica para la lesión cerebral consiguiendo un mejor pronóstico funcional, en concreto dentro de las 48 horas tras el inicio. Esta está recomendada a menos que el manejo sistémico sea primordial, como la inestabilidad hemodinámica, sangrado activo o aumento de la presión intracraneal. La rehabilitación en algunos casos puede ser de por vida entonces la intervención farmacológica, y enfocar la terapia en secuelas motoras y cognitivas a largo plazo pueden mejorar la calidad de vida del paciente (Iaccarino, Bhatnagar, & Zafonte, s.f.).

2.1.2 Tipos de rehabilitación física

La rehabilitación se define como un ‘conjunto de intervenciones encaminadas a optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad en personas con afecciones de salud en la interacción con su entorno’. Es una parte importante de la cobertura sanitaria universal además de la promoción de

la salud, la prevención de enfermedades, el tratamiento y los cuidados paliativos. (World Health Organization: WHO, 2024)

Las terapias de rehabilitación están en evolución constante, se vuelven más complejas, pero también más eficaces. Actualmente existen varios tipos de rehabilitación y cada uno está diseñado para responder a una condición particular. Los principales tipos de terapia de rehabilitación son ortopédica, neurológica, reumatológica y cardiorrespiratoria (Irited, 2023).

En primer lugar, la rehabilitación ortopédica se centra en mejorar la función del sistema músculo esquelético, en concreto en recuperar la fuerza, flexibilidad y rango de movilidad, en definitiva, dos de sus objetivos principales son acortar lo máximo posible el tiempo de recuperación y mejorar la calidad de vida de los pacientes (Hospital Galenia, 2021). Asimismo, en cuanto a la personalización del tratamiento, cada terapia de rehabilitación debe ajustarse al tipo de lesión, a la gravedad y a las necesidades de cada paciente.

Al igual que la rehabilitación ortopédica, la terapia de rehabilitación neurológica también es muy específica para cada paciente. Los pacientes objetivo de esta terapia son personas que han sufrido daño cerebral adquirido, una lesión del sistema nervioso central o una enfermedad neurodegenerativa. La terapia de rehabilitación neurológica facilita la reconexión de células neuronales después de una lesión, esto brinda independencia al paciente y es un punto clave en la integración social. Todo ello sucede gracias a la plasticidad neuronal, definida como la capacidad de las neuronas y del cerebro para adaptarse a cambios recuperando funciones perdidas con independencia de la edad. A causa de la plasticidad neuronal la terapia de rehabilitación neurológica es imprescindible para aquellos pacientes con daño cerebral. Es una terapia altamente específica para adecuarla a las características particulares del daño neurológico y ajustarse a las necesidades específicas de cada persona afectada. (Paolacabralt, 2024).

Por otro lado, la terapia de rehabilitación reumatológica según la SER (Sociedad Española de Reumatología) tiene como objetivo entrenar a personas que presentan discapacidad o que no son capaces de adaptarse a su entorno, realizando además una intervención en su entorno inmediato y en su entorno social para facilitar su integración (SER (Sociedad Española de Reumatología), s.f.). Es clave que esta terapia tenga un orden establecido por un médico y sea continua para maximizar la recuperación en aspectos funcionales, físicos, psíquicos, educacionales, sociales y profesionales .

La finalidad de este proceso es que después de reintegrar al paciente en la sociedad, este se pueda percibir a sí mismo, como un miembro productivo de la comunidad. Las metas de esta terapia son el alivio del dolor por medios físicos, mantenimiento o recuperación de la función muscular y articular, prevención de deformidades y déficits musculares, restaurar la autonomía funcional, y en definitiva mejorar la calidad de vida del paciente devolviendo el mayor grado de capacidad funcional e independencia posibles (SER (Sociedad Española de Reumatología), s.f.). Las principales

patologías que se tratan en terapia de rehabilitación reumatológica son artritis reumatoide, fibromialgia, patología del manguito rotador y tendinitis calcificante del hombro. .

De la misma forma que la terapia de rehabilitación neurológica, la rehabilitación cardíaca es muy personalizada, en algunos casos los programas han de ser diseñados a medida del paciente. Este tipo de terapia es recomendada por la *American Heart Association* (Asociación Americana del Corazón) y el *American College of Cardiology* (Colegio Estadounidense de Cardiología) tras haber sufrido un episodio cardíaco como puede ser un infarto de miocardio o una intervención cardíaca o también con la finalidad de disminuir el riesgo de futuros problemas cardíacos y muerte por enfermedades cardíacas (Mayo Clinic, s.f.). El entrenamiento con ejercicios, la educación sobre un estilo de vida saludables o apoyo emocional son algunos de los puntos que se tratan en este tipo de programas.

La rehabilitación es un proceso que no sólo trata la recuperación física en un paciente también trata su integración social y funcional. Ha avanzado tanto que hay disciplinas específicas de rehabilitación para abordar con mayor precisión distintos tipos de patologías y poder cubrir las necesidades individuales de cada paciente. La terapia incluye un enfoque personalizado y multidisciplinar en el que poco a poco se está incorporando tecnologías emergentes que adaptan los procesos de rehabilitación de forma dinámica, precisa y motivadora.

2.1.3 Tipos de rehabilitación asistida

Actualmente, los avances tecnológicos en medicina ofrecen más posibilidades para mejorar la eficacia y la accesibilidad de los tratamientos de rehabilitación. La rehabilitación asistida incluye una variedad de herramientas y técnicas para ayudar a las personas a recuperar y mejorar su bienestar después de una lesión o enfermedad.

Incorporar estas nuevas técnicas no supone una sustitución a la terapia convencional si no que la complementa adaptándose a los diferentes tipos de rehabilitación existentes. Las más interesantes de acuerdo con esta propuesta son:

- Rehabilitación asistida por realidad virtual.
- Rehabilitación asistida por el análisis del movimiento.
- Rehabilitación asistida por modelos y simulaciones musculoesqueléticas.
- Rehabilitación asistida por robots.

La realidad virtual se está consolidando como una herramienta de apoyo para la rehabilitación física. Su utilidad no sólo queda limitada a proporcionar información visual o sensorial al profesional sanitario, sino que también mejora la experiencia del paciente. El valor añadido que tiene el uso de la realidad virtual en la terapia de rehabilitación se ve reflejado en varios factores clave.

El primero es el factor motivacional, a partir de la introducción de elementos de RV la terapia de rehabilitación resulta más atractiva, genera curiosidad e interés en el paciente. Las sesiones de rehabilitación tradicional, que a menudo incorporan ejercicios repetitivos, se transforman en actividades más dinámicas, no generan ni sensación de monotonía ni rechazo

El segundo factor es el factor de la inmersión en las terapias, incorporando elementos como gafas de realidad virtual el entorno se vuelve diferente y llamativo que los procesos rehabilitadores tradicionales. En tercer lugar, está la calidad de vida del paciente según el estudio consultado la rehabilitación asistida con realidad virtual enfoca los ejercicios de la rehabilitación ya no solo en la recuperación motora si no también en las condiciones de vida relacionadas con la lesión. Es decir, se busca no solo una recuperación física, sino también funcional, fomentando que el paciente recupere la mayor autonomía posible. Esta visión más integral de la rehabilitación contribuye a una recuperación más completa y adaptada a las necesidades reales del paciente. El último factor en el que se ve reflejado la aplicación de este tipo de rehabilitación asistida es en la etapa de aplicabilidad. Hace referencia a cuándo se aplica la terapia si es de prevención, paliativa, fisioterapia convencional o postlesión, ayuda a personalizar aún más la terapia y abordar de forma específica la lesión o enfermedad. (Coronado-Ahumada, Están-Marquez, Natera-Panza, De la Hoz - Lara, & Salas-Viloria, 2021).

La realidad virtual está en constante desarrollo al igual que la tecnología, si actualmente se está utilizando como una herramienta eficaz no cabe duda de que su potencial habrá aumentado en el futuro. Los sistemas se vuelven más inteligentes así que será posible crear entornos terapéuticos todavía más personalizados adaptados con exactitud a las necesidades de cada paciente.

Además del impacto positivo que tiene la realidad virtual en la motivación y participación del paciente durante la rehabilitación también permite registrar sus datos durante la realización de ejercicios en tiempo real tal y como hace la rehabilitación asistida por análisis del movimiento. Con el uso de sensores, de cámaras y tecnologías de representación y visualización se permite el estudio detallado de la biomecánica del paciente durante su recuperación en las sesiones de terapia.

El análisis del movimiento aborda la biomecánica del cuerpo humano desde un enfoque estructural, se refiere al estudio de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo y su movimiento. Esta información resulta fundamental para crear tratamientos más precisos y también para contribuir a la evaluación de lesiones o desequilibrios que afectan a la forma en la que una persona se mueve. La incorporación del análisis del movimiento en la rehabilitación ofrece la posibilidad de corregir patrones de movimiento e impedir que se generen patrones incorrectos previniendo futuras lesiones, optimizando la recuperación y mejorando el rendimiento (La valoración biomecánica, una técnica esencial para los fisioterapeutas | Noticias, s.f.).

La valoración biomecánica se ha consolidado como una herramienta muy utilizada en rehabilitación física, ya que ofrece múltiples posibilidades al profesional sanitario. Su aplicación permite diseñar programas de ejercicios más efectivos, debido a una comprensión más profunda de la estructura y funcionalidad del cuerpo. Esto facilita una revisión más segura, eficaz y personalizada de los problemas musculoesqueléticos. Se puede monitorizar el progreso con estas herramientas ya que ayudan a justar el tratamiento de forma precisa.

El profesional de salud encargado de la terapia recibe más información para comprender los movimientos específicos involucrados en ciertas actividades o ejercicios. Se introduce un enfoque que mejora la salud musculoesquelética tras el proceso de rehabilitación para poder tener la mayor calidad de vida posible. (Santaella, 2024)

Otra herramienta que permite visualizar la actividad musculoesquelética y dar realimentación completa sobre la biomecánica del paciente es la utilización de modelos y sistemas musculoesqueléticos en la rehabilitación. Utilizando sistemas de modelado del cuerpo humano de forma análoga a la rehabilitación asistida por análisis del movimiento, se consigue representar digitalmente la estructura del paciente y simular su funcionamiento integrando la biomecánica estudiando la estructura y el movimiento, pero esta vez de los modelos.

Este tipo de rehabilitación asistida funciona en combinación con la rehabilitación asistida por análisis del movimiento, ofrece una visión detallada de cómo se producen las fuerzas internas y externas que actúan sobre el cuerpo, de los movimientos que se llevan a cabo durante los ejercicios dirigidos y del comportamiento del sistema musculoesquelético. Gracias a esta simulación, se puede prever el impacto de determinados ejercicios, analizar los efectos de una lesión o incluso anticipar los resultados de una intervención terapéutica antes de llevarla a cabo.

La incorporación de estos sistemas en la práctica clínica permite avanzar hacia la personalización aún más la rehabilitación, ajustando los tratamientos a las características individuales de cada paciente. De manera similar la terapia robótica también incluye personalización en sus terapias rehabilitadoras.

Según Inrobis (spin-off de la Universidad Carlos III) la rehabilitación asistida por robots, también conocida como terapia robótica, se define como un enfoque innovador en el campo de la rehabilitación. Este tipo de terapia se utiliza robots y dispositivos robóticos para asistir y complementar las terapias convencionales, tanto físicas como neurológicas, que son llevadas por fisioterapeutas y otros profesionales de la salud. A diferencia de la rehabilitación tradicional que puede depender en gran medida de la intervención humana, la terapia de rehabilitación robótica incorpora tecnología avanzada para proporcionar un apoyo más personalizado y preciso. (Inrobis, 2024)

El objetivo de la terapia robótica es facilitar la recuperación o la mejora de las capacidades motoras, funcionales y cognitivas de los pacientes mediante la realización de ejercicios específicos y repetitivos, diseñados para abordar las necesidades particulares de cada individuo. Esta terapia permite una mayor monitorización del progreso del paciente, además aumenta su motivación y su compromiso con la terapia durante las sesiones de rehabilitación. Los ejercicios son más atractivos y menos monótonos mejorando la adherencia al tratamiento.

La rehabilitación asistida por robots adquiere cada vez más características de interacción multimodal, adaptabilidad, personalización, monitorización, y registro de daños entre otras. La combinación de la terapia convencional con dispositivos de rehabilitación robótica proporciona una serie de posibilidades y beneficios que complementan, además de potenciar los métodos de rehabilitación convencionales. Entre las ventajas de la terapia robótica se encuentran la precisión, el control de movimiento, la seguridad, la reducción de riesgos, el acceso, la disponibilidad, y la complementación a la terapia tradicional.

En definitiva, todos estos elementos hacen de la terapia robótica una herramienta valiosa que complementa la atención convencional, mejorando los resultados de la rehabilitación y optimizando la recuperación de los pacientes (Inrobics, 2024).

Se duplicará el número de personas mayores de 60 según la previsión y también ascenderá el número de pacientes con enfermedades crónicas. Aun así, la incidencia continuada de traumatismos permanecerá (World Health Organization: WHO, 2024). Todo esto supone un aumento de la población con algún tipo de discapacidad para los que la terapia rehabilitación puede ser beneficiosa, a su vez el acceso a ella será más difícil. La terapia robótica puede ser una solución, se presenta como una herramienta para superar las barreras de acceso geográficos y temporal. Algunos se han diseñado para realizar la terapia en el hogar beneficiando especialmente a quienes viven en zonas remotas o en condiciones difíciles para su desplazamiento a centros de rehabilitación (Inrobics, 2024).

No solo mejora la seguridad, la precisión y la accesibilidad, sino que en combinación con la terapia tradicional complementa y agiliza el trabajo de los robots terapéuticos. En caso de rehabilitación de extremidades inferiores y superiores el fisioterapeuta invierte mucho tiempo y esfuerzo físico, si se incluye a los dispositivos robóticos se facilita el entrenamiento repetitivo, intensivo y específico de los ejercicios, mientras se alivia la carga del terapeuta. (ABLE Human Motion, 2024). Permite al profesional sanitario focalizarse en tareas más complejas y personalizadas mientras que los robots terapéuticos funcionan como herramienta auxiliar y se encarga de los ejercicios de repetición y rutinarios (Inrobics, 2024).

2.2 EVALUACIÓN DEL CONTROL MOTOR BASADO EN ELECTROMIOGRAFÍA

El control motor es un término comúnmente utilizado en fisioterapia, hace referencia a la elección de los procesos que realizan las diversas estructuras corporales, junto al sistema nervioso central, la vía motora y la sensitiva con respecto al movimiento. Presenta afectaciones si el paciente presenta alteraciones neuronas neurológicas. A medida que el cuerpo adquiere habilidades motoras se hace referencia al comportamiento motor. El control motor se relaciona con el aprendizaje y desarrollo del comportamiento motor (Junquera, s.f.). La evaluación del control basado en electromiografía trata de la evaluación de procesos que se llevan a cabo entre el sistema nervioso central y la vía motora y sensitiva.

2.2.1 ¿Qué es la electromiografía?

En concreto la electromiografía clínica queda definida como una técnica utilizada para realizar registros y análisis de la actividad bioeléctrica del musculoesquelético con el objetivo de diagnosticar las enfermedades neuromusculares. Los efectores de la motilidad voluntaria son los músculos estriados y su contracción se produce por el deslizamiento de proteínas contráctiles localizadas en el interior de las fibras musculares. Las fibras musculares estriadas son células alargadas con bandas oscuras y claras alternantes que forman estriaciones, en su interior se encuentran proteínas como la miosina, la actina, y la tropomiosina junto a la troponina que se asocia con la actina. Es en las astas anteriores de la médula espinal donde se encuentran los cuerpos de las motoneuronas alfa, según la frecuencia de sus impulsos nerviosos se codifica el grado de contracción de las fibras musculares en el sistema nervioso central.

La motoneurona alfa y las fibras musculares inervadas por dicha motoneurona forman un conjunto llamado unidad motora (véase Figura 2. Unidad motora. Fuente: Ático de Julie | La neurona, los músculos y la unidad motora. Junio, 2018). La unidad motora es la unidad anatómica y funcional del músculo, además el número que esta tenga de fibras musculares varía de unos a otros, algunas tienen un menor número de fibras musculares que implica mayor precisión como en el caso de los músculos oculomotores que requieren finos ajustes. Otras unidades motoras en cambio presentan un mayor número de fibras musculares como en el caso de los grandes músculos, son unidades motoras que tiene más fuerza. Los impulsos nerviosos que se transmiten a las células musculares a lo largo de los axones de las motoneuronas, las ramificaciones terminales de estos y las uniones neuromusculares son potenciales de acción.

Una características de las fibras musculares y de las neuronas es la posibilidad de que el potencial de membrana, conocido como la diferencia de potencial eléctrico entre ambos lado de la membrana de las fibras musculares, en determinadas circunstancias puede cambiar y en vez de tener un interior negativo volverse positivo. Este cambio de potencial o despolarización se denomina potencial de acción 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. En una contracción voluntaria débil sólo se activa un escaso número de unidades motoras que descargan potenciales de acción a frecuencias bajas. El aumento de la fuerza de contracción implica un aumento progresivo de la frecuencia de descarga y el reclutamiento o activación de más unidades motoras (Gila, Malanda, Rodríguez Carreño, Rodríguez Falces, & Navallas, s.f.).

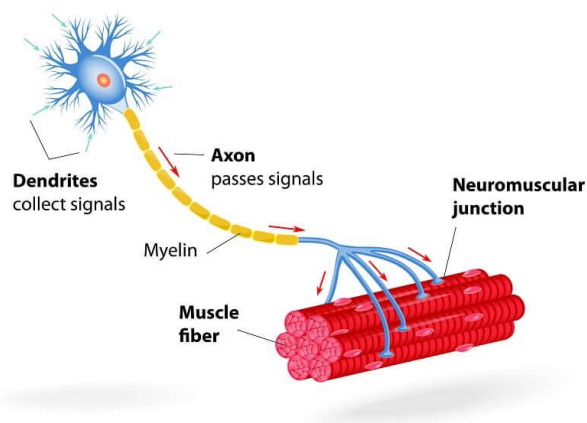


Figura 2. Unidad motora. Fuente: Ático de Julie / La neurona, los músculos y la unidad motora. Junio, 2018

La electromiografía trata el estudio de conducción nerviosa y se puede realizar tanto de forma invasiva con electrodos de aguja como de forma superficial con electrodos de superficie. Es una técnica que mide la velocidad y cómo se dan las señales eléctricas del cuerpo a través de los nervios. Este estudio permite conocer si hay afecciones en los músculos, en los nervios o en cómo funcionan juntos, asimismo en caso de haberlo saber dónde se localiza el problema. La electromiografía forma parte de los estudios de electrodiagnóstico, junto a los estudios de conducción nerviosa. La medicina electrodiagnóstica es la subespecialidad médica en la que se emplean técnicas neurofisiológicas para diagnosticar, evaluar y tratar a los pacientes con alteraciones físicas, sospechadas o documentadas, de los sistemas nervioso, neuromuscular y/o muscular.

En el electromiograma en primer lugar, se colocan los electrodos en la piel en el área que se desean, medirán la velocidad y la fuerza de las señales eléctricas entre diferentes puntos para realizar una evaluación de la efectividad de la comunicación entre las neuronas motoras y los músculos. En segundo lugar, en la electromiografía con aguja se insertan electrodos en el músculo a través de una aguja, estos evalúan la actividad eléctrica en el tejido muscular contraído y en reposo (Top Doctors, s.f.). Un músculo sano no debe emitir ninguna señal eléctrica cuando no está en movimiento, si emite actividad eléctrica el músculo está dañado. Los resultados pueden revelar una disfunción muscular o problemas con la transmisión de señales de nervios a músculos.

En la electromiografía con electrodos, estos traducen las señales eléctricas registradas a gráficas, sonidos o valores numéricos que después son interpretados por un médico especialista. Algunos de los signos por los que los profesionales de la salud solicitan este tipo de estudio son: hormigueo, entumecimiento, debilidad muscular y dolor o calambre muscular. Con frecuencia los resultados son una herramienta para clave para diagnosticar o descartar ciertas patologías.

Este es un procedimiento de riesgo bajo y es inusual que haya complicaciones. Existe mayor riesgo es la técnica de electromiografía con electrodo de aguja que en el procedimiento mediante electrodos de superficie. En el primer caso existe riesgo bajo de hemorragia, infección y lesión del nervio donde se inserta el electrodo de aguja (Mayo Clinic, s.f.).

2.2.2 Parámetros musculares medidos con electromiografía.

Los análisis de electromiografía tienen diversas formas para llevarse a cabo, destacan: en amplitud y en frecuencia. Si se realizan el análisis en amplitud se puede conocer el porcentaje de activación del músculo y la latencia, que es el tiempo que tarda un músculo en activarse. En cambio, el análisis en frecuencia permite conocer la fatiga muscular desde el punto de vista electrofisiológico. Si el análisis se realiza de un paciente con lesiones o patologías, el porcentaje de activación, el orden de reclutamiento, las latencias musculares y/o los niveles de fatiga de sus patrones neuromusculares normales de movimiento se ven alterados.

Teniendo la amplitud se puede concretar el nivel de activación del músculo o específicamente el porcentaje de activación. Se evalúa mediante el método de la raíz cuadrática que a su vez calcula la amplitud de una señal EMG durante un gesto motor, es uno de los más comunes para el análisis EMG porque como resultado obtiene una medida de la fuerza o intensidad de la contracción muscular, (véase Figura 3. Señal electromiográfica.), se aprecia el cambio de amplitud en un registro electromiográfica cuando el músculo está en reposo o en contracción muscular. Antes de obtener el porcentaje de activación muscular es recomendable realizar la normalización de los datos. En definitiva, la amplitud de la señal de electromiografía que se ha alcanzado durante el gesto motor de cada músculo evaluado se transforma en un porcentaje siguiendo la referencia de la contracción voluntaria isométrica máxima.

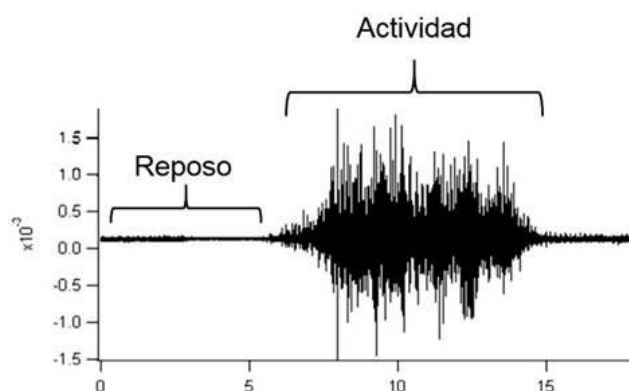


Figura 3. Señal electromiográfica. Fuente: *Electromiografía en las ciencias de la rehabilitación* / Ed. Guzmán, G. Méndez. Diciembre, 2018.

No solo se puede obtener el porcentaje de activación muscular mediante el análisis en amplitud si no también la latencia de la actividad muscular. La latencia se define como el tiempo que tarda el músculo en activarse o pre-activarse tanto en relación con la activación del músculo motor primario del movimiento o gesto evaluado, como en relación con un evento determinado. Con este objetivo se puede emplear un sensor inercial para saber exactamente cuándo es el momento del inicio del movimiento, ese es el tiempo de reacción muscular.

El método más utilizado para calcular la actividad muscular es mediante la desviación estándar de la línea basal. Se realiza antes de que el músculo tenga actividad muscular, cuando esta exceda el doble o el triple de la actividad muscular en reposo se define el músculo como activado, aun así, no tiene que cumplir solo ese requerimiento, para considerar se el músculo como activo se debe permanecer por encima del reposo un tiempo mínimo.

Por otro lado, si se obtiene la frecuencia de la señal electromiográfica se contribuye a entender la fatiga muscular desde el punto de vista fisiológico, se analiza durante la contracción del músculo a partir del espectro de frecuencias. En el caso de haber disminución progresiva de la frecuencia de la señal se relaciona con la aparición de la fatiga (Guzmán-Muñoz & Méndez-Rebolledo, 2018).

Tal y como se ha mencionado anteriormente una electromiografía puede presentar valores inusuales o anormales que dan lugar a distintos problemas neuromusculares como cambios en la actividad eléctrica por aumento o disminución de la amplitud y alteraciones en la frecuencia, reducción de la velocidad de conducción nerviosa, bloqueo de la conducción nerviosa ya sea interrupción parcial o completa, y debilidad muscular o denervación.

No sólo se pueden encontrar pequeñas afecciones de salud, la EMG también permite detectar enfermedades. Entre las enfermedades que se detectan se encuentran: esclerosis lateral amiotrófica, polimiositis, síndrome de túnel carpiano, neuropatías periféricas, distrofias musculares, y miastenia gravis (ICAC, 2024).

En primer lugar, la esclerosis lateral amiotrófica es conocida como enfermedad de Lou Gehrig es neurodegenerativa y afecta a las células nerviosas que controlan los músculos voluntarios (ICAC, 2023). La polimiositis por su parte es una miopatía inflamatoria causa principalmente debilidad muscular y de ese modo afecta a ambos lados del cuerpo (National Center for Advancing Translational Sciences). Siguiendo con enfermedades detectables está el síndrome del túnel carpiano es producido por una presión en el nervio mediano en el túnel carpiano de la muñeca. Otra enfermedad es la neuropatía periférica ocurre cuando los nervios fuera y también de la médula espinal se dañan causando debilidad, entumecimiento y dolor (Mayo Clinic). Además, la distrofia muscular al igual que la polimiositis, causan debilidad de los músculos y es un grupo de más de 30 enfermedades genéticas (National Library of Medicine). Por último, miastenia gravis provoca debilidad en los músculos voluntarios y que aparezca rápidamente la fatiga muscular (National Library of Medicine).

En resumen, los análisis de electromiografía pueden hacerse tanto en amplitud como en frecuencia, si se analiza en amplitud se puede medir el porcentaje de activación muscular y la latencia para ello se utiliza el método RMS, aunque antes se normalizan los datos. Si es el análisis en frecuencia se detecta la fatiga muscular desde una perspectiva electrofisiológica, esta se evalúa observando la disminución de la frecuencia de la señal electromiográfica durante la contracción muscular en una curva de frecuencias frente al tiempo. En casos de pacientes lesionados se alteran parámetros como el porcentaje de activación, el orden de reclutamiento y las latencias musculares.

2.3 SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN ANATÓMICA DEL CUERPO HUMANO EN RV

Un sistema de representación anatómica del cuerpo humano en realidad virtual requiere de virtualizar el cuerpo humano y permite desarrollar métodos educativos, aumentar la participación y la interacción de los estudiantes.

2.3.1 ¿Qué es la Realidad Virtual?

La realidad virtual VR son tecnologías nuevas y prometedoras cuyo uso en la medicina se está incrementando. La realidad virtual sumerge por completo al usuario en un espacio virtual tridimensional mientras que la realidad aumentada añade elementos del mundo real superpuesto al mundo virtual (véase Figura 4. Diferencia entre realidad virtual y realidad aumentada.). Ofrecen un gran potencial para mejorar los cuidados sanitarios críticos para pacientes, familiar y proveedores de atención sanitaria. Entre sus beneficios se encuentran la mejora de ansiedad, estrés, miedo, dolor de paciente también ayuda a la movilización y a la rehabilitación del paciente, así como la comunicación entre todos los individuos involucrados (Romano, y otros, 2022).

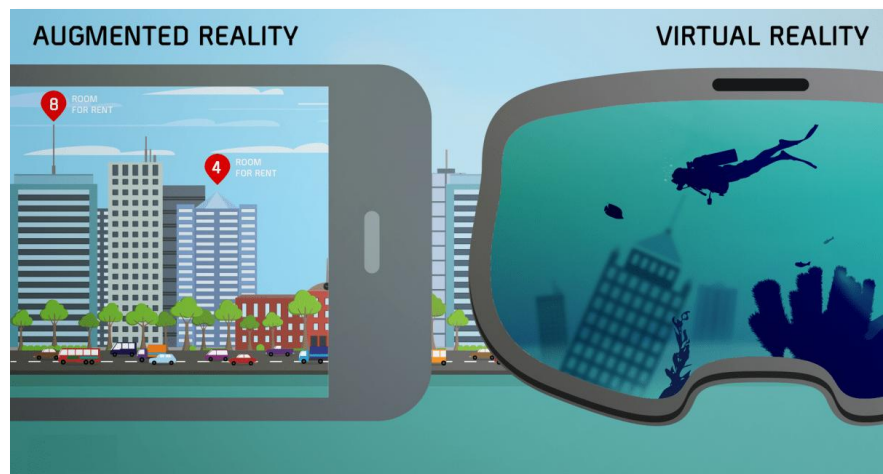


Figura 4. Diferencia entre realidad virtual y realidad aumentada. Fuente: Granasoft | Febrero, 2022.

Enclave de ciencia, es una plataforma dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación formada a partir de una asociación entre la Real Academia Española y la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología define la realidad virtual como “Representación de escenas o imágenes de objetos producida por un sistema informática, que da la sensación de su existencia real” aun así entre la literatura técnica se encuentran diferentes definiciones para la realidad virtual. “Una forma humana de visualizar manipular e interactuar con ordenadores y datos complejos “ (Aukstakalnis & Blatner, 1992) mientras que el autor Clade Cadoz de Las Realidades Virtuales, (Incerti & Cadoz, 1995) realiza un enfoque diferente entendiendo la realidad virtual como “representaciones integrales”. En definitiva, todas las definiciones tienen un punto en común, presentan la realidad virtual como un sistema con la capacidad de estímulo y de engaño a los sentidos, permite percibir un espacio virtual como real. A mayor integración del usuario mayor es la intensidad de la experiencia.

Una de las principales características de la realidad virtual es la inmersión sensorial que ofrece el sistema, este es capaz de ofrecer una inmersión completa gracias principalmente a visores de VR. Los visores (véase Figura 5. Partes visor realidad virtual) permiten ver escenarios tridimensionales provocando que los usuarios se sientan dentro de un entorno virtual. No solo pueden ver un entorno virtual también incluye sonido y movimiento creando una ilusión. Algunos de estos visores logran que al mover la cabeza o las mano se produzca un seguimiento del movimiento, esto supone que la experiencia adquiera mayor realidad y sea más envolvente para el usuario.

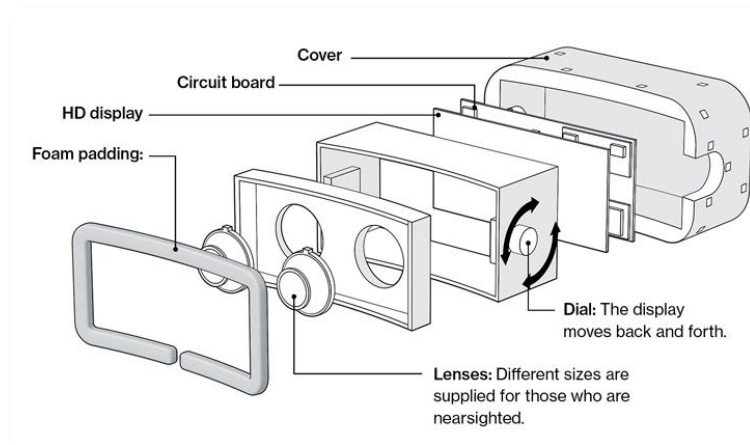


Figura 5. Partes visor realidad virtual. Fuente: Gafas de realidad virtual. Marzo, 2023.

Las experiencias inmersivas no solo ofrecen un entorno virtual, ofrecen al usuario la posibilidad de interactuar y controlar este entorno mediante la exploración y la manipulación de objetos digitales. Tienen la oportunidad de interactuar con personajes que forman parte del entorno e incluso de tomar decisiones que afecten a la narrativa o el desarrollo de la experiencia consecuentemente aumenta el grado de personalización de la vivencia y proporciona un nivel de participación (Lemus, 2024). Todos estos factores proporcionan un nivel de participación avanzado frente a otros recursos digitales.

Se pueden distinguir tres tipos de experiencias de realidad virtual según (Levis, 2006):

- Experiencia pasiva: estos entornos se caracterizan por ser inmersivos, pero no interactivos. Cabe la posibilidad de que el entorno este en movimiento, pero el usuario no puede controlar el movimiento por lo que se considera un tránsito forzado. Se trata de una pseudo-realidad virtual.
- Experiencia exploratoria: este sistema permite al usuario desplazarse por un entorno virtual para explorarlo, supone una diferenciación en cuanto a funcionalidad.
- Experiencia interactiva: este sistema virtual ofrece la experiencia de explorar el entorno y tener la capacidad de modificarlo. Una de las características principales de un sistema de realidad virtual es ser interactivo.

La realidad virtual presenta varias ventajas y desventajas. Algunas de ellas han sido constantes desde su invención y ahora están produciendo resultados impactantes. Es un experiencia inmersiva en la que los usuarios pueden adentrarse a lugares y situaciones en las que no sería posible en la vida real. Además, es aplicable a cualquier campo gracias a sus características se puede utilizar en educación, arquitectura, marketing entre otras; mostrando resultados que no serían posibles con herramientas tradicionales. Ha revolucionado la conexión conectando a personas desde todo el mundo y la comunicación manteniendo su efectividad. Ha mejorado procesos desde una perspectiva

más innovadora. Una de las ventajas más explotadas por el sector sanitario es la capacitación y la formación del personal teniendo como objetivo un mayor desarrollo de habilidad y competencias, lo que reducirá errores en un futuro. Además, se apoya la inclusión para personas con discapacidad puedan tener experiencias únicas.

No todo son ventajas la realidad virtual contiene puntos negativos. Para algunos usuarios no familiarizados con la tecnología tienen miedo de probar algo nuevo, rechazan esta tecnología y se niegan a avanzar. Otra desventaja es el conocido como ‘cibermareo’, es un efecto secundario de utilizar la realidad virtual y cierto es que afecta con mayor frecuencia a las mujeres que los hombres. El ‘cibermareo’ se produce cuando hay un desajuste entre el movimiento visual y el movimiento del cuerpo. Su sintomatología corresponde a náuseas, dolores de cabeza y fatiga ocular, tienen lugar cuando los usuarios se quitan las gafas de realidad virtual, son de desaparición rápida, pero en casos graves pueden durar horas (Noticias de la Ciencia, 2024).

En resumen, la realidad virtual es una tecnología emergente con creciente uso en el ámbito médico, a diferencias de la realidad aumentada que superpone elementos virtuales al mundo real , esta sumerge al usuario en un entorno 3D. Tiene un gran potencial para mejorar la atención sanitaria, facilitando la movilización y la rehabilitación además de aliviando la ansiedad y el estrés.

2.3.2 Aplicaciones de RV usadas en anatomía

La tecnología ha transformado muchos ámbitos de la vida de las personas, en algunos ámbitos es una herramienta que ha permitido grandes avances como es el caso del ámbito sanitario. La RV ha proporcionado a los estudiantes y profesionales de la salud la posibilidad de explorar estructuras anatómicas en un entorno tridimensional superando muchas de las limitaciones de los métodos tradicionales. Ha facilitado la comprensión profunda y práctica de la anatomía humana desde el análisis específico de órganos hasta la simulación de quirúrgicos.

MoreThanSimulator, es una empresa que se ha especializado en el diseño de centros de simulación y venta de simuladores. Entre sus productos se encuentran mesas de disección virtual, tanto en versión fija como portátil, modelos para acupuntura, BodyMap Pro de anatomía en realidad virtual (véase Figura 6. BodyMap Pro) y una solución de aprendizaje de anatomía RV inmersiva, conocida como BodyMap Pro.



Figura 6. BodyMap Pro. Fuente: More Than Simulators | Solución aprendizaje de anatomía RV inmersiva.

Este último equipo es una representación específica del cuerpo humano que permite su manipulación en realidad virtual 3D. Enfocado a la docencia tiene la capacidad de permitir la visualización instantánea y compartida (Romano, y otros, 2022). Uno de los recursos más innovadores en este campo de BodyMap Pro se ha diseñado para ser manipulada en un entorno virtual permitiendo a estudiantes y profesionales de la salud explorar y aprender de manera práctica, interactiva e intuitiva sobre la anatomía y fisiología humanas. Su utilización está pensada para ser en un laboratorio de RV posibilitando que las clases de anatomía y disección sean mucho más interactivas. Los estudiantes pueden observar en tiempo real las demostraciones del instructor, quien puede manipular y explicar cada estructura del cuerpo humano. Este modelo de aprendizaje hace que los estudiantes no solo observen, sino que también experimentan por sí mismos el contenido y los procesos, aumentando así su compromiso y retención de conocimientos.

Además, el laboratorio de RV permite la reutilización de avatares virtuales, hecho que supone una ventaja significativa para practicar sin limitaciones de recursos físicos. Este equipo ofrece características avanzadas: precisión médica destacada, reconstrucción médica de cada sistema basada en datos reales obtenidos de resonancias magnéticas y tomografías computarizadas, realismo con gran detalle. Se pueden explorar hasta doce sistemas anatómicos distintos: piel, esqueleto, músculo, tejido conectivo, circulatorio, nervioso, linfático, digestivo, reproductor, urinario, endocrino y respiratorio. Incluso se puede cambiar entre representación de modelos anatómicos masculinos y femeninos en proporciones reales para ayudar a entender las diferencias anatómicas entre géneros. Se puede elegir entre una de las siete regiones anatómicas: cabeza y cuello, espalda y médula espinal, tórax, abdomen, pelvis y periné miembro superior y miembros inferior proporcionando al usuario un mapa más localizado de esa región. Esta visualización se produce cuando el láser del controlador apunta a un área específica de interés.

Una de las características más innovadoras de BodyMap Pro es la simulación háptica. Este sistema permite que los usuarios interactúen con el cuerpo humano virtual, simula técnicas clínicas como la inserción de instrumentos médicos, con retroalimentación háptica en tiempo real. Durante las simulaciones, los usuarios pueden experimentar diferentes niveles de "antifuerza", que proporcionan una sensación realista al realizar procedimientos como inyecciones, incisiones y exploración de órganos internos.

Además, la herramienta permite "caminar" dentro del cuerpo humano virtual para inspeccionar los órganos en detalle, lo que proporciona una perspectiva única y detallada que sería imposible de lograr en entornos de aprendizaje tradicionales. Esta función es especialmente útil para familiarizar a los estudiantes con procedimientos invasivos y desarrollar sus habilidades clínicas en un entorno seguro y controlado.

El equipo de BodyMap Pro también tiene una presencia importante en conferencias y clases grupales. Al conectar el software en proyectores o escenas grandes se puede utilizar como recurso visual durante las clases, facilitando la explicación de conceptos médicos complejos. En consecuencia, se enriquece la experiencia educativa presencial y su uso en clases en línea, lo cual amplía la accesibilidad y el alcance de la docencia anatómica. Este equipo también incluye una función de cuestionario integrada para la evaluación de la anatomía humana de los estudiantes, con el objetivo es que identifiquen estructuras anatómicas determinadas. Esta herramienta sirve tanto para autoevaluación como para realizar el seguimiento del progreso de los estudiantes, ya que proporciona resultados detallados y permiten adaptar las técnicas de enseñanza según las necesidades de los alumnos. En BodyMap la personalización es un punto muy importante, brinda la posibilidad de poder crear contenidos anatómicos específicos, cuestionarios, instrucciones paso a paso para procedimientos médicos, etc. Asimismo, es multijugador con intercambio de conocimientos médicos entre instructores y estudiantes en tiempo real.

En conclusión, BodyMap Pro es una herramienta poderosa que transforma la enseñanza de la anatomía a través de la realidad virtual. Su precisión médica, características hápticas, opciones de personalización y capacidad de evaluación ofrecen una experiencia de aprendizaje inmersiva y eficaz que mejora la comprensión anatómica y prepara mejor a los estudiantes para el mundo clínico (Simulators, 2022).

Otra aplicación de anatomía humana interactiva es 3D Organon VR Anatomy (véase Figura 7. 3D Organon VR Anatomy). Esta es un herramienta desarrollada por 3D Organon, plataforma médica y de atención médica líder en XR, que incluye 15 sistemas corporales. Esta aplicación contiene 10 000 estructuras/ modelos anatómicas detalladas para aprender, enseñar anatomía, explorar el cuerpo humano. Convierte la docencia por medio de herramientas de realidad virtual en una experiencia inmersiva, conociendo las relaciones espaciales entre las estructuras anatómicas y

participando en salas virtuales para acelerar la formación. Los conocimientos de definiciones están basados en Terminología Anatómica oficial.

Organon 3D tiene varios modos de acceso, el acceso de 'Invitado' es gratuito y ofrece modelos 3D de los sistemas esqueléticos y los tejidos conjuntivos masculinos y femeninos. También incluye animaciones de articulaciones de los huesos. Sin embargo, si el usuario determina una licencia de suscripción tendrá acceso completo a los sistemas del cuerpo, la anatomía microscópica, las acciones corporales, preguntas interactivas, mapas óseos, imágenes de cadáveres, creación de sesiones de red a distancia y muchas otras características y funciones.

Comparte ventaja educativa con la aplicación de BodyMap Pro, la ludificación del aprendizaje, porque ofrece una experiencia estimulante, atractiva y entretenida para los estudiantes. A diferencia de BodyMap, Organon 3D está organizado por módulos; uno de ellos es el de red que proporciona la posibilidad de tomar formación en línea con múltiples usuarios organizadas por formaciones e instituciones. La información la integran lecciones de anatomía a distancia y comunicaciones con el tutor de los alumnos y compañeros en tiempo real mediante chat de voz y mensajes.

Esta herramienta no sólo está enfocada en estudiantes de medicina y ciencias de la salud, también se ha diseñado para pacientes, artistas y mentes curiosas. Su objetivo es facilitar la comprensión de la anatomía mediante información visual y textual precisa, tiempo de respuesta inmediato y una navegación intuitiva cumpliendo con lo más altos estándares de precisión médica y científica (3D Organon, s.f.).



Figura 7. 3D Organon VR Anatomy. Fuente: STEAM | 3D Organon XR

Estas aplicaciones anteriores están enfocadas a la docencia, a continuación, se presenta un software dedicado a la evaluación ergonómica integrando las tecnologías de realidad virtual, captura de movimiento, electromiografía de superficie y uso de exoesqueleto. Este proyecto en resumen se basa en el desarrollo de software automático de evaluación ergonómica en tiempo real, lo que

permitirá realizar un análisis biomecánico basado en los métodos más relevantes, con el objetivo de identificar riesgos de lesiones musculoesqueléticas. La realidad virtual es aplicada a la integración de movimientos de un usuario en un modelo virtual. Se realiza mediante la utilización de tecnología de captura de movimiento que permite obtener posiciones y ángulos de las articulaciones. Adicionalmente se pueden proporcionar parámetros biológicos de esfuerzos musculares mediante un sistema de electromiografía de superficie. La aplicación incluirá métodos de evaluación ergonómica como Rula, Reba, y la ecuación NIOSH, mostrando alertas sobre posturas forzadas y sobreesfuerzos. Proporciona información objetiva y fiable, facilitando la labor de los técnicos de prevención y permitiendo evaluaciones en cualquier entorno.

Además, se incorporarán tecnologías como la realidad virtual no inmersiva y la captura de movimiento inercial, que eliminan la necesidad de marcadores externos. También se utilizará la electromiografía de superficie para registrar la actividad eléctrica de los músculos de manera menos invasiva. La adquisición de datos del trabajador se realiza mediante tres tecnologías:

- Captura de Movimiento (MoCap) utiliza un traje inalámbrico con sensores inerciales y el software Axis Neuron Pro para registrar en tiempo real los movimientos en un modelo virtual. Los datos se exportan a Unity donde se visualiza el modelo y se programan los métodos de evaluación.
- Electromiografía de Superficie (Semg): Se emplea un sistema inalámbrico Delsys Trigno para registrar la actividad eléctrica de los músculos. Los datos se visualizan y configuran en el software EMGworks Acquisition.

Se llevó a cabo un estudio con personal sanitario para evaluar tareas como la limpieza de pacientes, comparando el uso de un exoesqueleto. Los resultados mostraron que el sistema de MoCap permitió un análisis detallado de las posturas y movimientos, mientras que la EMG proporciona datos objetivos sobre el esfuerzo muscular. La integración en Unity de los sistemas facilita la evaluación ergonómica en tiempo real y la generación de informes (Salcedo Eugenio, Ojados González, Ibarra Berrocal, & Macián Morales, 2023).

En definitiva, el sistema de evaluación ergonómica que integra tecnologías como la realidad virtual se encarga de capturar el movimiento y la electromiografía de superficie. Se diferencia de BodyMap Pro y 3D Organon VR Anatomy en su enfoque práctico y orientado a la prevención de lesiones. Mientras BodyMap Pro y 3D Organon VR Anatomy en su enfoque práctico y está orientado a la prevención de lesiones. Los sistemas BodyMap Pro y 3D Organon se focalizan en la enseñanza de la anatomía a través de experiencias inmersivas y visuales, mientras que el sistema ergonómico analiza y mejora las posturas y el movimiento en tiempo real. Así permite identificar riesgos específicos de lesiones musculoesqueléticas, algo que no es el objetivo principal de las aplicaciones de anatomía.

En resumen, mientras que BodyMap Pro y 3D Organon VR Anatomy transforman la enseñanza de la anatomía mediante la interactividad y la inmersión, el software de evaluación ergonómica se enfoca en la aplicación práctica de estas tecnologías para mejorar la salud, proporcionando un análisis biomecánico que ayuda a prevenir lesiones y optimizar el bienestar de los usuarios.

3 DISEÑO DE LA APLICACIÓN PROPUESTA

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

La realidad virtual ha demostrado ser una herramienta prometedora en el campo del entrenamiento y la rehabilitación física, aunque su uso en el ámbito de la electromiografía aún es limitado. En concreto el uso de la RV para proporcionar feedback visual e interactivo es una oportunidad para el desarrollo de aplicaciones que permiten a los usuarios observar en tiempo real las respuestas musculares representadas en un avatar personalizado. El comportamiento de los músculos se visualizará mediante una gama de colores que informa sobre la intensidad de la contracción muscular en una escala de verdes a rojos.

La propuesta de utilizar un avatar de biofeedback basado en EMG responde a la necesidad de mejorar la rehabilitación motora en pacientes con lesiones neuromusculares, proporcionando una representación visual en tiempo real de la activación muscular. Esto facilita la retroalimentación inmediata tanto al paciente como al terapeuta. Además, se puede utilizar en el entrenamiento de la coordinación y control motor, corrigiendo el uso de los músculos de forma intuitiva y analizando el feedback inmediato que mejora la plasticidad neuronal.

El objetivo principal del proyecto es diseñar e implementar un avatar de biofeedback basado en EMG, con la posibilidad de pre-entrenar con ejercicios dirigidos para potenciar la obtención de resultados. Inicialmente, en la plataforma se hace una preselección de un grupo de músculos, posteriormente se podrá apreciar visualmente su activación o no según el valor de los potenciales de acción mediante un cambio de color siguiendo un gradiente además de navegar por la interfaz teniendo acceso a más funcionalidades.

Esta solución no sólo tiene espacio en el ámbito sanitario, sino que también es aplicable en la investigación y en la medicina deportiva. Es una aplicación muy eficaz para el estudio de la actividad muscular, además permite estudiar el comportamiento del sistema musculoesquelético en pacientes con patologías neuromusculares de forma no invasiva y en tiempo real. Incluso personas sin conocimientos específicos sobre la interpretación de EMG puede interpretar los resultados de la actividad.

Por otro lado, en el ámbito del entrenamiento permite la evaluación del rendimiento muscular en atletas. El hecho de tener representación visual de la estimulación muscular permite un abordaje de la salud musculoesquelética más específico, por ejemplo, se puede corregir la técnica para realizar ejercicio de forma segura, identificar desequilibrios de la activación muscular y optimizar el entrenamiento con biofeedback ya que se pueden controlar las necesidades del usuario como la intensidad y el tipo de activación muscular en función de los datos del avatar.

Los usuarios objetivo de esta propuesta se pueden clasificar en tres grupos:

1. Paciente en rehabilitación motora, como personas con lesiones neuromusculares, en fisioterapia post-lesión o con trastornos de movimiento.
2. Profesionales de la salud como médicos especialistas, terapeutas ocupacionales o investigadores.
3. Estudiantes del ámbito sanitario de fisioterapia, medicina, en universidades y centros de formación para comprender mejor la respuesta del sistema musculoesquelético.

La plataforma implementada se caracteriza principalmente por la integración de RV y electromiografía, con el análisis de actividad muscular de señales EMG para proporcionar feedback en tiempo real. Uno de los puntos con mayor valor añadido de la propuesta es la personalización del avatar mediante un sistema de selección de personaje, además incorpora animaciones y efectos visuales para lograr una experiencia más atractiva y motivadora. Asimismo, incluye un sistema de gestión interna de escenas, y flujo de trabajo en Unity gracias a la implementación de scripts que introducen dinamismo, llevan a cabo un control de error consistente y permiten la escalabilidad.

El impacto de esta propuesta es significativo: en el ámbito médico se prevé una mejora en la adherencia y eficacia de tratamientos de rehabilitación motora, al permitir que los pacientes comprendan mejor el funcionamiento de sus músculos y reciban retroalimentación inmediata. En cuanto a su aplicabilidad en la docencia la herramienta enriquecerá la formación de futuros profesionales de la salud al ofrecer una educación interactiva que vincula directamente la teoría con la práctica. Por último, en lo deportivo permitirá optimizar los entrenamientos, corregir desequilibrios musculares y mejorar el rendimiento de los atletas. En todos los ámbitos se espera contribuir a una mejor comprensión biomecánica y al desarrollo de enfoques terapéuticos y formativos más eficientes.

En conclusión, este sistema se presenta como una herramienta innovadora y valiosa para la rehabilitación, el entrenamiento y la docencia. Es una propuesta que permite visualizar en tiempo real la activación muscular a través de un avatar personalizado, lo que facilita la comprensión e interpretación de las señales EMG de manera intuitiva. La personalización, la retroalimentación inmediata y la combinación de tecnologías avanzadas convierten este sistema en una propuesta atractiva y adaptable a distintos contextos, posicionándola como un recurso con gran potencial para mejorar tanto la eficacia de las terapias como la formación académica y el rendimiento deportivo.

3.2 SOFTWARE Y HARDWARE EMPLEADO

Para cumplir con el objetivo principal es clave la elección de un software y hardware adecuado para el desarrollo del proyecto, en este caso se requiere precisión, baja latencia para una experiencia en tiempo real, compatibilidad y conectividad que permitan una integración sencilla y calidad gráfica para tener una buena experiencia de usuario.

3.2.1 Software de desarrollo de Realidad Virtual

En primer lugar, se ha realizado una investigación para valorar los motores de juego que pueden ser utilizados para implementar la propuesta, algunos de estos son Unreal Engine, Game Maker Studio, Unity 3D, etc. El motor Unreal Engine, que ha sido creado para desarrolladores, está enfocado en crear en tiempo real de forma accesible y avanzada. Utiliza el lenguaje de programación C++ , de modo que requiere de algunos conocimientos previos. Asimismo, se caracteriza por ser una herramienta con cierta complejidad, con alta calidad gráfica y no ser gratuita, aunque tiene licencias para proyectos universitarios. La complejidad puede suponer en inicio un pequeño problema aun así Unreal Engine ofrece tutoriales en la propia plataforma y tiene una comunidad de usuarios que colaboran si es necesario para la resolución de dudas.

Unreal Engine no es el único motor de juego válido para propuestas como esta también existen otras opciones como Unity 3D, una plataforma muy popular. Este motor de juego tiene múltiples plataformas de usuario final, y permite descargas de aplicaciones ‘Made with Unity’. La principal ventaja es su gratuidad y la variedad de implementación ya que permite desarrollar juegos de 2D, 3D, VR y AR en diferentes ámbitos como en simulaciones médicas, entrenamientos industriales, etc. Además de ser multiplataforma, su lenguaje de programación principal es C#, aunque antes permitía Javascript ya queda obsoleto y mayoritariamente no se utiliza. El funcionamiento de este motor de juego es mediante objetos y componentes por lo que su programación también es orientada a objetos. También, incorpora sistema de partículas, sombras dinámicas, iluminación global incluso un motor de físico integrado. Incluso para mayor personalización el desarrollador tiene acceso a multitud de recursos porque Unity dispone de una tienda oficial con *assets* tanto gratuitos como de pago como modelos 3D, sonidos, efectos, etc.

Tanto Unity como Unreal Engine son buenos motores de juegos, pero con diferencias que pueden ser decisivas a la hora de elegir que herramienta utilizar. Unity es más adecuada para principiantes y no tan avanzado, además es multiplataforma y tiene un rendimiento más ligero, con un buen soporte fácil de implementar. Destaca por su facilidad de uso ya que tiene una interfaz amigable e intuitiva que permite empezar rápidamente a utilizarla sin necesidad de tener experiencia técnica. El flujo de trabajo es más sencillo y permite resultados funcionales. En cuanto a la compatibilidad con VR ofrece una compatibilidad muy amplia con dispositivos no tanto como Unreal Engine, que suele estar más enfocado en experiencias de alta calidad gráfica para dispositivos

potentes, entonces Unity suele ser mejor opción por su eficiencia y menos consumo de recursos. Por otro lado, ambos tienen buena documentación, extensa y completa sin embargo la de Unreal Engine puede ser muy técnica comparada con la de Unity. Esta última cuenta con una comunidad enorme, muy activa y es muy sencillo encontrar recursos como tutoriales, foros, plugins. Por último, tres factores que han sido decisivos han sido el rendimiento, los requisitos de hardware y la integración con herramientas biomédicas.

3.2.2 Software de desarrollo utilizado

Considerando todo lo anterior, se ha decidido utilizar Unity como el motor de desarrollo para implementar el sistema de visualización de biofeedback EMG. En cuanto a las razones más técnicas, Unity es un motor más ligero y tiene mejores requisitos de software por lo que es muy adecuado para utilizarlo en equipos portátiles, mientras que Unreal Engine por su enfoque gráfico avanzado exige hardware más potente especialmente si se quiere aprovechar la capacidad de renderizado en tiempo real. En el ámbito de la biomédica, Unity suele ser más versátil y compatible con dispositivos médicos y sensores externos, además de que gracias a la comunidad open source resulta fácil conectar este motor de juego con sistemas como EMG, sensores de movimiento o incluso sistemas telemetría médica.

Finalmente, después del análisis las herramientas de software utilizadas han sido las siguientes:

1. **Notion** para organizar los avances y llevar un registro de los problemas registrados y de sus respectivas soluciones. Ha permitido estructurar las tareas en distintas fases, y ha servido como un espacio donde recopilar enlaces útiles, ideas de diseño, etc. El objetivo principal de utilizar este software es tener una planificación clara y ordenada para el desarrollo.



Figura 8. Logo Notion. Fuente: Notion.com

2. **Unity** como motor de juego principal, en él se ha implementado el avatar y la interfaz de usuario, la lógica del sistema y animaciones. Gracias a su soporte para realidad virtual se ha implementado una aplicación inmersiva. La estructura basada en objetos y componentes ha facilitado el desarrollo modular del proyecto.



Figura 9. Logo Unity

3. **Visual Studio Code** para programar los scripts necesarios para lograr una plataforma de representación visual persistente, con animaciones y gestión dinámica de escenas. Esta herramienta se ha utilizado como entorno desarrollador de código para que sea estructurado, claro y controlado.



Figura 10. Visual Studio Code

4. **Pinterest, Canva, Microsoft Bing Image Generator** para el diseño visual y la estética del avatar. Asimismo, también se han utilizado iconos de Freepik. (Freepik, s.f.) En concreto **Canva** para hacer un primer prediseño de toda la propuesta, **Microsoft Bing Image Generator** para obtener referencias y finalmente Pinterest para obtener algunos elementos como algunos fondos y botones. En definitiva, un diseño bien pensado para mejorar la experiencia del usuario pero ligero para no afectar al rendimiento de RV.



Figura 11. Logo Pinterest



Figura 12. Logo Canva

3.2.3 Hardware utilizado

En el desarrollo de la plataforma es imprescindible analizar la actividad muscular de forma no invasiva y precisa, de modo que se registran los impulsos eléctricos generados por los músculos durante el movimiento para poder visualizarlos en el avatar a tiempo real. En definitiva, se requiere un sistema de adquisición avanzado y en este proyecto se ha empleado el sistema de sensores EMG *Ultium de Noraxon*. Es un sistema que se presenta como una de las soluciones más avanzadas del mercado que no solo tiene unas excelentes características técnicas, sino que también se complementa con un sistema software conocido como myoMUSCLE. Este software permite tener información detallada sobre la prevención de lesiones, mejorar el rendimiento y obtener retroalimentación neuromuscular.

Este equipo está formado por sensores EMG inalámbricos que se colocan sobre los músculos para medir la actividad eléctrica, el procedimiento se lleva a cabo gracias a que incluyen un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro para registrar el movimiento; por otro lado, gracias a un receptor inalámbrico se reciben las señales de los sensores y se transmiten posteriormente. El receptor actuará como cliente, estableciendo la conexión con el servidor para enviarle los datos registrados mediante el protocolo de comunicación TCP/IP.



Figura 13. EMG Ultium de Noraxon

El protocolo de comunicación TCP/IP (Transmission Control Protocol/ Internet Protocol) es un protocolo de internet que permite la transmisión de datos entre ordenadores u otros dispositivos. Este protocolo garantiza que los datos lleguen de forma ordenada, íntegra y sin daño durante el tráfico. Gracias a su fiabilidad y estructura en capas, TCP/IP permite una transmisión eficiente y estable de la información recogida por los sensores hacia la aplicación de visualización.

El sistema Ultium de Noraxon tiene muy buenas prestaciones técnicas. Es fundamental que la representación visual sea precisa además de fiable para facilitar el trabajo de los profesionales sanitarios que utilizan esta herramienta. Es un requerimiento importante la detección de señales musculares sutiles, además de bajo margen de error de exactitud en las mediciones. Estas necesidades se cubren de forma exitosa debido a la alta frecuencia de muestreo del equipo, puede alcanzar un valor de hasta 4000Hz, con una resolución de 24 bits y un rango de entrada de 24000 μ V. Además, la señal que mide el equipo tiene un ruido de base inferior a 1 μ V, entonces permanecerá limpia incluso en condiciones exigentes. El valor del ruido de base contribuye a la precisión

Otra característica destacable del sistema de medición de la actividad muscular es su capacidad para registrar señales musculares de forma local sin necesidad de conexión en tiempo real. Por lo que, en caso de no tener conexión, conectando el equipo por cable de internet el sistema de medición puede registrar de forma autónoma durante 8 – 16 horas, esto es una ventaja sobre todo para entornos clínicos donde pueda haber limitaciones de red.

Este sistema incluye transmisión inalámbrica de baja latencia, por lo que la transmisión de datos es prácticamente en tiempo real. En consecuencia, la representación de la actividad muscular también se puede actualizar en tiempo real, mejorando así la calidad del biofeedback. Utiliza tecnología Bluetooth Low Energy (BLE), con un alcance de hasta 30 metros. Esto es fundamental para la portabilidad del equipo, da la oportunidad al paciente de realizar ejercicios en un entorno más abierto y funcional como un gimnasio, sin sentir limitaciones por un equipo fijo. Gracias a la conectividad inalámbrica el paciente se puede desplazar favoreciendo a que sea una experiencia natural, hecho que repercutirá en la adherencia del paciente al tratamiento.

El sistema de EMG Ultium de Noraxon ofrece fiabilidad, calidad de la señal biomédica, precisión y una solución portátil a la vez que eficaz para el registro de la actividad muscular en tiempo real. Su integración con la plataforma favorece la implicación del paciente y la calidad del tratamiento.

3.3 DISEÑO DE LA APLICACIÓN

3.3.1 Introducción

En el diseño de la aplicación es fundamental crear un entorno virtual que no sea solo funcional, intuitivo y accesible, sino que esté centrado en el avatar virtual como elemento principal de la plataforma. Cada funcionalidad está pensada para garantizar una experiencia en la que el foco de atención sea adaptar el proceso de rehabilitación a cada paciente utilizando Unity, integrando tecnologías emergentes como la realidad virtual en la rehabilitación física, además de proporcionar este software a los profesionales sanitarios para que puedan utilizarla en la terapia rehabilitadora.

El objetivo es crear este entorno intuitivo, sencillo y personalizado para que los profesionales sanitarios puedan visualizar la actividad muscular del paciente, se mejore la adherencia al tratamiento y se facilite el seguimiento del proceso rehabilitador. Se busca mejorar la comprensión del movimiento y el rendimiento muscular por parte del paciente y del profesional sanitario.

El desarrollo de esta solución tecnológica responde a la necesidad de ofrecer soluciones más accesibles y efectivas. Entre los elementos que se incorporan al proyecto para maximizar su utilidad clínica y su aplicabilidad en entornos reales se encuentra la anatomía virtual personalizada y la gamificación del proceso terapéutico.

3.3.2 Metodología de diseño

La metodología que se ha empleado para el diseño, el desarrollo de la plataforma y su integración con el sistema de biofeedback de electromiografía ha sido una metodología ágil basada en ciclos iterativos de mejora continua. Se ha optado por este enfoque debido a la necesidad de realizar ajustes rápidos en función de los resultados de las pruebas y de la retroalimentación obtenida durante el proceso. Esta forma de trabajo ha permitido al desarrollador adaptar el diseño a las necesidades funcionales y estéticas del usuario final, garantizando flexibilidad y eficiencia. Como parte del proceso iterativo, se elaboró un prototipo inicial con la herramienta de diseño ‘Canva’ comentada en 3.2.2 Software de desarrollo utilizado. Antes de la implementación de la interfaz en el entorno virtual se ha determinado su distribución conceptualmente. Este prototipo ha cumplido con su objetivo permitiendo tener una base sólida sobre la que validar ideas de diseño y sus funcionalidades, además de recoger primeras impresiones. Este diseño base facilitó la toma de decisiones en fases posteriores. A la vista del epígrafe 3.3.4 Interfaz de Usuario (UI) y Experiencia de Usuario (UX) se puede ver la evolución entre el resultado final y la versión prototipo que se dispone a continuación.

En primer lugar, se diseñó la escena que permite hacer configuraciones especiales, es la que aparece al abrir la aplicación en la versión prototipo y permite al usuario seleccionar el perfil que va a tener durante la experiencia y hacer una selección de los músculos de los cuales el usuario quiere visualizar la actividad muscular (véase Figura 14. Prototipo escena principal. Elaboración propia). Además, desde la escena principal se puede acceder bien a la escena del avatar humanoide o bien a la escena de calibración. Incluso en el caso de que el usuario quiera finalizar su experiencia puede salir de esta escena con el botón de la esquina inferior derecha.

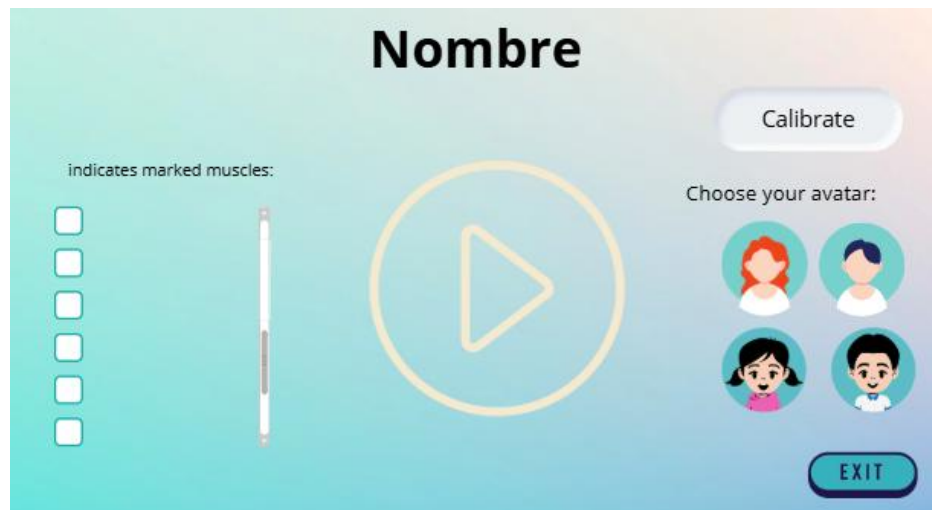


Figura 14. Prototipo escena principal. Elaboración propia

Para avanzar a la escena de la representación de la actividad muscular (véase Figura 15. Prototipo escena 'Avatar Controller'. Elaboración propia.) el usuario tiene que pulsar el botón central, además se valora la idea de incluir alguna animación en este botón para que sea un elemento atractivo visualmente y disruptivo. En esta escena la atención del usuario la concentra el avatar humanoide por lo que el resto de los elementos deben acompañar con información fundamental para que el usuario pueda comprender el comportamiento musculoesquelético que se está dando en el paciente.

A la vista del avatar humanoide puede resultar complicado asociar el color de los músculos con la activación muscular, para facilitar este ejercicio cada músculo llevará asociado un gradiente correctamente identificado y en el que se especifique el valor de la activación muscular.

Es decir, si el usuario selecciona el bíceps, no sólo cambiará de color a un amarillo intenso cuando más de la mitad de las fibras musculares estén activadas, para que el usuario comprenda mejor la estimulación aparecerá de forma dinámica una imagen de un gradiente de colores identificada como 'Bíceps' o el nombre de músculo al que corresponda, en la que con una flecha se señalará el color que está tomando el bíceps y se indicará con un valor numérico el porcentaje de activación.

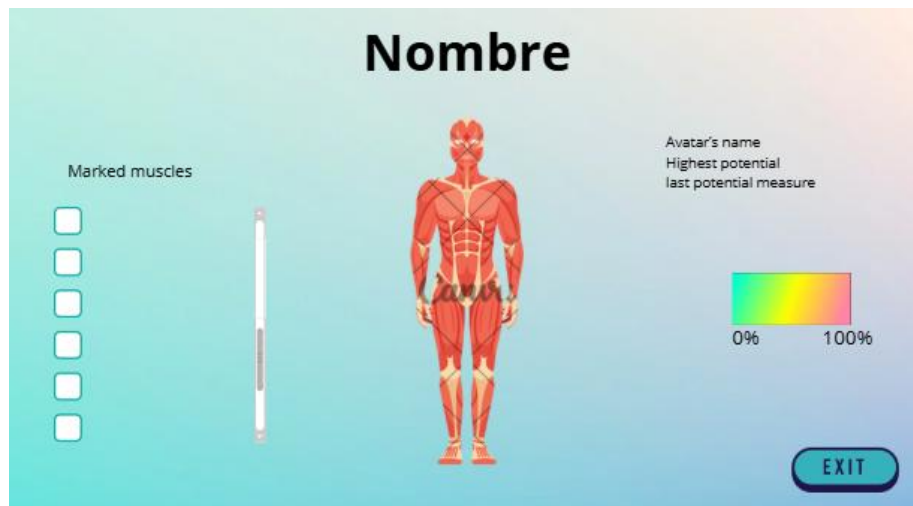


Figura 15. Prototipo escena 'Avatar Controller'. Elaboración propia.

En el caso de que el usuario quiera realizar ejercicios antes de ver la actividad muscular puede hacerlo desde la escena principal pulsando el botón de 'Calibrate'. Ese botón se encarga de cargar la escena para seleccionar los músculos a calibrar presentada en Figura 16. Prototipo escena 'Calibration'. Elaboración propia. En caso de que el usuario no quiera entrenar los músculos se tendrá en cuenta para la siguiente funcionalidad.



Figura 16. Prototipo escena 'Calibration'. Elaboración propia.

Una vez el usuario ha seleccionado los músculos a calibrar, se cargan vídeos en los que se muestran ejercicios dirigidos para imitar (véase Figura 17. Prototipo escena 'Video Calibration' I. Elaboración propia). El usuario selecciona el vídeo que desea reproducir y se reproduce con la intención de que el paciente realice los ejercicios en la medida de lo posible. Mientras se ejercita se están activando los músculos y posteriormente cuando se estudie el comportamiento musculoesquelético se tendrá una señal de mayor calidad.

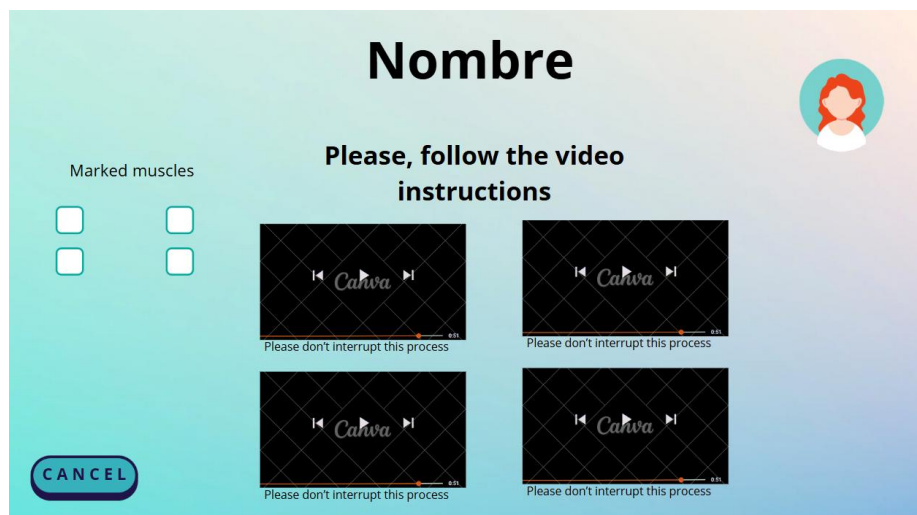


Figura 17. Prototipo escena 'Video Calibration' I. Elaboración propia

Al finalizar los procesos si se han reproducido todo los vídeos posibles se mostrará un mensaje en la escena indicando que el proceso ha sido un éxito tal y como se muestra en Figura 18. Prototipo escena 'Video Calibration' II. Elaboración propia.). La escena está compuesta en todo momento por mensajes informativos, y funcionalidades que apoyan la función principal para garantizar una experiencia sin sobrecarga de elementos o con información no relevante.

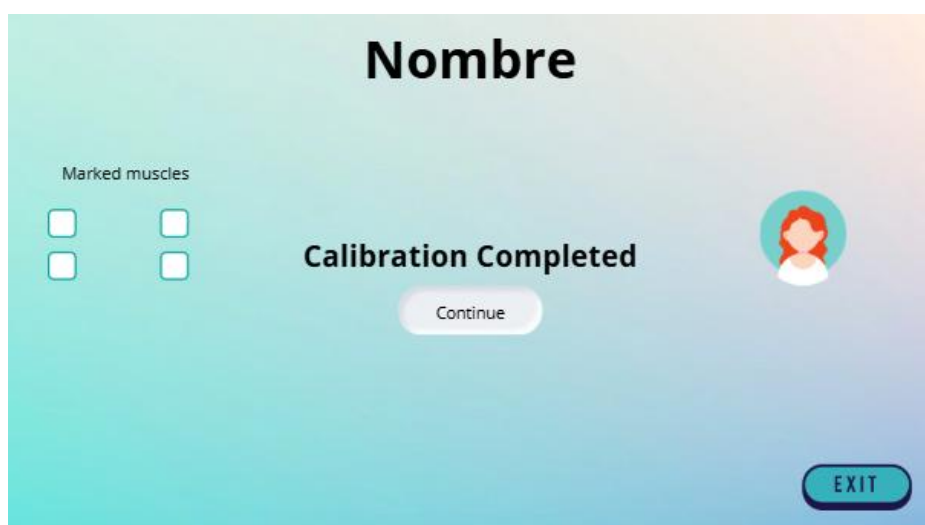


Figura 18. Prototipo escena 'Video Calibration' II. Elaboración propia.

Además de los aspectos funcionales que se han implementado se ha cuidado los detalles visuales, la interacción en la plataforma, y el control de error. El motivo principal de este diseño es guiar al usuario a lo largo del proceso y mejorar la usabilidad de la plataforma. Se han incorporado elementos visuales como el sombreado y la iluminación en botones, toggles y zonas marcables, que no solo se mejora la estética general, sino que también es un apoyo a la funcionalidad. Por ejemplo, al pasar el cursor por encima de algunos elementos interactivos, cambian de tonalidad para indicar que están activos véase la Figura 19. Prototipo escena 'Calibration' II. Elaboración propia.

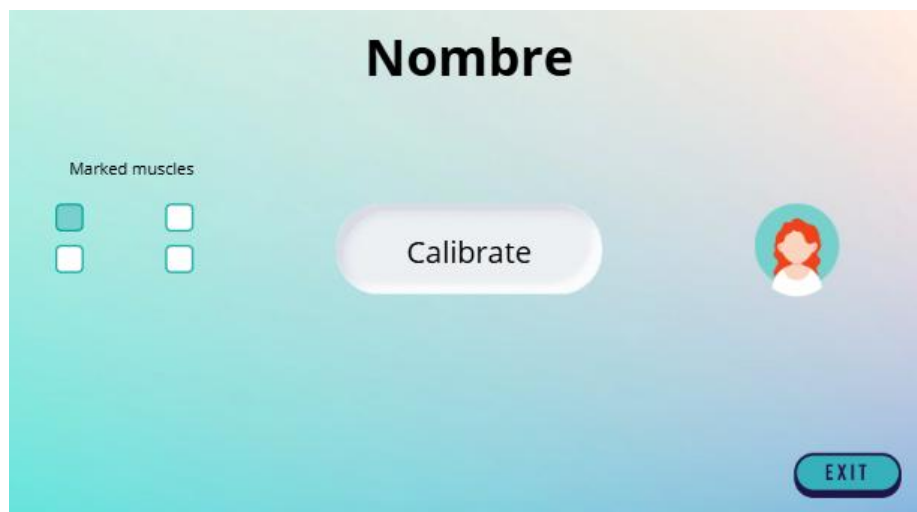


Figura 19. Prototipo escena 'Calibration' II. Elaboración propia.

Por otro lado, se han diseñado mensajes informativos para utilizarlos en la plataforma ya sea como avisos emergentes o pop-ups, informan al usuario para ayudar al buen uso de la plataforma y garantizar un control de error robusto tal y como se puede ver en Figura 20. Escena 'Calibration'- Mensaje informativo I. Elaboración propia.). Ofrecen al usuario información contextual actuando como una guía o como confirmaciones tras completar una acción correctamente.

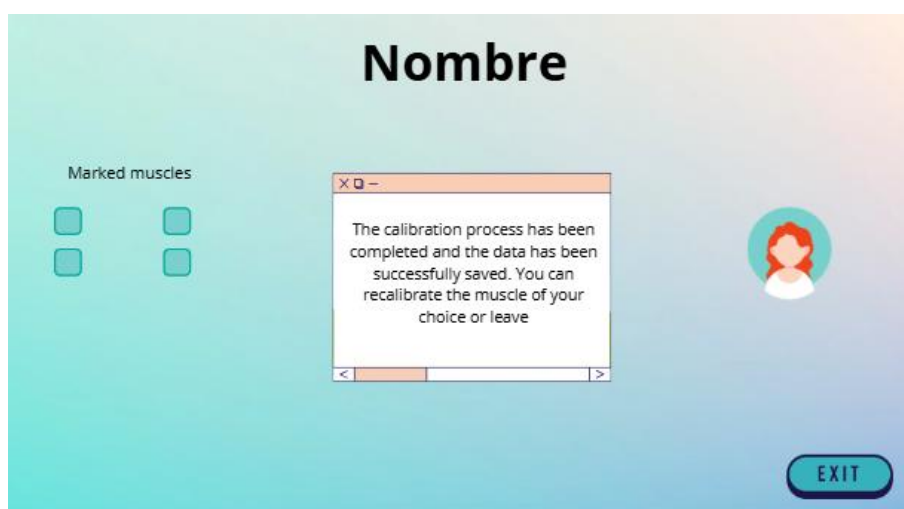


Figura 20. Escena 'Calibration' - Mensaje informativo I. Elaboración propia.

Este sistema de retroalimentación inmediata mejora la experiencia del usuario, reduce errores y hace que la plataforma desarrollada sea más accesible. Incluso se asegura de que el usuario quiera finalizar determinados procesos cómo en la Figura 21. Escena 'Calibration' - Mensaje informativo II. Elaboración propia.

Todos estos detalles en conjunto contribuyen a que la navegación sea más fluida, intuitiva y segura, además se forma la adherencia al tratamiento teniendo una plataforma sencilla y atractiva visualmente, y se aumenta la confianza del usuario durante el proceso de calibración y seguimiento.

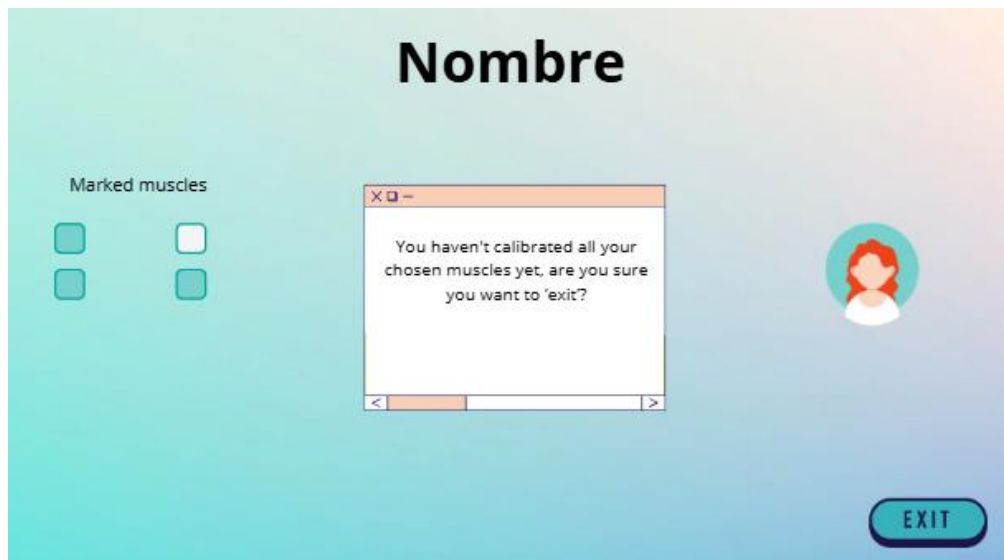


Figura 21. Escena 'Calibration' - Mensaje informativo II. Elaboración propia.

En definitiva, el diseño que se ha comentado es el que constituye el diseño base que se va a implementar mediante ciclos iterativos. Gracias a la metodología ágil se irán introduciendo mejoras de forma progresiva en función de la retroalimentación obtenida durante el proceso. De esta forma se garantiza una evolución continua del sistema. Finalmente se obtendrá una plataforma robusta, escalable, funcional y que sirva de herramienta para profesionales de la salud en el estudio de la actividad muscular.

3.3.3 Análisis de aplicación

Con el fin de contextualizar el desarrollo de la aplicación propuesta, se realiza una comparación con las soluciones existentes en el mercado que abordan necesidades similares. Hay que tener en cuenta que la oferta en el mercado de aplicaciones o plataformas que estudien la estimulación muscular para rehabilitación física, partiendo o no de referencias anatómicas, es reducida y muy variable. Tras la búsqueda los resultados han sido limitados, no hay aplicaciones realmente similares o que compartan muchas características con la propuesta desarrollada.

Por otro lado, se ha realizado una investigación sobre la aplicación de RV en terapias de rehabilitación, su uso ha sido innovador y además tienen una gran aplicabilidad en la individualización de los tratamientos. Entre sus beneficios se encuentra el aumento de la motivación haciendo los ejercicios de rehabilitación más atractivos y proporcionando más seguridad debido al control que proporciona la visualización del biofeedback de estimulación en tiempo real. Asimismo, es una herramienta que permite que la plataforma sea más accesible y eficaz, en concreto mejorando la recuperación y el rendimiento físico. (Recovery Clinic, 2023)

Después de estudiar la propuesta inicial, se ha desarrollado un diseño inicial que consistía en una animación mediante un gradiente de color del avatar personalizado, se llevó a cabo una primera versión de la idea creativa en Canva, tal y como se ha desarrollado en 3.3.2 Metodología de diseño.

Se incorporaban además los propios gradientes para ver con exactitud la estimulación en porcentaje del músculo y el color que le corresponde. Sobre esta idea principal se fue desarrollando el resto de los menús que componen la plataforma. Esta plataforma está formada por varios menús el principal que se ha descrito anteriormente, sin embargo, antes se tiene una escena en la que se define tanto el perfil de usuario como los músculos que se van a seleccionar para medir su estimulación. Una vez se ha configurado la experiencia, la plataforma ofrece la posibilidad de entrenar con el dispositivo, en la siguiente escena de los músculos seleccionados para estimular se pueden calibrar los que el usuario elija, en caso de haber músculos no calibrados, pero sí seleccionados se utilizaran los valores por defecto.

Por ello, y dado que no se han encontrado aplicaciones que integren un enfoque de rehabilitación personalizada basada en biofeedback de estimulación muscular con realidad virtual, se plantea el desarrollo de una nueva plataforma adaptada a estas necesidades específicas. Mediante la representación gráfica personalizada de la estimulación muscular, mejorando la precisión del tratamiento y aumentando la adherencia del paciente a través de la motivación que ofrece la gamificación y la visualización en tiempo real.

A continuación, en el siguiente apartado se describirá con más detalle la interfaz desarrollada y se mostrarán ejemplos visuales.

3.3.4 Interfaz de Usuario (UI) y Experiencia de Usuario (UX)

Entre los objetivos específicos del proyecto se encuentra ‘Diseño de la plataforma como representación del concepto’, esta tiene que garantizar una experiencia agradable, cómoda e intuitiva y mejorar la motivación del usuario para en consecuencia estimular la adherencia al tratamiento. Es clave elegir los elementos que van a aparecer en la interfaz para no generar distracciones en el usuario tanto como otorgar sus funcionalidades, además de determinar los aspectos visuales como los colores que van a tener estos elementos. Todas las escenas están correctamente tituladas o de lo contrario incluyen algún elemento que permite al usuario inequívocamente conocer cuál es la funcionalidad de esta e identificarlas.

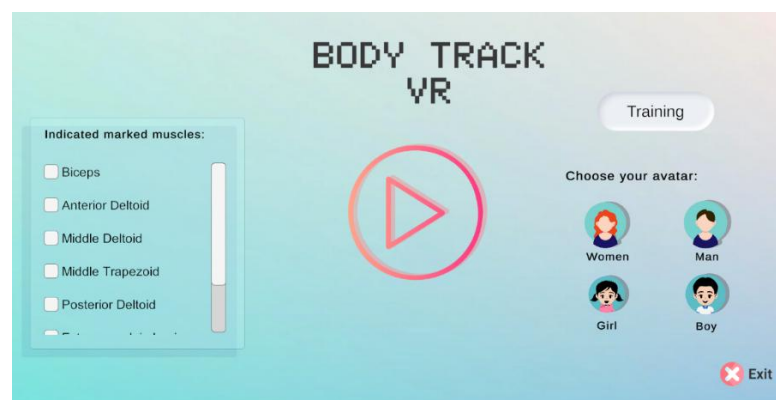


Figura 22. Escena Principal. Elaboración propia.

Cada color va a tener un efecto diferente en los usuarios, su efecto psicológico desencadena emociones y estados de ánimo. A menudo los colores tienen su propio significado en cada cultura, el rojo según la teoría del color representa amor, energía y poder por eso su mezcla con tonos más rosados ha sido el elegido para el botón de ‘Play’ que se encuentra situado en el centro de la escena principal (véase Figura 22. Escena Principal. Elaboración propia.). De esta forma el usuario siente que él tiene el control sobre la experiencia en la plataforma, y se reduce el rechazo. Por otro lado, en esta como en otras escenas el color predominante es el azul, tanto en el fondo, como en menús en los que se decide el perfil que se va a utilizar o en los músculos que se van a estimular. Se crea una base armoniosa y que ofrece confianza al usuario, este color además de representar lo comentado anteriormente también se asocia con la calma y la concentración.

Desde la psicología del color este tiene un efecto relajante y antiestrés además de reforzar la intuición por lo que también será un actor implicado en que el usuario de forma calmada pueda dirigir su experiencia. Por último, para botones se ha elegido el color blanco, entre sus significados se encuentran los nuevos comienzos, hecho simbólico que representa el paso a una nueva interfaz de la plataforma. Asimismo, se incluyen animaciones como el sombreado de los perfiles cuando el usuario está seleccionando uno, la animación de latido cardíaco en el botón de ‘Play’, o la iluminación el color azul del último *checkbox* que ha seleccionado el usuario.(véase Figura 22. Escena Principal. Elaboración propia.) (Psicología del color - El efecto de los colores, s.f.)

La estructura de la plataforma que se va a desarrollar es bastante sencilla y se presenta a continuación (véase Figura 23. Estructura de las interfaces del proyecto.), tiene cuatro interfaces: la interfaz principal donde se configura la experiencia, la escena de estimulación donde se puede ver el avatar coloreado, la escena de calibración que permite seleccionar aquellos músculos que el usuario elija, los que no sean calibrados utilizarán valores de estimulación determinados por la plataforma, y por último la escena de vídeos de calibración.

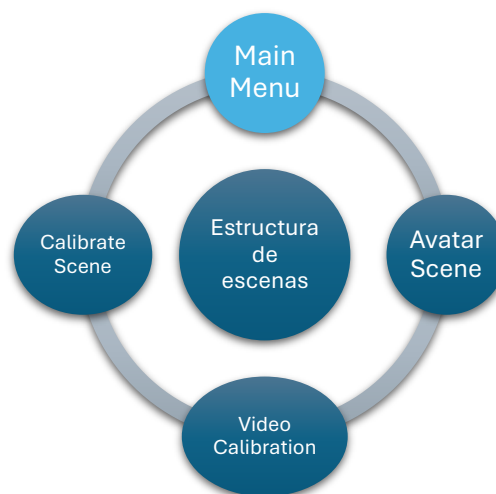


Figura 23. Estructura de las interfaces del proyecto. Elaboración propia.

Al iniciar la plataforma, la primer interfaz que aparece es la escena principal. En ella en el centro del espacio para captar la atención del usuario se encuentra el botón *Play* como se ha comentado anteriormente , que permite al usuario avanzar hacia la escena de control del avatar (*Avatar Controller*). Esta interfaz cuenta con varios menús que van a ser descritos a continuación, todos ellos con la finalidad de ayudar al usuario a configurar su experiencia: en el lateral izquierdo hay un menú que maneja la lista de músculos que se desean estimular en concreto se puede elegir entre ocho músculos de extremidad superior, por otro lado, en el lateral derecho se encuentra el menú de selección de perfil. Justo encima de este último se sitúa el botón de *Trainig*, que da acceso a la escena correspondiente, donde se podrá realizar un ajuste más detallado de los músculos seleccionados.

En la escena de estimulación muscular se mantiene el mismo estilo visual que en las interfaces anteriores, lo que ayuda a que el usuario se sienta familiarizado con el entorno. Esta escena cuenta con un menú donde se encuentran los controles para ajustar la estimulación de cada músculo. Cada control está formado por un gradiente de color y una flecha que se puede mover para indicar, en porcentaje, el nivel de estimulación de la unidad motora correspondiente. Este sistema permite comprender de forma visual y sencilla la intensidad de la estimulación.

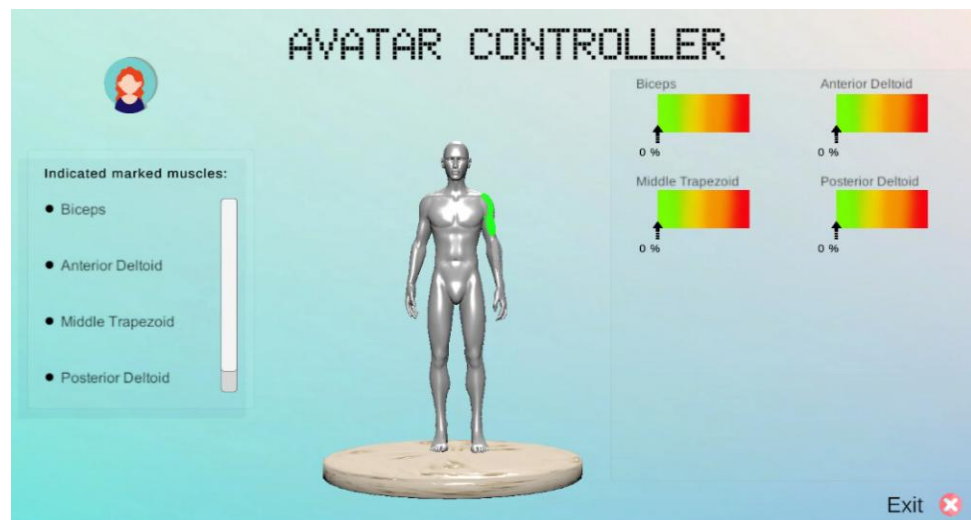


Figura 24. Escena 'Avatar Controller' I. Elaboración Propia.

Los músculos que se pueden seleccionar son pertenecientes a las extremidades superiores y están distribuidos tanto en la parte frontal como en la parte posterior del avatar. Es por eso por lo que se ha implementado la opción de rotar el avatar de la escena sobre su propio eje, además de hacer zoom dentro del visor, lo que permite observar con más detalle cada parte del cuerpo sin perder calidad de imagen. Esta funcionalidad resulta útil para comprobar con mayor precisión la zona estimulada y su respuesta visual.

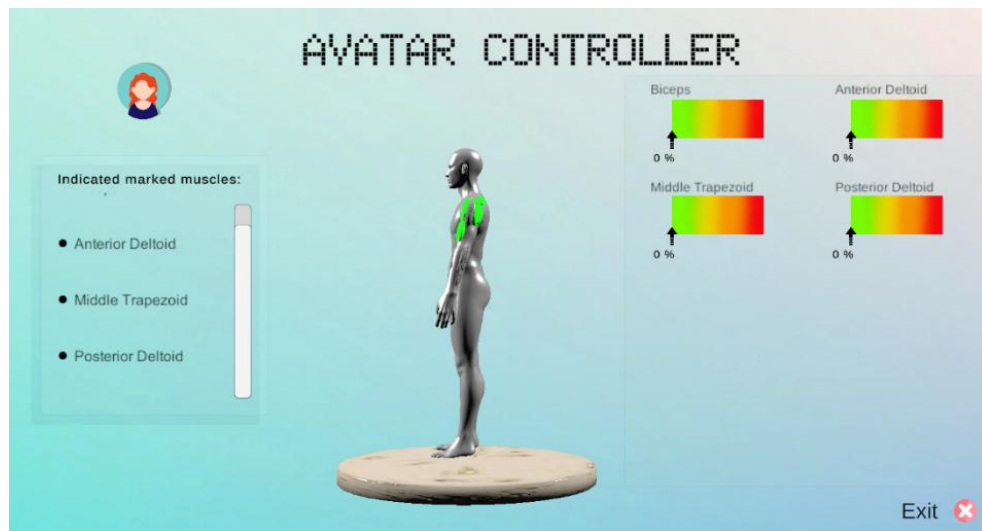


Figura 25. Escena 'Avatar Controller' II. Elaboración Propia. Elaboración propia.

Cuando se modifica el valor, el músculo asociado cambia de color en función de nivel aplicado lo que permite ver de forma más rápida y clara (tal y como se presenta en Figura 26. Representación visual de activación muscular. Vista frontal del avatar. y Figura 27 . Representación visual de activación muscular. Vista lateral del avatar), el grado de estimulación de los músculos.

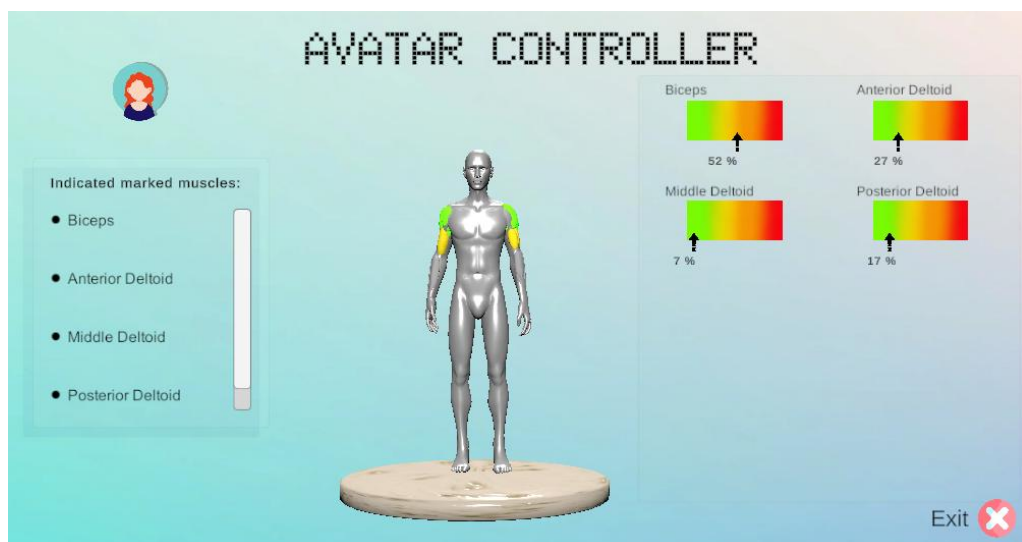


Figura 26. Representación visual de activación muscular. Vista frontal del avatar. Elaboración propia.

Durante la medición se puede desplazar el avatar como se ha comentado antes para poder ver la estimulación en tiempo real de los músculos independientemente de su posición. Este sistema sirve como una guía visual para comprobar los efectos del ajuste en tiempo real.



Figura 27 . Representación visual de activación muscular. Vista lateral del avatar. Elaboración propia.

La selección de músculos que incluye la plataforma tiene una gran variedad de tamaño por lo que puede resultar difícil estudiar los músculos más pequeños, utilizando la opción de zoom la vista que se obtiene se presenta en la siguiente figura -Figura 28. Representación visual de activación muscular. Vista ampliada del avatar. Elaboración propia -. Se puede ampliar tanto como el usuario lo desee.

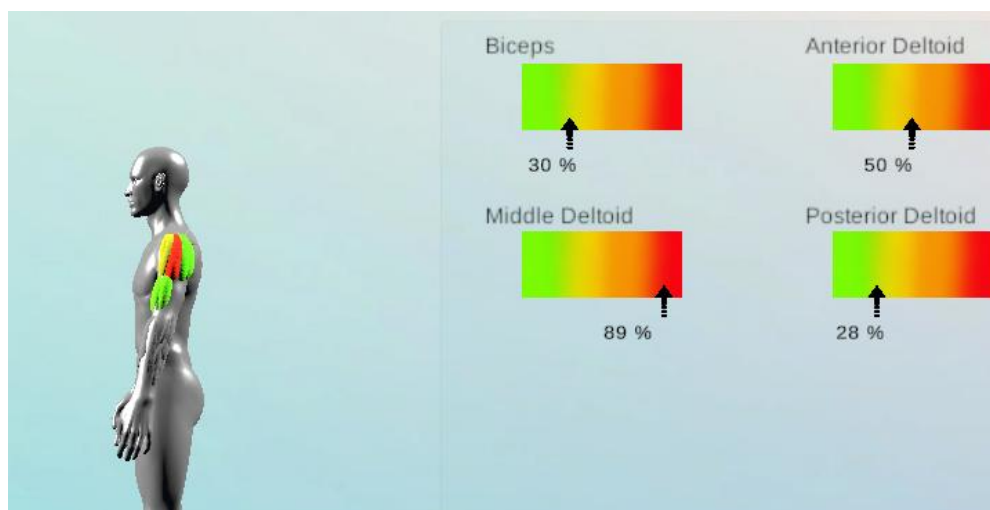


Figura 28. Representación visual de activación muscular. Vista ampliada del avatar. Elaboración propia

En cuanto a la escena de *Calibration* (véase Figura 29. Escena 'Calibration' vista inicial. Elaboración propia.) integra cuatro elementos clave para no distraer al usuario de la funcionalidad principal. En primer lugar, dispone de un menú a la izquierda donde únicamente aparecen los músculos que se ha seleccionado anteriormente para estimular, aparecen desmarcados para que el usuario finalmente decida si quiere calibrarlos dando lugar a la escena '*Video Calibration*'.

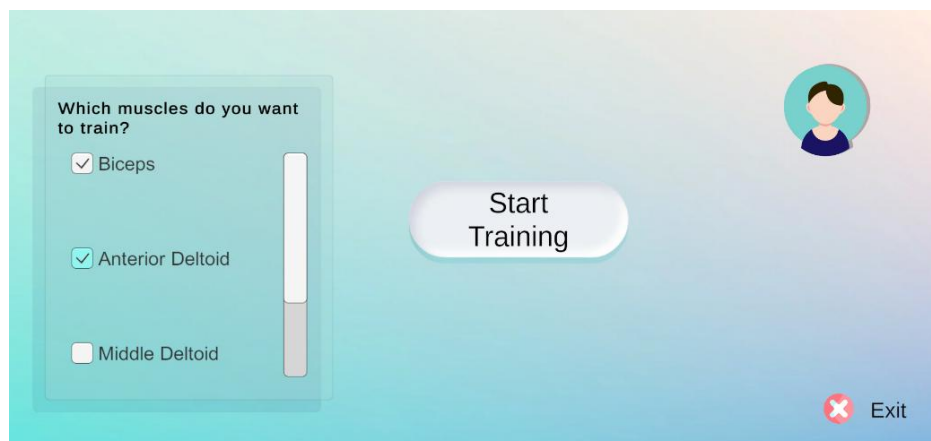


Figura 29. Escena 'Calibration' vista inicial. Elaboración propia.

Una vez el usuario ha decidido para avanzar a la siguiente escena se encuentra un botón central. Este lleva inscrito una llamada de acción para que no haya dudas en cuanto a la funcionalidad. Además, el usuario queda identificado por el avatar que ha elegido en la escena principal dando sensación de pertenencia a la plataforma. Al pulsar el botón 'Start Training' se avanza hasta Figura 30. Escena 'Video Calibration'.

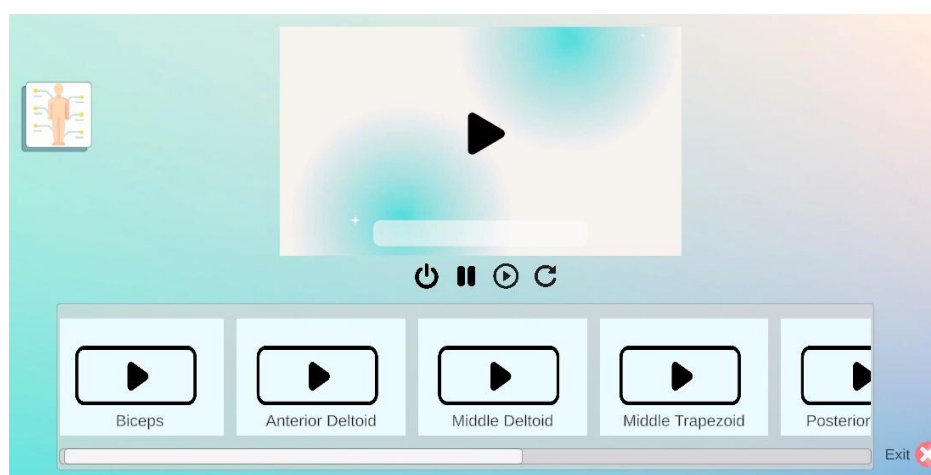


Figura 30. Escena 'Video Calibration'. Elaboración propia.

En esta escena se presentan vídeos con los que el usuario puede calibrar sus músculos para mejorar la movilidad antes de hacer el estudio sobre la actividad muscular, véase Figura 31. Escena 'Stimulation' reproducción del vídeo ejercicio guiado para estimulación del deltoides anterior En la parte inferior de la escena está localizado un panel en el que se encuentran miniaturas de los vídeos, cada una está etiquetada con el nombre de los músculos que ejercitan, las miniaturas técnicamente funcionan como botones, estarán disponibles y cuando el usuario pulse se reproducirá el video elegido en el panel principal

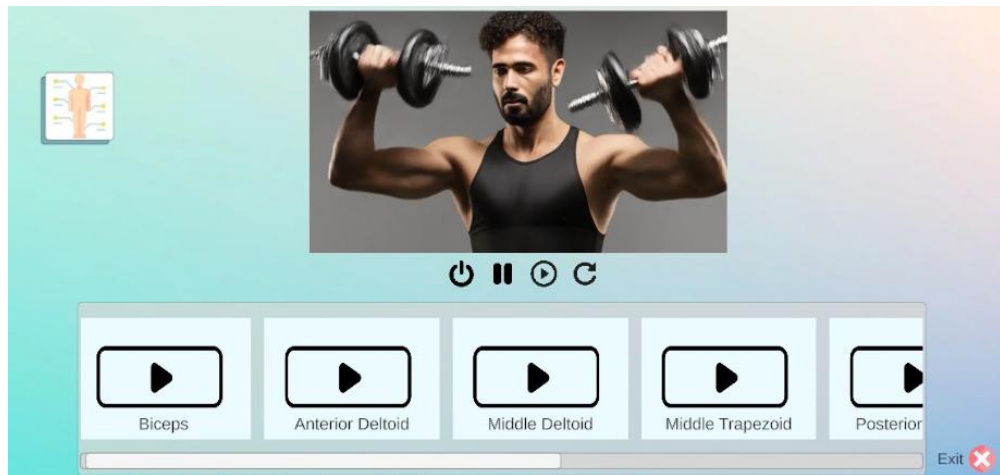


Figura 31. Escena 'Stimulation' reproducción del vídeo ejercicio guiado para estimulación del deltoides anterior

Cuando el vídeo este en el reproductor principal, el usuario puede seguir manejando el control del vídeo, tiene botones en la parte inferior que le permiten terminar el vídeo, pausarlo, reanudarlo o empezarlo de nuevo.

Además, en esta escena como en las anteriores se permite volver a la pantalla anterior para configurar de nuevo y una funcionalidad añadida. Esta última está integrada en el botón del avatar situado a la izquierda (véase Figura 30. Escena 'Video Calibration'. Elaboración propia.). El objetivo es que se pueda acceder desde esta escena a la escena de estimulación muscular, de esta forma el usuario no tiene que volver al menú principal y acceder desde este, se ofrece una alternativa para hacer la experiencia de usuario intuitiva y evitar la complejidad.

Antes de pasar a la escena de estimulación muscular, el usuario recibe un mensaje con un panel emergente informándolo de lo que va a suceder a continuación tal y como se ve en Figura 32. Escena 'Video Calibration' mensaje emergente aviso cambio de escena.. El hecho de que el usuario esté correctamente informado durante toda la experiencia le proporciona seguridad y control sobre el flujo de navegación.

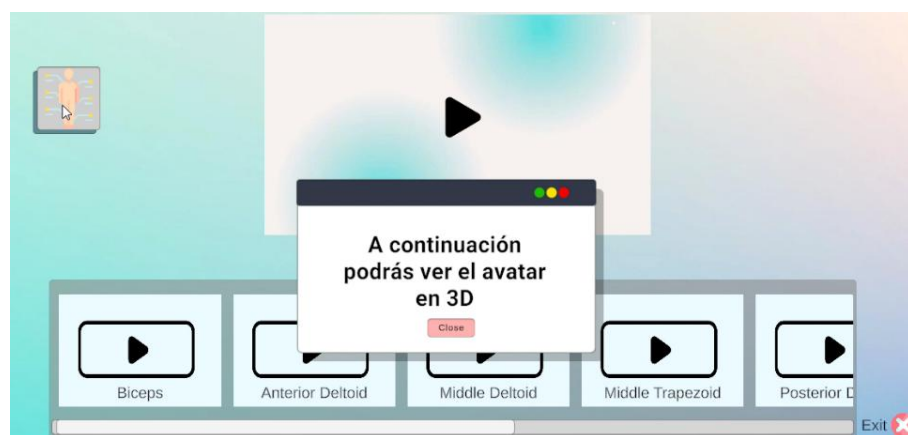


Figura 32. Escena 'Video Calibration' mensaje emergente aviso cambio de escena. Elaboración propia

La plataforma se ha diseñado para que sea ‘user friendly’, es decir, integra un diseño centrado en el usuario para mejorar la experiencia de este. Se garantiza un diseño UX que sigue los principios de usabilidad de Jacob Nielsen.

1. **Visibilidad del estado del sistema:** el usuario en todo momento está informado de lo que está pasando en nuestra web, la respuesta es casi inmediata. Por ejemplo, cuando el usuario hace click sobre un botón éste cambia su estética o si después de calibrar los músculos desea ver la actividad muscular mediante un mensaje emergente se indica que va a salir de la pantalla.
2. **Relación entre el sistema y el mundo real:** diseñando el sistema en el lenguaje natural del usuario, utilizando botones con colores intuitivos. Utilizando el símbolo X para salir o cerrar algo.
3. **Control y libertad del usuario.** La posibilidad de subsanar errores de selección o de navegación a lo largo de la plataforma ha sido un elemento integrado desde el diseño inicial incluyendo en todas las escenas botones para salir, o si el usuario seleccionaba músculos que no quería poder cambiar la selección cuando vuelve a la pantalla de selección ya que permanece la suya y puede editarla a su gusto.
4. **Consistencia y estándares.** Se siguen los convenios establecidos por ejemplo botones rojos para cerrar, amarillo para maximizar, y verde para minimizar.
5. **Prevención de errores.** Prevenir errores es mejor a tener que corregir cualquier error que haya podido cometer el usuario por eso para evitar que el usuario acceda a funcionalidades más avanzadas sin haber hecho configuraciones previas se generan mensajes emergentes (véase Figura 33. Escena principal mensaje emergente de ausencia de avatar.)

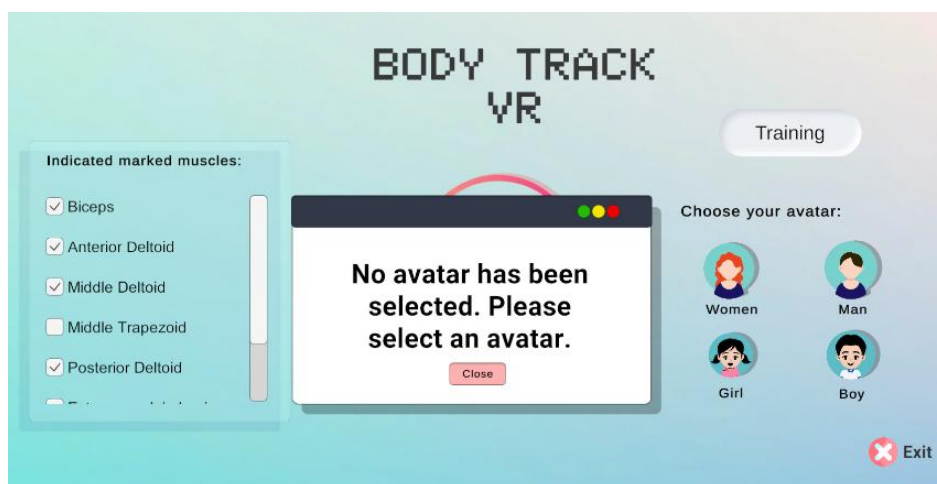


Figura 33. Escena principal mensaje emergente de ausencia de avatar. Elaboración propia

6. **Reconocer antes que recordar.** Es mejor que el usuario reconozca acciones antes que las memorice por eso el botón para el inicio es un botón de un reproductor de 'Play' el usuario lo identificará con un inicio.
7. **Flexibilidad y eficiencia de uso.** El diseño es un diseño intuitivo está preparado para todo tipo de usuario desde los novatos hasta los experimentados.
8. **Diseño estético y minimalista.** Se limita a contener información necesaria, los paneles son funcionales y no hay contenido que no aporte nada en la interfaz, es minimalista y funcional.
9. **Ayudar a los usuarios a reconocer, diagnosticar y corregir los errores.** Todos los errores se notifican con mensajes emergentes en lenguaje natural para que sean entendibles por el usuario.
10. **Ayuda y documentación.** Con estos principios se intenta que el usuario no tenga que usar documentos de ayuda se da la posibilidad de tener un pequeño manual de funcionamiento.

La accesibilidad ha sido una prioridad transversal en el diseño, asegurando que personas con distintas necesidades específicas pueden interactuar con la plataforma sin barreras. Se refleja en la simplicidad visual, la coherencia de los elementos interactivos y la inclusión de ayudas comprensibles que eliminan la necesidad de recurrir a documentos para conocer cómo funciona la plataforma. Asimismo, la estructura modular y clara de las interfaces permite al usuario avanzar paso a paso, adaptando la experiencia a su ritmo y capacidades.

En conclusión, todo este planteamiento no solo mejora la usabilidad si no que tiene un impacto directo en la adherencia al tratamiento, uno de los objetivos esenciales del proyecto. Al ofrecer una experiencia cómoda, agradable y motivadora se reduce el rechazo inicial y se potencia el compromiso del usuario con el proceso, favoreciendo su implicación activa y continua. La combinación de accesibilidad, diseño centrado en el usuario y experiencia personalizada convierte la plataforma en una herramienta eficaz y humana dentro del entorno de rehabilitación.

3.3.5 Diseño 3D y Modelado del Avatar

La representación de la actividad muscular se visualiza gracias a la presencia de un avatar humanoide que sirve como referencia visual para el usuario. Para evitar la sensación de que el avatar sea una figura independiente del entorno se ha diseñado e incorporado una plataforma base que aporta estabilidad visual a la escena. Tiene un aspecto semi-anatómico que mantiene el equilibrio entre el realismo y la simplicidad visual, se pueden intuir estructuras anatómicas sin sobrepasar el detalle. Para seguir en la línea estética de la plataforma se han mantenido colores claros tanto en la plataforma base como en el avatar.

Los músculos se han modelado de forma independiente sobre el avatar. Es decir, en los puntos anatómicos donde se encuentran los músculos que se han seleccionado, se han colocado esferas que simulan fibras musculares y se han modelado para adaptarse al cuerpo humano. Véase Figura 34. Bíceps desde cerca, apreciación de los detalles de diseño.

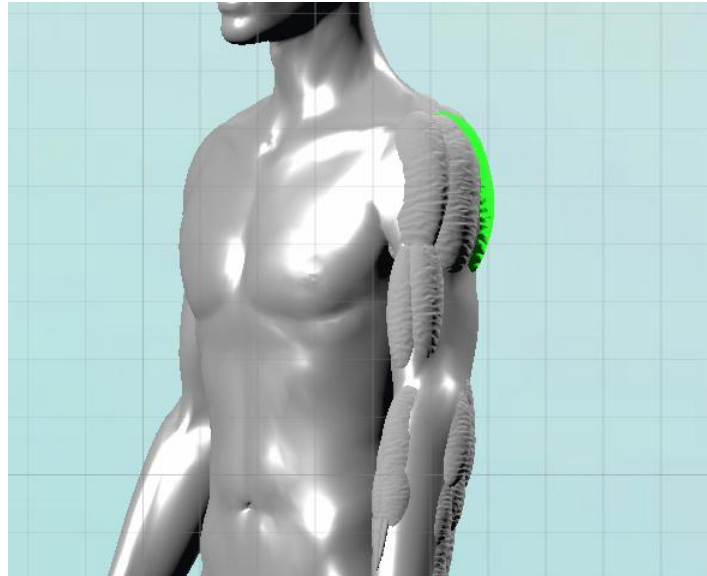


Figura 34. Bíceps desde cerca, apreciación de los detalles de diseño. Elaboración propia

El cambio es casi imperceptible si el músculo no ha sido seleccionado por parte del usuario, ya que permanecen con el mismo color que el resto del humanoide y, pese al cambio de relieve, se integran de forma sencilla. Aunque los músculos se han diseñado con un material ligeramente rugoso así se pueden diferenciarlos mínimamente de las zonas sin actividad. Las esferas que simulan las fibras musculares se han integrado cuidadosamente para que se genere un relieve que permite identificar claramente los músculos sin resultar disruptivo a la forma original.

La actividad muscular queda representada mediante la variación de colores de los músculos seleccionados por el usuario, según el porcentaje de activación muscular representado en el panel de monitorización. El color del músculo se ajustará de forma dinámica desde verde hasta rojo siendo 0% y 100% respectivamente. La obtención del color se hace mediante una función utilizando la interpolación lineal transforma el valor porcentual (el porcentaje de activación muscular) en un color RGB en formato HTML que posteriormente será convertido a base hexadecimal. En definitiva, se ha conseguido un avatar humanoide que ofrece una visualización intuitiva y coherente con el entorno, y sobre todo facilita al usuario la comprensión de la actividad muscular en tiempo real.

3.4 MECÁNICA DE LA APLICACIÓN PROPUESTA

Se describe a continuación el funcionamiento general de la aplicación, abordando desde la conexión TCP/IP con el avatar humanoide para la representación de los datos de actividad muscular obtenidos hasta configuraciones y cómo el usuario interactúa con el avatar. Además, se analiza el sistema de retroalimentación implementado, fundamental para que la experiencia esté adaptada a cada caso clínico. Teniendo presente el objetivo de mejorar la adherencia al tratamiento del paciente y ofrecer un entorno accesible para pacientes y profesionales de la salud se ofrece una visión global del recorrido del usuario dentro de la plataforma virtual.

3.4.1 Interacción con el Avatar

La interacción del avatar con el dispositivo hardware Noraxon se da de la siguiente manera. En primer lugar, se ha analizado el software facilitado por Humans Robotics este ha sido implementado para una medición de un canal, por lo que las principales tareas han sido ampliar su funcionamiento para ocho canales e integrarlo con el protocolo TCP/IP desarrollado para la propuesta. El cliente para la red se ha configurado previamente en la IP y puerto local de la máquina utilizada.

Al iniciar el software, se obtienen los datos que genera la medición del equipo Noraxon Ultium y se establece el 'Maximum Value of Contraction', se asigna el valor de forma predeterminada, y posteriormente se va accediendo a cada columna de la matriz que contiene los datos de cada músculo determinado. La asignación de cada canal a cada músculo se ha establecido de manera previa en la configuración de Noraxon.

Cada vez que el software tiene un vector de datos de estimulación muscular se convierte a valor absoluto y se realiza la media aritmética. (véase Figura 35. Obtención y procesamiento de los datos del Noraxon en MATLAB. Elaboración propia.) La electromiografía genera valores de tipo alterno con valores positivos y negativos alrededor de cero, así que tomando el valor absoluto de la señal se cuantifica la magnitud de la activación sin que los signos opuestos entre sí influyan. Además, se aplica la media aritmética sobre la ventana temporal recogida para suavizar la señal y reducir el impacto de picos instantáneos o ruidos. Luego se normaliza con *mvc* para permitir la comparación de manera estandarizada independiente de la señal cruda y finalmente convierte el dato en un valor que se encuentre en el rango $[0, 1]$ y se almacena en un vector de ocho canales, cuándo esté completo el cliente enviará el vector correspondiente al servidor TCP/IP.


```

% %Iniciar Noraxon
[stream_config, sensor_selection] = noraxon_stream_init('127.0.0.1', '9220');
tiempo=0;
command=0;
threshold=[40 40];
mvc=300;

while tiempo<=totalTime %Está en segundos

    %Recoger datos Noraxon
    data = noraxon_stream_collect(stream_config, 0.1);

    % Canal 1 - Biceps
    f_amp_1=mean(abs(data(1).samples(:)))
    normalized_1=round(f_amp_1*100/mvc)
    command_1 = normalized_1/100

    % Canal 2 - Anterior Deltoid
    f_amp_2=mean(abs(data(2).samples(:)))
    normalized_2=round(f_amp_2*100/mvc)
    command_2 = normalized_2/100

```

Figura 35. Obtención y procesamiento de los datos del Noraxon en MATLAB. Elaboración propia.

La plataforma tiene una arquitectura cliente-servidor, el cliente es el software del equipo medidor de electromiografía Noraxon y el servidor TCP está implementado en Unity. La función de inicio del servidor crea el hilo de ejecución principal, en este se implementa el bucle principal y en su interior se crea una instancia de *TCPListener* que escucha en todas las interfaces de red disponibles en la IP y en el puerto especificado. El servidor entra en un bucle controlado por una variable, esta ayuda a verificar si hay clientes pendientes de conexión, en caso de que no haya clientes esperando el hilo principal se duerme para evitar consumir recursos innecesarios y luego continúa con la siguiente iteración del bucle. Cuando hay un cliente pendiente, se acepta la conexión con y se devuelve un objeto *TcpClient* que representa al cliente conectado. De esta forma se maneja el consumo de recursos de forma responsable.

Se registra en el log que un cliente se ha conectado. Para manejar la comunicación con este cliente sin bloquear el hilo principal del servidor, se crea un nuevo hilo que ejecuta el método *HandleClient*, pasando el *TcpClient* como argumento. Se marca este hilo como un hilo de fondo, lo que garantiza que se cerrará automáticamente cuando el servidor principal termine. Finalmente, el hilo se inicia para gestionar la comunicación con el cliente de forma independiente, entonces el servidor manejará el hilo principal y el hilo de fondo que lleva a cabo la comunicación no bloqueante.

En el método *HandleClient* se gestiona la comunicación con el cliente TCP que se ha conectado. el dispositivo Noraxon. Al iniciar, se informa por consola al cliente, mientras el cliente permanezca conectado, el método intenta leer datos; si se reciben se convierten de bytes a una cadena de texto usando la codificación ASCII. El mensaje se encola de modo que el hilo principal de Unity procese el mensaje más adelante de forma segura. Después de recibir el mensaje, el servidor envía una respuesta al cliente confirmando la recepción con el mismo stream y codificación. Si ocurre alguna excepción durante la comunicación, se captura el error, se muestra en la consola y se rompe

el bucle, cerrando la conexión con el cliente. Finalmente, cuando el cliente se desconecta u ocurre un error, se cierra la conexión y se informa en la consola que el cliente se ha desconectado.

Además de forma paralela en el script de código donde se implementa el servidor TCP en Unity, hay un método que actualiza la escena con cada *frame*, en él se procesan los mensajes recibidos y almacenados en la cola de mensajes. Después mediante un bucle se extraen los mensajes de forma segura y eficiente incluso si se añaden a la vez mensajes. El mensaje extraído se procesa con un método específico para ello, en este procesamiento se convierte la cadena recibida en un vector de ocho valores. Este método valida que el formato sea correcto y que cada valor esté dentro del rango esperado. Si el procesamiento es exitoso y existe una instancia válida de '*AvatarMain*', que es el script de código que maneja la lógica de la escena donde se gestiona la representación de la actividad muscular, se llama al método que actualiza visualmente la activación de los músculos en la interfaz del avatar, usando los valores recibidos. Así, el código asegura que los datos transmitidos por el cliente TCP se reflejen en tiempo real en el avatar dentro de Unity.

Los detalles del código se especifican en 3.5.2 Estructura de scripts y programación. Este método actualiza representa visualmente la activación de diferentes músculos en la interfaz de usuario de Unity. Recibe como parámetro los datos de la estimulación muscular cada uno representa el nivel de activación de un músculo específico. En primer lugar, busca los '*prefabs*' que se crean de forma dinámica según la selección de músculos que haya hecho el usuario en la escena principal. Los *prefabs* son objetos de Unity en los que se especifica el músculo del que van a representar la actividad muscular y también el valor de esta en porcentaje ubicándolo en la imagen del gradiente de color para tener de forma específica el color que representa ese valor y que habrá adoptado el músculo en concreto. Dado que cada canal va a representar un valor del porcentaje de activación se asocia cada uno de ellos con un músculo, después se recorre la lista de objetos asociados a los músculos activados por el avatar y si el músculo ha sido seleccionado (tendrá un objeto etiquetado en la lista) se actualiza el valor de este objeto al valor del canal del vector de datos.

En conclusión, esta arquitectura basada en el modelo cliente-servidor y en el uso del protocolo TCP/IP permite una comunicación robusta, segura y en tiempo real entre el software de medición de electromiografía Noraxon y el entorno de Unity. TCP/IP garantiza la fiabilidad en la transmisión de los datos a través de la red, asegurando que los mensajes lleguen completos y en el orden correcto, lo cual es esencial para reflejar con precisión la activación muscular en el avatar. Gracias a este enfoque, se logra una integración efectiva entre el dispositivo físico y la representación visual en el avatar humanoide.

3.4.2 Opciones y Configuraciones

Aunque el sistema actual incorpora una personalización básica, constituye una base sólida a hacia una experiencia más adaptada a las necesidades del usuario. En la versión inicial, el usuario puede elegir un icono representativo para su perfil, favoreciendo el reconocimiento dentro la propia aplicación. Además, en otro menú situado en la escena principal se permite elegir los músculos que se van a estimular y más adelante se ofrece la posibilidad de calibrarlos obteniendo valores de estimulación más precisos e individualizados en cada sesión de rehabilitación. La lista de músculos es la siguiente:

- Bíceps
- Deltoides Anterior
- Deltoides Medio
- Trapecio Medio
- Deltoides Posterior
- Extensor del calpo ulnar
- Bracorradial
- Extensor digitorium

Estas opciones de configuración pueden parecer limitadas, pero, aun así, ofrecen al usuario tener un control inicial sobre la experiencia de uso y sientan las bases para futuras ampliaciones. Se introduce la lógica de individualización mediante la posibilidad de seleccionar los músculos específicos, hecho que resulta especialmente útil en rehabilitación personalizada o entrenamiento dirigido.

La proyección de futuro del proyecto tiene hitos específicos para la personalización de la plataforma en concreto incorporando perfiles más detallados que incluyan más información sobre el usuario, opciones de configuración avanzada (como el cambio del idioma) y mayor grado de personalización visual.

3.4.3 Navegación en la interfaz

La navegación por la interfaz del usuario tiene que ser sencilla e intuitiva, además de evitar en todo momento elementos que fueran distracciones. La plataforma consta de cuatro escenas:

1. Escena principal: es la escena de inicio y permite al usuario avanzar entre escenas, pero también salir de la plataforma mediante un botón.
2. Escena ‘Avatar Controller’, en ella se visualiza la retroalimentación de la estimulación muscular.
3. Escena ‘Calibration’, ofrece la posibilidad de entrenar los músculos, está es únicamente de selección.

4. Escena ‘Video Calibration’ se presentan distintos vídeos con los que el usuario puede realizar la calibración.

A continuación, se detalla las funcionalidades de cada una de ellas. La primera interfaz es la que se muestra en la imagen Figura 36. Escena principal con selección. I. Elaboración propia, está compuesta por un varios paneles: a la izquierda de la interfaz se encuentra el panel de selección de músculos mientras que, a la derecha, en concreto en la parte superior un botón que permite avanzar a la escena ‘Calibration’ para seleccionar los músculos que se desean calibrar, justo debajo del botón el usuario encuentra un panel donde seleccionará el perfil que prefiere. El usuario también en este lado de la escena, pero en la parte inferior un apartado para elegir el avatar seleccionado y por último en botón de ‘Play’.

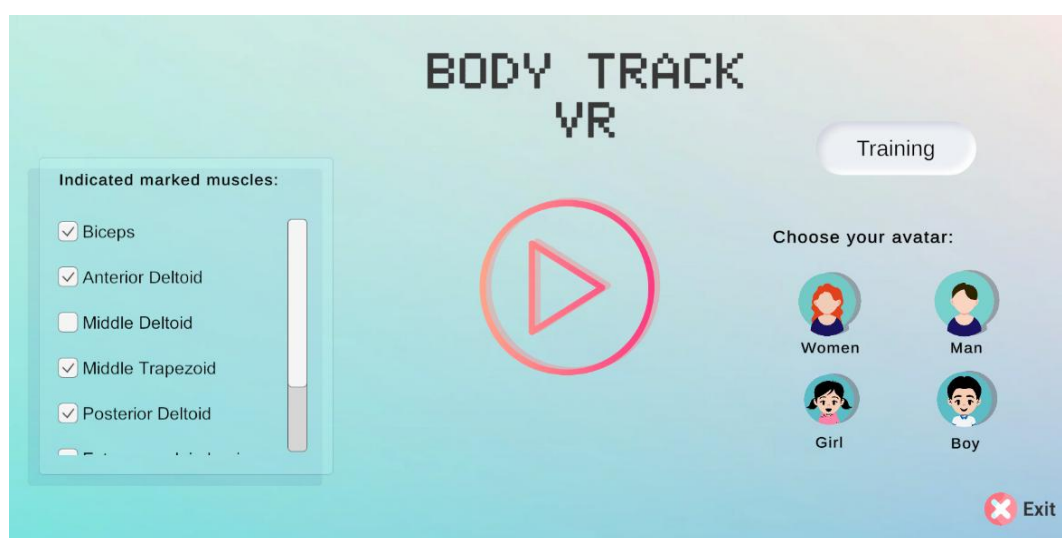


Figura 36. Escena principal con selección. I. Elaboración propia

El orden de selección queda a decisión del usuario, sin embargo, para avanzar a las siguientes escenas es necesario que haya algún músculo y un perfil seleccionados (véase imagen Figura 37. Escena Principal con selección. II. Elaboración propia), en caso de no hacer la configuración correctamente, es decir, que falten elementos como el avatar o que no se hayan seleccionado músculos se advierte con un cuadro de diálogo, indicando explícitamente qué elemento es el que falta. Después de estas configuraciones iniciales el usuario tiene dos opciones, pulsar el botón de ‘Play’ lo que le llevarían a la escena en la que se ve la representación por gradiente de la estimulación de los músculos en el avatar, o mediante el botón ‘Calibrate’ avanzar a la escena de calibración de los músculos.

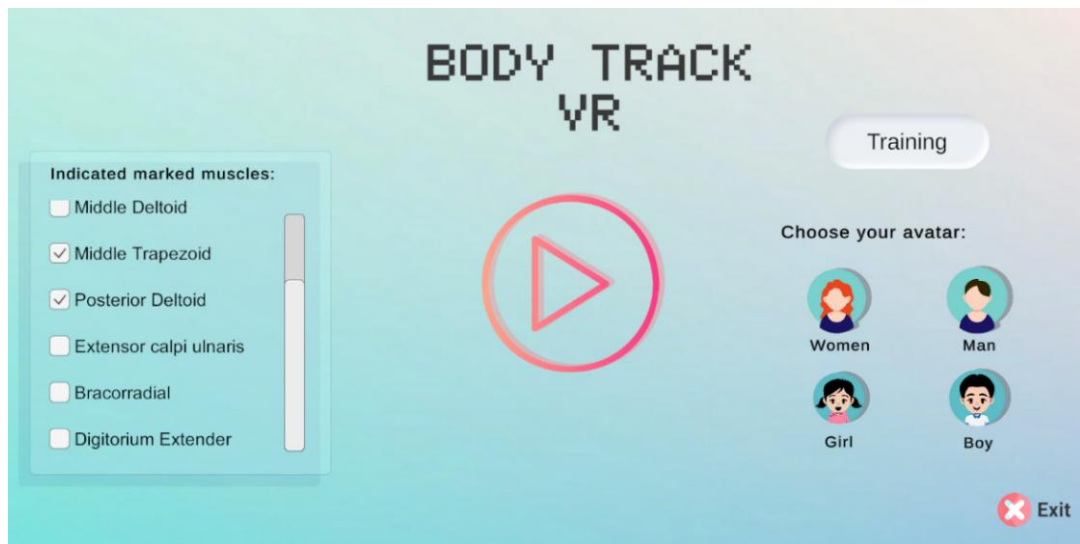


Figura 37. Escena Principal con selección. II. Elaboración propia

Si usuario ha decidido no calibrar la selección de músculos proporcionada a la plataforma, los valores recibidos pueden no ser del todo característicos de su actividad muscular sin embargo reflejaran la realidad de la estimulación de un músculo sin actividad de preentreno. En esta interfaz el punto de atención se establece en el avatar, el avatar tiene unas figuras geométricas que representan la musculatura que se va a estimular según el porcentaje de activación muscular (representado a la derecha en los paneles individuales de representación muscular véase Figura 38. Escena Avatar Controller, avatar en posición inicial. Elaboración propia.) tiene un color u otro, incluso para expresar mayor precisión en el panel de monitorización de la estimulación se indica numéricamente. De un golpe de vista se visualiza toda la estimulación de los músculos que se están tratando. Además, el avatar se puede rotar sobre su eje Y, lo que permite al usuario ver fácilmente tanto la parte frontal como la trasera del cuerpo con un solo click. (véase Figura 39. Escena Avatar Controller, avatar girado 90 grados. Elaboración propia)

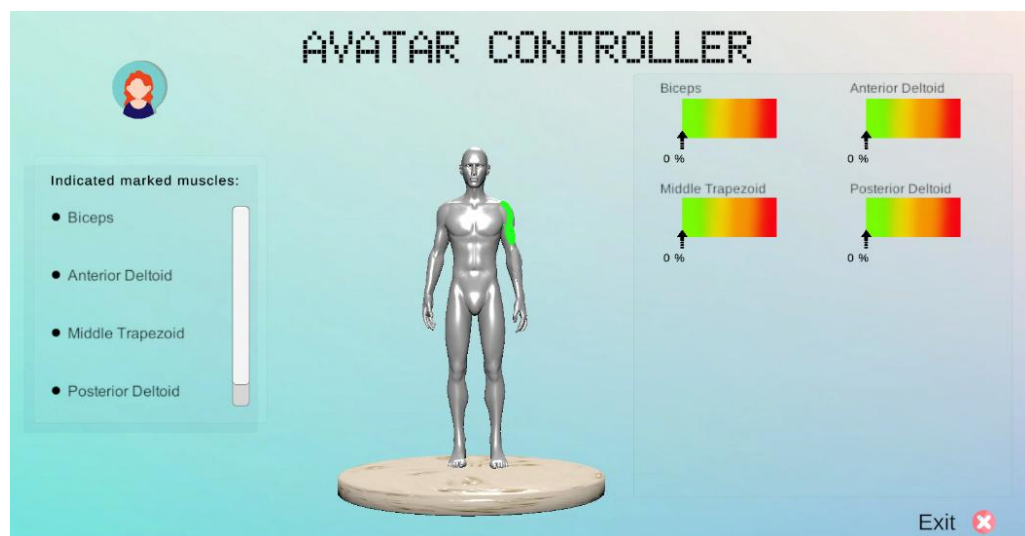


Figura 38. Escena Avatar Controller, avatar en posición inicial. Elaboración propia.

Esta funcionalidad es especialmente útil cuando el músculo que se va a estudiar es de difícil acceso o cuándo está ubicado en zonas opuestas a las visualizadas inicialmente como es el caso de deltoides posterior, puede dificultar el trabajo al personal sanitario.



Figura 39. Escena Avatar Controller, avatar girado 90 grados. Elaboración propia

Pero no sólo se ha mejorado la movilidad del avatar tambien se ha pensado en el acceso más detallado a los músculos, por su pequeño tamaño o por ser complicados de ver. Con el fin de abordar este problema se incorporado la función de zoom, que permite acercar o alejar la vista del avatar usando el ratón, facilitando así una observación más precisa y cómoda. En el caso de que el usuario con la selección mostrada anteriormente en Figura 39. Escena Avatar Controller, avatar girado 90 grados. Elaboración propia quisiera acercar el avatar su visualización sería posible ya que tanto el movimiento del avatar como el zoom son combinables tal y como se muestra en Figura 40. Brazo izquierdo del avatar humanoide girado y visto de cerca.

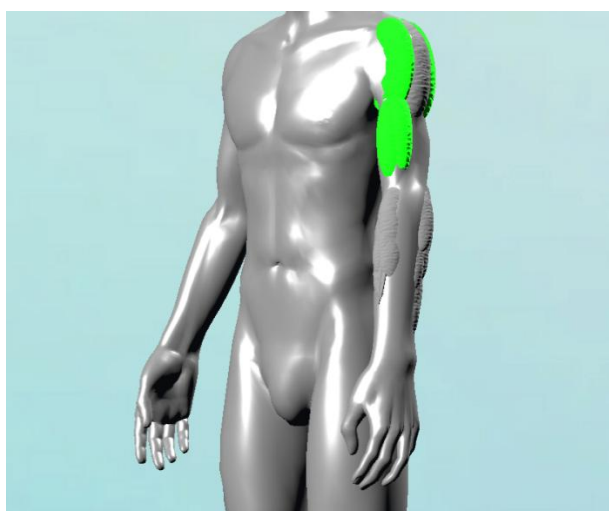


Figura 40. Brazo izquierdo del avatar humanoide girado y visto de cerca. Elaboración propia.

La otra posibilidad comentada anteriormente es que la elección del usuario incluya la calibración de los músculos antes de visualizar la estimulación muscular en el avatar. Si es la opción elegida se mostrará una interfaz sencilla (véase Figura 29. Escena 'Calibration' vista inicial. Elaboración propia.) compuesta únicamente por el perfil que se ha seleccionado y un panel para marcar los músculos que se van a calibrar. No es necesario calibrar todos los músculos seleccionados para estimular únicamente se tendrá en cuenta los valores medidos para los músculos elegidos por eso a la izquierda se presenta un panel dónde el usuario puede hacer su selección. Al acabarla el usuario pulsará el botón de '*Start Training*' y dará paso a la escena donde se encuentra un reproductor de distintos vídeos según sean la selección para la calibración mostrando ejercicios orientativos. Estos ejercicios ayudan al usuario a realizar movimientos guiados que permitan tener los datos buscados.

Una vez decidido si se van a calibrar algunos músculos, todos o ninguno el usuario mediante el botón '*Start Training*' da lugar a una interfaz con vídeos para guiar al usuario sobre los movimientos que tiene que hacer. Esta interfaz es la que se presenta en la Figura 30. Escena 'Video Calibration'. , lo más significativo es el reproductor de vídeos principal, justo debajo en el panel se encuentran todas las miniaturas correspondientes de los vídeos.

El usuario una vez ha elegido el vídeo, puede pararlo, reproducirlo desde el principio, pasar al siguiente vídeo, o terminarlo, todo ello desde los botones que se encuentren inmediatamente debajo (véase Figura 41. Escena 'Video Calibration'. Reproductor de vídeos principal. Elaboración Propia.). De esta forma el usuario tiene el control de la reproducción en todo momento.

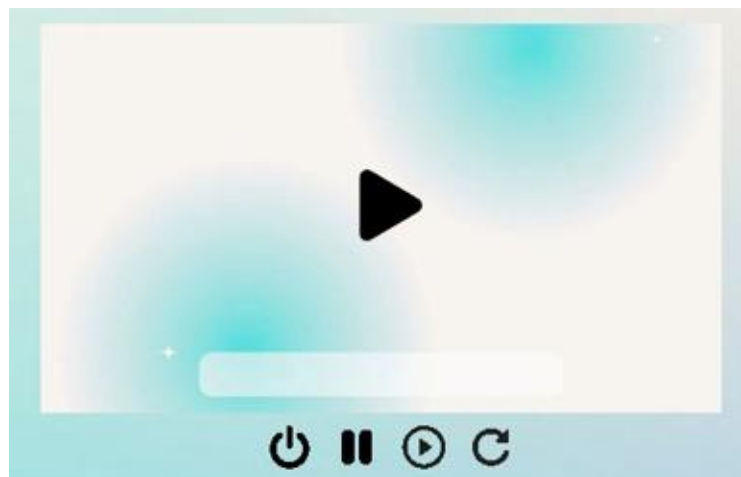


Figura 41. Escena 'Video Calibration'. Reproductor de vídeos principal. Elaboración Propia.

Además, en esta escena con el fin de cumplir con algunos estándares de usabilidad, se ha incluido un botón que lleva al usuario a la escena de visualización del avatar (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) , el usuario puede acceder a la funcionalidad principal en menos de dos clics desde la interfaz en que se encuentra. Antes que cambiar de escena se avisa al usuario mediante

un mensaje emergente visible en Figura 32. Escena 'Video Calibration' mensaje emergente aviso cambio de escena. Elaboración propia.

Por otro lado, en todas las pantallas se incluye un botón de salir, así se evitar el hecho de que el usuario se quede atrapado en una escena, incluso en la pantalla principal, pero este en concreto no te lleva a la pantalla anterior si no que termina el programa.

En definitiva, la navegación del usuario por la interfaz es bastante intuitiva, además la plataforma ha sido diseñada de modo que otorga al usuario libertad de movimiento en la plataforma e impide que el usuario se quede atrapado. La estructura técnica de la navegación se explica en más detalle en 3.5.1. y a continuación se presenta un diagrama resumen de las funcionalidades.

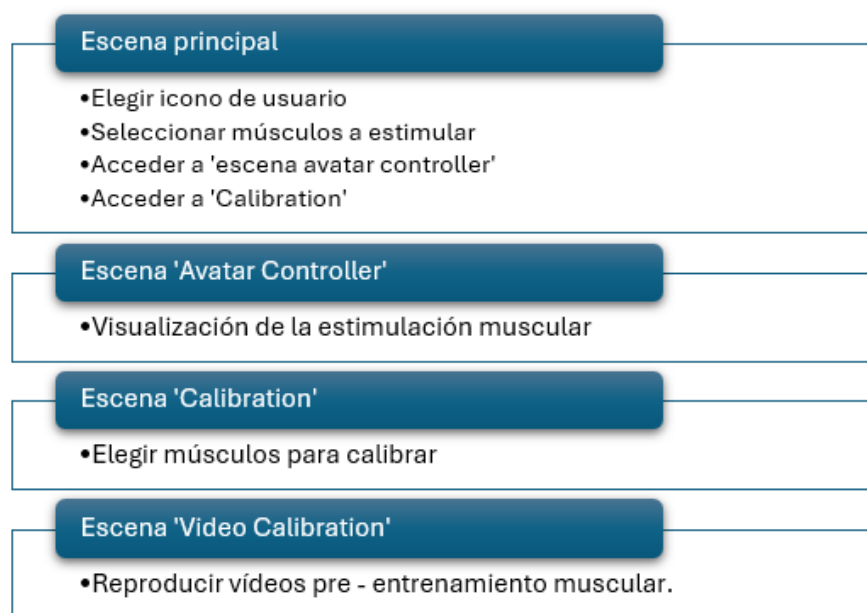


Figura 42. Diagrama resumen de las funcionalidades de la plataforma. Elaboración Propia.

3.4.4 Sistema de retroalimentación

La plataforma desarrollada tiene como objetivo principal ser una herramienta para visualizar la actividad muscular medida con los sensores de electromiografía. Esta representación tiene hacer que el usuario comprenda de forma clara la actividad muscular que se está registrando, se implementa en el avatar humanoide y se puede apreciar un cambio de color en función del nivel de activación muscular. Cada uno de los músculos seleccionados se asocian a un sensor de EMG del equipo Noraxon, su estado se representa de forma gradual tomando estos tres puntos de referencia:

1. **Verde:** activación baja (0-30%), se refiere a una intensidad de contracción del 30% de su capacidad máxima, está asociado a calentamiento de un grupo muscular específico o entrenamiento de activación.

2. **Amarillo:** activación media (30% - 60%), ciertamente en los valores superior adquiere una tonalidad anaranjada, es características de músculos que previamente activados están comenzando a generar fuerza o movimiento.
3. **Rojo:** activación alta (60% - 100%) en los valores superiores tiene un carácter más rosáceo para indicar que es la máxima activación a la que el músculo se puede someter. Esta activación es características de un entrenamiento de alta intensidad en el que todas las fibras musculares están siendo estimuladas durante la realización de una actividad física.

El cambio de colores se da de forma gradual y para lograr que sea progresivo mediante la interpolación lineal, se calcula un punto intermedio entre dos valores, tomando como valores el código RGB del color verde y rojo, en proporción directa al porcentaje de activación. Es una forma matemáticamente simple y directa, además es una función continua por lo que es ideal para representar variables fisiológicas que no cambian de forma abrupta.

Asimismo, se tiene una percepción clara del concepto que se está representando, tomando el color verde para los músculos que no presentan estimulación muscular, rojo para los que presentan una estimulación muscular muy alta y gris para aquellos músculos que están desactivados. La utilización de la interpolación frente a otras técnicas como el uso de una curva exponencial, una tabla de colores fijas o una interpolación con más puntos sigue siendo la opción que menos saltos perceptivos va a crear, y más clara visualmente.

3.5 ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN PROPUESTA

A continuación, se describe la organización interna de la aplicación desarrollada en detalle, sus escenas y la lógica que se ha implementado para el dinamismo de la plataforma. Esta estructura ha sido diseñada para garantizar una navegación intuitiva, facilitar el mantenimiento del código y asegurar la escalabilidad del sistema.

3.5.1 Estructura de escenas en Unity

La plataforma está compuesta por cuatro escenas: escena principal, escena 'Calibration', escena 'Avatar Controller' y escena 'Video Calibration'.

- **Escena principal:** esta es la escena principal, aparece al inicial la plataforma y ofrece al usuario distintas opciones y configuraciones para iniciar la experiencia. El objetivo principal es la selección de músculos a medir, el acceso a la calibración de los músculos seleccionados y al avatar de representación de actividad muscular. Los elementos fundamentales de esta escena son los botones 'Training' y 'Play' para cambiar a las escenas correspondientes y el panel de selección de músculos.

- **Escena ‘Calibration’:** El elemento fundamental de esta escena es el panel que se genera de forma dinámica en función de la selección previa. Permite un ajuste adecuado mostrando sólo los músculos seleccionados y ofreciendo la posibilidad de seleccionar los que el usuario desee.
- **Escena ‘Avatar Controller’:** Esta escena es la que integra la funcionalidad principal de la propuesta, en ella se encuentra el avatar humanoide 3D sobre el que se lleva a cabo la representación visual de la actividad muscular en tiempo real. Integra cámaras para poder visualizar el avatar de forma ampliada y rotarlo sobre su propio eje. Además de capturar las señales electromiográficas del dispositivo Noraxon e integrarlas en el avatar. Los elementos que integran la escena se han comentado anteriormente en 3.3.4 Interfaz de Usuario (UI) y Experiencia de Usuario (UX).
- **Escena ‘Video Calibration’.** Esta es la última escena de las que componen la propuesta, incorpora un menú horizontal en el que se encuentran todas las miniaturas de los vídeos para entrenar que integra la plataforma. El usuario selecciona el que desea y este se reproduce en el reproductor principal, integra un control de la reproducción del vídeo y la posibilidad de pasar directamente a la escena donde visualizar la estimulación muscular en el avatar.

La propuesta es una plataforma robusta, las instancias de las escenas se instancia al inicio y persiste entre escenas utilizando patrones singleton. Estos objetos centralizan la gestión de elementos clave durante toda la ejecución, evitando que se destruyan al cambiar de escena. En la escena principal se integra e inicia el servidor TCP encargado de la recepción de datos externos, mientras que en la escena *AvatarMain* se implementa la lógica encargada de coordinar los datos recibidos con la representación visual. Esta arquitectura permite mantener la coherencia de la información y asegurar la comunicación continua entre módulos, independientemente de la escena activa, que se verá más en detalle en el siguiente apartado.

3.5.2 Estructura de scripts y programación

La lógica del funcionamiento de la aplicación se va a comentar a continuación. Para su implementación ha sido imprescindible el uso de scripts en #C, los cuales han permitido la creación dinámica de objetos, la integración del servidor TCP, la gestión del cambio de escenas y la creación de elementos interactivos como ventanas emergentes con avisos o selecciones basadas en otras configuraciones entre otras.

1. Networking y gestión de hilos.

La recepción de datos de activación muscular se gestiona mediante un script #C en el que se lanza un `TCPListener` para mantener una conexión activa con el cliente EMG. (véase Figura 43. Servidor TCP. Elaboración propia.)

```

private void StartServer()
{
    if (isRunning) return;
    isRunning = true; //comprobacion estado servidor
    serverThread = new Thread(() =>
    {
        try {
            server = new TcpListener(IPAddress.Any, port); // Crea un nuevo TcpListener en el puerto especificado
            server.Start();
            Debug.Log("Servidor TCP iniciado en el puerto " + port);
            while (isRunning)
            {
                if (!server.Pending())
                {
                    Thread.Sleep(100);
                    continue;
                }
                TcpClient client = server.AcceptTcpClient();
                Debug.Log("Cliente conectado");
                Thread clientThread = new Thread(() => HandleClient(client));
                clientThread.IsBackground = true; // Asegura que el hilo de cliente se cierra.
                clientThread.Start();
            }
        }
        catch (Exception e)
        {
            Debug.LogError("Error en el servidor TCP: " + e.Message);
        }
    });
    serverThread.IsBackground = true;
    serverThread.Start();
}

```

Figura 43. Servidor TCP. Elaboración propia.

Los datos recibidos son vectores tipo ASCII compuestos por ocho valores *float* separados por comas, estos se almacenan en una cola concurrente (véase Figura 44. Recepción de datos por parte del cliente (equipo EMG Noraxon). Elaboración propia.). Los valores estarán siendo encolados y recibidos independientemente de que el usuario esté o no presente en la escena del Avatar, no se detiene la recepción en ningún momento para no obstaculizar el flujo de la plataforma.

```

while (client.Connected){
    try{
        if ((bytesRead = stream.Read(buffer, 0, buffer.Length)) != 0)
        {
            string data = Encoding.ASCII.GetString(buffer, 0, bytesRead);
            receivedMessages.Enqueue(data); // <-- Meter en la cola
            Debug.Log("Mensaje recibido y encolado: " + data);

            byte[] response = Encoding.ASCII.GetBytes("Recibido: " + data);
            stream.Write(response, 0, response.Length);
        }
    }
    catch (Exception e)
    {
        Debug.LogError("Error en la conexión con el cliente: " + e.Message);
        break;
    }
}

```

Figura 44. Recepción de datos por parte del cliente (equipo EMG Noraxon). Elaboración propia.

Durante la actualización del sistema, que se lleva a cabo en cada *frame*, se extraen, se parsean a un array de flotantes mediante el método *ProcessData* y se envían al controlador principal del

avatar AvatarMain.cs para que se encargue de la representación visual según el dato recibido. Es un procesamiento sencillo pero que facilita la labor del controlador del avatar teniendo prácticamente los datos listos para ser representados además facilita la detección de errores.

```
void Update(){
    // Procesar mensajes recibidos
    while (receivedMessages.TryDequeue(out string message))
    {
        Debug.Log("Mensaje recibido: " + message);
        float[] channelValues = ProcessData(message);
        if (channelValues != null && AvatarMain.Instance != null)
        {
            AvatarMain.Instance.UpdateMuscleActivation(channelValues);
        }
    }
}
```

Figura 45. Procesamiento de mensajes recibidos y envío al controlador del Avatar. Elaboración Propia.

2. Control del avatar humanoide e interfaz de usuario.

El control del avatar humanoide como se ha avanzado antes se lleva a cabo mediante un patrón singleton y es el punto de entrada dónde se gestiona la lógica del avatar. Cuando desde el servidor que han recibido los datos se llama al método *UpdateMuscleActivation* tal y como se puede ver en la Figura 45. Procesamiento de mensajes recibidos y envío al controlador del Avatar. Elaboración Propia. , se buscan los objetos que tienen la variación de color que corresponde al valor de la actividad muscular y el propio valor. Desde su creación dinámica se etiquetan como *MuscleActivationPrefabs* para que su identificación sea lo más efectiva posible. Después se itera sobre cada uno de estos objetos y si existe en la selección del usuario, el porcentaje de activación del gradiente pasa a ser el dato recibido (véase Figura 46. Actualización porcentaje activación del objeto gradiente.)

```
public void UpdateMuscleActivation(float[] channelValues)
{
    GameObject[] musclesPrefabs = GameObject.FindGameObjectsWithTag("MuscleActivationPrefab");
    for (int i = 0; i < musclesPrefabs.Length; i++)
    {
        GameObject musclePrefab = musclesPrefabs[i];
        Text muscleName = musclePrefab.GetComponentInChildren<Text>();
        MuscleActivationProgress muscleActivation = musclePrefab.GetComponent<MuscleActivationProgress>();

        switch (muscleName.text){
            case "Biceps":
                muscleActivation.SetActivationPercentage(channelValues[0]);
                break;
            case "Anterior Deltoid":
                muscleActivation.SetActivationPercentage(channelValues[1]);
                break;
            case "Middle Deltoid":
                muscleActivation.SetActivationPercentage(channelValues[2]);
                break;
            case "Middle Trapezoid":
                muscleActivation.SetActivationPercentage(channelValues[3]);
                break;
            case "Posterior Deltoid":
                muscleActivation.SetActivationPercentage(channelValues[4]);
                break;
            case "Extensor carpi ulnaris":
                muscleActivation.SetActivationPercentage(channelValues[5]);
                break;
            case "Brachioradial":
                muscleActivation.SetActivationPercentage(channelValues[6]);
                break;
            case "Digitorum Extender":
                muscleActivation.SetActivationPercentage(channelValues[7]);
                break;
        }
    }
}
```

Figura 46. Actualización porcentaje activación del objeto gradiente. Elaboración Propia

Los datos y el color de los objetos que simulan los músculos se actualizan con cada *frame* para reflejar la activación muscular en tiempo real. Sobre el avatar humanoide se modelaron músculos de forma y textura similar a fibras musculares, entonces cuando el usuario realiza una selección de músculos y pulsa el botón ‘Play’ desde la escena principal se accede a la escena de avatar para colorear estas fibras. En ese momento se analiza la selección de músculos del usuario y de toda la lista disponible en la escena del avatar solo se muestran aquellos músculos que coinciden con los que el usuario ha seleccionado. A medida, que se recorre esta lista se generan dinámicamente los objetos visuales de gradiente de color mediante el método *createMusclePotentialHandler* (véase Figura 47. Creación de objetos gradiente de color.)

```
private void createMusclePotentialHandler(string muscle){
    // Aquí se puede implementar la lógica para crear el handler de potencial muscular

    if (gradientPrefab == null || panelMonitorizacion == null)
    {
        Debug.LogError("No se ha asignado el prefab del gradiente o el panel de monitorización.");
        return;
    }
    int childCount = panelMonitorizacion.childCount;
    GameObject muscleHandler = Instantiate(gradientPrefab, panelMonitorizacion); //Instancio el prefab del gradiente en el panel de monitorizacion
    if (muscleHandler == null){
        Debug.LogError("No se ha podido instanciar el prefab del gradiente.");
        return;
    }
    else{
        RectTransform handlerTransform = muscleHandler.GetComponent<RectTransform>();
        if (handlerTransform == null){
            Debug.LogError("No se ha encontrado el componente RectTransform en el prefab del gradiente.");
            return;
        }
        //Asigno la etiqueta identificativa
        muscleHandler.tag = "MuscleActivationPrefab";
        //Calculas la posición basada en cuantos hay
        int index = childCount;
    }
}
```

Figura 47. Creación de objetos gradiente de color. Elaboración Propia

En esta función se instancia el objeto y se asigna como objeto hijo del panel de monitorización, dónde van a estar todos los gradientes, se crea un objeto hijo también para identificarlo dentro de todo los gradientes, este texto contendrá el nombre del músculo que monitoriza, se le asigna como etiqueta *MuscleActivationPrefab* para poder acceder a él y por último se le añaden configuraciones como el color del texto, el tamaño, la fuente y la posición del objeto en el panel.

Cada uno de los objetos tiene un script *MuscleActivationProgress*, este se encarga de mostrar visualmente el nivel de activación muscular. En el método *Start()*, se inicializan las posiciones de los elementos gráficos: la flecha y el texto que indica el porcentaje de activación. Figura 48. Objeto *prefab*, gradiente de estimulación muscular.

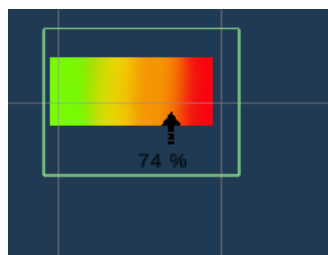


Figura 48. Objeto *prefab*, gradiente de estimulación muscular. Elaboración Propia.

Las posiciones del texto también se calculan en función de las posiciones de la flecha para que el texto acompañe visualmente a la flecha cuando se desplace por un aumento o disminución de su valor. Para actualizar la posición de la flecha se interpola linealmente entre la posición inicial y la posición final de la flecha según el valor del porcentaje de activación, el movimiento tiene lugar para reflejar el nivel de activación. Para actualizar la posición del texto se hace lo mismo por eso se genera la sensación de que una posición acompaña a la otra, además tiene lugar en cada actualización del frame contribuyendo así a la representación en tiempo real de la actividad muscular. Por otro lado, se incluyen funciones públicas en este script para consultar el estado de activación del músculo y también para poder cambiarlo desde fuera según los datos recibidos (funciones presentadas en Figura 49. Funciones públicas de *MuscleActivationProgress*)

```
// This function let to change the activation percentage
8 referencias
public void SetActivationPercentage(float percentage)
{
    activationPercentage = Mathf.Clamp01(percentage); // valor esté entre 0 y 1
    Debug.Log("Muscle Activation Progress. SetActivationPercentage: " + activationPercentage);
}

1 referencia
public float GetActivationPercentage()
{
    return activationPercentage;
}
```

Figura 49. Funciones públicas de *MuscleActivationProgress*. Elaboración Propia.

En definitiva, la lógica que maneja Avatar Main es la siguiente, al iniciarse la escena crea de forma dinámica los gradientes según la selección de músculos que ha realizado el usuario, y en el método Update() se ejecuta *StimulateMuscles()* que recorre todos los objetos etiquetados como “*MuscleActivationPrefab*” y consulta su nivel actual de activación mediante el método *GetActivationPercentage()* (véase Figura 50. Obtener datos de estimulación).

Este se encuentra en el script *MuscleActivationProgress* que tiene cada componente, este script está compuesto por métodos internos para facilitar el trabajo con estos objetos. Recopila estos datos en un diccionario de pares nombre_músculo,nivel_estimulación que se utiliza para animar visualmente los gradientes. Cuando el servidor recibe datos modifica esos objetos, de forma que cuando la instancia de la escena hace la consulta obtiene los datos nuevos y colorea los músculos del avatar según estos.

```

private Dictionary<string, float> getStimulationMusclesData()
{
    // Simulación de datos de estimulación muscular || debería hacer que el diccionario fuera una variable global?
    Dictionary<string, float> stimulationData = new Dictionary<string, float>();
    GameObject[] musclesPrefabs = GameObject.FindGameObjectsWithTag("MuscleActivationPrefab");//cuando se crean el prefab se le asigna esta etiqueta
    if (musclesPrefabs.Length == 0)
    {
        Debug.LogWarning("No se encontraron prefabs de activación muscular.");
        return null;
    }
    foreach (GameObject musclePrefab in musclesPrefabs)
    {
        MuscleActivationProgress muscleActivation = musclePrefab.GetComponent<MuscleActivationProgress>();
        if (muscleActivation != null)
        {
            float activationPercentage = muscleActivation.GetActivationPercentage(); // Si existe el componente, obtengo el porcentaje de activación
            Text muscleName = musclePrefab.GetComponentInChildren<Text>();
            if (muscleName != null)
            {
                string muscleKey = muscleName.text;
                if (stimulationData.ContainsKey(muscleKey))
                {
                    stimulationData[muscleKey] = activationPercentage; // Sustituye el porcentaje existente
                }
                else
                {
                    stimulationData.Add(muscleKey, activationPercentage); // Crea una nueva clave con el porcentaje
                }
            }
        }
    }
    return stimulationData;
}

```

Figura 50. Obtener datos de estimulación. Elaboración Propia.

La representación visual de la estimulación muscular se lleva a cabo cómo se ha comentado a partir del diccionario que devuelve la función de la figura anterior. En primer lugar, se hace una pequeña verificación de la existencia del diccionario y luego se itera en cada par. Se busca un objeto cuya etiqueta coincida con la clave del diccionario, se calcula el color al que corresponde ese valor de estimulación y se cambia. Antes se ha comentado que los músculos se han modelado de forma que sean similares a fibras musculares, a cada uno de ellos también se le ha asignado una etiqueta con el músculo del que forman parte para poder seleccionarlos de forma dinámica y cambiar su aspecto. Con el objetivo de que la representación sea lo más preciso posible se han utilizado varias esferas así que cuando se cambia el color no afecta sólo a un objeto si no a todos los que tienen esa etiqueta que en conjunto forman el músculo, es por eso que se ha necesitado un bucle para estas acciones. (véase Figura 51. Cambio de color de músculos del avatar.)

```

private void StimulateMuscles(Dictionary<string, float> stimulationData)
{
    Debug.Log("Estimulación muscular: " + string.Join(", ", stimulationData));
    if (stimulationData == null || stimulationData.Count == 0) ...
    foreach (var muscle in stimulationData)
    {
        string muscleName = muscle.Key;
        float activationPercentage = muscle.Value;
        GameObject[] muscles = GameObject.FindGameObjectsWithTag(muscleName);
        if (muscles.Length > 0){
            string hexColor = "#" + getColorFromPercentage(activationPercentage); // "#RRGGBB"

            if (UnityEngine.ColorUtility.TryParseHtmlString(hexColor, out Color color)){
                foreach (GameObject muscleObj in muscles)
                {
                    //fibras del biceps
                    MeshRenderer renderer = muscleObj.GetComponent<MeshRenderer>();

                    if (renderer != null)
                    {
                        // Cambia directamente el color base del material original
                        if (renderer.material.HasProperty("_BaseColor")) // URP
                        {
                            renderer.material.SetColor("_BaseColor", color);
                        }
                        else if (renderer.material.HasProperty("_Color")) // Shader estándar
                        {
                            renderer.material.color = color;
                        }
                        else
                        {
                            Debug.LogWarning($"Material del músculo {muscleName} no tiene propiedad _BaseColor ni _Color.");
                        }
                    }
                    else
                    {
                        Debug.LogWarning($"El músculo {muscleName} no tiene Renderer.");
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

Figura 51. Cambio de color de músculos del avatar. Elaboración Propia.

El color que va a tener cada músculo se calcula con un método privado que convierte el valor del porcentaje de activación, obtenido del servidor, en un color representado como una cadena hexadecimal RGB. Primero, normaliza el valor recibido usando *Mathf.Clamp* para asegurarse de que esté entre 0 y 1, evitando valores fuera de rango. Luego con *color.Lerp* se interpola linealmente entre verde y rojo según el porcentaje un valor de 0 será verde, 1 será rojo y los valores intermedios será una mezcla proporcional. Finalmente, el método convierte el color resultante a una cadena hexadecimal RGB utilizando un módulo de Unity, *UnityEngine.ColorUtility.ToHtmlStringRGB* , lo que permite usar este valor en la interfaz gráfica (código correspondiente en Figura 52. Interpolación lineal para obtención de color RGB a partir del porcentaje de activación.)

```
private string getColorFromPercentage(float percentage)
{
    float normalizedPercentage = Mathf.Clamp(percentaje, 0f, 1f);
    Color color = Color.Lerp(Color.green, Color.red, normalizedPercentage);
    return UnityEngine.ColorUtility.ToHtmlStringRGB(color);
}
```

Figura 52. Interpolación lineal para obtención de color RGB a partir del porcentaje de activación. Elaboración Propia

3. Interacción del usuario y movimiento de cámara.

Los músculos entre los cuales el usuario puede elegir en la plataforma son grandes, pequeños, están situados en la parte frontal otros en la parte posterior así que para facilitar el estudio al profesional se han implementado funcionalidad de zoom y de rotación del avatar sobre su propio eje. Estas herramientas permiten que el profesional tenga mejor acceso, convirtiendo la exploración en un proceso menos complejo. La rotación se puede hacer tanto con el teclado como con las flechas del teclado proporcionando más usabilidad. En cada *frame*, primero se obtiene la entrada horizontal del usuario y se utiliza para rotar el objeto alrededor del eje Y (vertical) mediante *transform.Rotate*, multiplicando por la velocidad de rotación y el tiempo transcurrido para que la rotación sea suave y dependiente del *frame rate*. Además, si el usuario prefiere mantener presionado el botón izquierdo del ratón el script detecta el movimiento horizontal del ratón y rota el objeto en consecuencia con la sensibilidad definida. Los parámetros como la sensibilidad, la velocidad, el zoom máximo o mínimo se pueden editar. Así es cómo este código Figura 53. Rotate Avatar – script –. Elaboración Propia., presenta de forma intuitiva como manipular la orientación del avatar tanto con teclado como con ratón .


```

void Update()
{
    // Rotación con teclas (flechas o A/D)
    float horizontalInput = Input.GetAxis("Horizontal");
    transform.Rotate(Vector3.up * horizontalInput * rotationSpeed * Time.deltaTime);

    // Rotación con el ratón (arrastrando horizontalmente)
    if (Input.GetMouseButton(0)) // Solo si el botón izquierdo está presionado
    {
        float mouseX = Input.GetAxis("Mouse X"); // Movimiento horizontal del ratón
        transform.Rotate(Vector3.up * mouseX * mouseSensitivity);
    }
}

```

Figura 53. Rotate Avatar – script –. Elaboración Propia.

La ampliación se permite cambiando el tamaño ortográfico de la cámara, resta el valor obtenido de la rueda del ratón multiplicado por la variable zoom. Esto acerca o aleja la vista en modo ortográfico. Si se diera el caso de que la cámara no es ortográfica, se ajusta el campo de visión y se usa el valor de la rueda del ratón para acerca o alejar la vista.

```

void Update()
{
    if (camara.orthographic)
    {
        camara.orthographicSize -= Input.GetAxis("Mouse ScrollWheel") * zoom; // Volumen de la camara
    }
    else
    {
        camara.fieldOfView -= Input.GetAxis("Mouse ScrollWheel") * zoom; //Volumen de la camara
    }
}

```

Figura 54. Zoom Avatar – script –. Elaboración Propia

De esta forma el usuario puede controlar el nivel de zoom de la cámara de forma intuitiva, sin depender del tipo de proyección que se utilice en ese momento.

4. Flujo de datos y eventos.

El flujo de datos en la aplicación comentado anteriormente se va a detallar a continuación.

1. El usuario selecciona una lista de músculos, se transfiere entre escenas usando variables estáticas.
2. El cliente EMG envía vectores de activación de ocho canales en formato ASCII.
3. El TCPServer recibe y encola estos mensajes.
4. En el hilo principal, los datos se parsean y se transforman en arrays de tipo *float*.
5. El método *UpdateMuscleActivation()* del singleton *AvatarMain* gestiona la distribución de estos datos
6. Finalmente, *MuscleActivationProgress* actualiza la visualización gráfica correspondiente al valor de activación del músculo utilizando la interpolación lineal.

5. Buenas prácticas y decisiones de diseño

Durante el desarrollo, se han seguido diversas buenas prácticas para garantizar un sistema robusto:

En primer lugar, se ha respetado la separación de hilos, evitando el uso de la API de Unity fuera del hilo principal recurriendo a una cola concurrente como intermediario. El patrón singleton ha permitido coordinar de forma global las acciones relacionadas con el avatar. Asimismo, el uso de *prefabs* y tags facilita la escalabilidad para representar múltiples músculos sin necesidad de modificar el código base.

Para evitar errores por configuraciones en cada método se incluyen comprobación básicas como verificar la existencia del objeto, que las listas no estén vacías o el estado del servidor entre otros. Con esto se busca mejorar la plataforma ayudando a la detección y a la localización de errores, y a la usabilidad de la plataforma.

4 ANÁLISIS DE COSTES

A continuación, se procede a realizar una evaluación de la viabilidad y sostenibilidad de este proyecto. En este apartado se va a desglosar el coste del desarrollo de la solución tecnológica definida y a estimar los recursos económicos necesarios. Los gastos que se prevén tener se van a clasificar en función de la asignación en directos: todos los que competen a la implementación del producto e indirectos: aquellos que no son de implementación, pero son necesarios para el proyecto, como necesidades eléctricas o mantenimiento.

En este análisis se detallarán los costes materiales, humanos y tecnológicos implicados, incluyendo software, hardware, tiempo de desarrollo y otros elementos relevantes. Se valorará también la escalabilidad y replicabilidad del proyecto en contextos reales, como su posible integración en entornos clínicos o educativos.

4.1 COSTES DEL PROYECTO

4.1.1 Costes indirectos

Los costes indirectos que se van a considerar son el uso del espacio del Laboratorio HURO para integrar el dispositivo de RV con el software desarrollado y el tiempo de trabajo fuera del laboratorio. Este uso se aproxima en unas 10 horas, conlleva carga del dispositivo y del ordenador de trabajo, uso de la corriente, y conexión a Internet.

El consumo de energía del equipo portátil es de 85W, con un precio medio en 2025 de 0.1053 €/kWh (Tarifasgasluz, 2025), se calcula el gasto de luz eléctrica obteniendo 0.0068€/hora. Por otro lado, el gasto de consumo de la conexión a Internet es de media de 43€ mensuales (CNMC, 2024), teniendo en cuenta lo anterior se calculan los gastos indirectos totales que tienen un valor final de 43.29€

$$\text{Gasto luz eléctrica} \rightarrow 0.1053 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot \left(85 \frac{\text{W}}{\text{kW}} \div 1000 \text{W} \right) = 0.0089 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$$

$$\text{Gasto en conexión a Internet} \rightarrow 43 / (31 \text{ días} \cdot 24 \text{ horas}) = 0.0577 \text{€} / \text{hora}$$

$$\text{Horas de trabajo} \rightarrow 8 \text{ meses} \cdot 4 \text{ semanas} \cdot 5 \text{ días} \cdot 4 \text{ horas} = 640 \text{ horas}$$

$$\text{Gastos indirectos totales} \rightarrow \left(0.0089 \frac{\text{€}}{\text{h}} + 0.0577 \frac{\text{€}}{\text{hora}} \right) \cdot 640 \text{ horas} = 43.29 \text{ €}$$

4.1.2 Costes directos

En el análisis de costes directos se distinguen las siguientes partes: hardware, software y recursos humanos. El hardware que se ha utilizado es Ultium de Noraxon se encuentra en el Laboratorio Human Robotics (HURO) de la Universidad Alicante., este equipo tiene un coste final de aproximadamente 20.000,00€ para más detalle se puede consultar el *apartado 3.2 Software y hardware empleado*. Sin embargo, este coste no es determinante para el desarrollo del proyecto porque el software es compatible con más equipos EMG.

En los costes directos en concreto en cuanto al software, se ha elegido para el desarrollo del proyecto el motor de juego 'Unity', esta plataforma destaca por su gratuidad y por la gran variedad de recursos que ofrece a sus usuarios tal y como se ha comentado en el *apartado 3.2.2 Software de desarrollo utilizado*, además se han empleado otros recursos gratuitos que se detallan en el apartado al que se le hace mención anteriormente.

Por último, para conocer el coste de recursos humanos se tiene en cuenta el trabajo que el alumno ha realizado a lo largo del desarrollo del proyecto incluyendo distintas tareas. Entre ellas se encuentran: la creación de prototipos, el diseño final, la organización de la solución, su implementación, la realización de pruebas, la detección de errores y su solución, se estima una dedicación media de 4 horas diarias durante 8 meses, más las trabajadas en el laboratorio, lo que equivale a:

$$8 \text{ meses} \cdot 4 \text{ semanas} \cdot 5 \text{ días} \cdot 4 \text{ horas} = \mathbf{640 \text{ horas}}$$

$$640 \text{ (en remoto)} + 10 \text{ (en el laboratorio)} = \mathbf{650 \text{ horas}}$$

Al número de horas se le añade las trabajadas en el laboratorio de Human Robotics. Para calcular el coste por hora se ha tomado como referencia el salario mensual de un ingeniero biomédico de las fuentes de formación (*¿Cuál es el salario de un ingeniero biomédico en España?*, s.f.); (Equipo editorial de Indeed, 2024)

$$(2000 \text{ €} + 2200 \text{ €} + 2790 \text{ €}) / 3 = \mathbf{2330 \text{ € mensuales}}$$

$$(2330 \text{ €} / 4 \text{ semanas}) / 40 \text{ horas} = \mathbf{14.56 \text{ € / hora}}$$

Considerando una jornada estándar de 40 horas semanales durante 4 semanas al mes, así que finalmente se obtiene el coste total asociado al tiempo de desarrollo:

$$14,56 \text{ €/hora} \cdot 650 \text{ horas} = \mathbf{9.464 \text{ €}}$$

4.1.3 Costes totales

A partir del análisis anterior, se concluye que los costes directos como los indirectos asociados al proyecto se han calculado de acuerdo con las características del proyecto, teniendo en

cuenta una visión global de los recursos utilizados. No solo los términos materiales si no también recursos humanos y de entorno como es la utilización del laboratorio. La parte de costes directos, véase Tabla 1. Tabla de costes directos del proyecto. Elaboración propia. hace referencia al valor del tiempo invertido por parte del alumno y recursos técnicos, mientras que los costes indirectos, representado en la Tabla 2. Tabla de costes indirectos del proyecto. Elaboración propia. aunque menos significativos en cuanto a lo que a valor total se refiere, son relevantes para comprender el impacto de recursos compartidos como el gasto eléctrico o de conexión a Internet.

Tabla 1. Tabla de costes directos del proyecto. Elaboración propia.

<i>Costes Directos €</i>	
<i>Recursos Humanos</i>	9.464 €
<i>Totales</i>	9.464 €

Tabla 2. Tabla de costes indirectos del proyecto. Elaboración propia.

<i>Costes Indirectos (sobre 650horas) €</i>	
<i>Gasto eléctrico</i>	5.785
<i>Conexión a Internet</i>	37.505
<i>Totales</i>	43.29

En el análisis de costes directos asociados al desarrollo del presente proyecto, no se ha incluido el valor económico del sistema de electromiografía (EMG) Noraxon Ultium, cuyo precio estimado ronda los 20.000 €. Esta decisión responde a que dicho equipo no ha sido adquirido específicamente para el desarrollo de esta solución, sino que se ha utilizado dentro de un entorno de investigación ya equipado con esta tecnología, además a la alta compatibilidad con equipos de EMG.

En definitiva, el coste total del proyecto es de 9.507,29 €, sumando tanto los costes directos como los indirectos. En esta cifra total se refleja el valor económico que tendría la ejecución del proyecto en un entorno profesional, teniendo en cuenta aspectos técnicos, la infraestructura necesaria para la implementación y los recursos humanos necesarios para la misma. Muchos de ellos han sido facilitados sin coste directo para el estudiante, hecho que refleja la importancia del apoyo educativo en el desarrollo de proyecto de innovación tecnológica y académica.

4.2 COSTES IMPLEMENTACIÓN EN ÁMBITO CLÍNICO

La implementación de una solución basada en realidad virtual como la que se desarrolla en este proyecto ‘Diseño de avatar RV para biofeedback de EMG’ para su aplicación en ámbitos clínicos o de rehabilitación, conlleva un estudio económico que depende del contexto sanitario. Esta variabilidad está en función de algunos factores como el tipo de centro en el que se instale: hospital, clínica privada, centro de rehabilitación; de los recursos disponibles y del perfil del personal sanitario encargado de utilizar ya que en el caso de no tener conocimiento específico incluso podría ser requerido una pequeña formación sobre el equipo.

Aunque los principales costes se van a asociar a la adquisición del software personalizado y el dispositivo, existen otros elementos que deben contemplarse en un análisis completo: el consumo energético derivado del uso continuado, los costes de instalación e integración con el entorno clínico correspondiente, la formación necesaria para el profesional sanitario, y el mantenimiento del sistema a lo largo del tiempo.

- Utilización del dispositivo RV y software: El coste medio de un dispositivo Noraxon Ultium es aproximadamente de 20.000, es un equipo que integra un software potencialmente compatible con sistemas de electromiografía.
- Consumo energético: Este factor variara en función del número de sesiones que necesite el paciente, el tipo de paciente para el que el uso de este software sería muy beneficioso es aquel que este en fase aguda o en fase de recuperación, si es un caso de fase aguda será a recomendación del personal sanitario ya que este implica más riesgo. (Admin, 2023). Tomando de referencia dos o tres sesiones por semana se tienen en total 130 sesiones clínicas al año. Suponiendo que cada sesión clínica dura entre 45 min y 1 hora , de media se dedicarían 52,5 horas al año. (Universidad de Valencia, s.f.) teniendo en cuenta una potencia media de consumo de 85 W y un precio medio de 0.1053 €/kWh.

$$130 \text{ sesiones} \cdot 0.875 \frac{\text{horas}}{\text{sesion}} = 113,75 \text{ horas}$$
$$0.1053 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot \left(85 \frac{\text{W}}{\text{kW}} \div 1000 \text{W} \right) \cdot 113,75 \text{ h} = 1.02 \text{ €}$$

- Instalación e integración: para la correcta instalación del sistema se requiere tanto la adaptación del entorno clínico, como la configuración del software y comprobación de compatibilidad con otros sistemas hospitalarios, se estima dos horas de trabajo de un perfil técnico (ingeniero biomédico o informático). Asumiendo un coste de 11.49 €/hora (INE - Instituto Nacional de Estadística, s.f.) se tendría un total de:

$$11.49 \frac{\text{€}}{\text{hora}} \cdot 2 \text{ horas} = 22.98\text{€}$$

- Formación al personal sanitario: la implantación de esta tecnología requiere que el personal clínico reciba formación sobre el uso del sistema, tanto en lo referente a la interfaz de RV como al tipo de feedback que se ofrece. Se calcula que el ingeniero deberá de impartir una formación de 3 horas de duración, siguiendo el mismo honorario mencionado:

$$11.49 \frac{\text{€}}{\text{hora}} \cdot 3 \text{ horas} = 34.47 \text{ €}$$

- Mantenimiento técnico y actualizaciones: El coste del mantenimiento se estima es 20% del total del proyecto, en un entorno sanitario real se requiere garantizar el buen funcionamiento del sistema, lo cual incluye revisiones técnicas periódicas, solución de errores, actualizaciones del software y soporte técnico.

$$0.20 \cdot 9.507,29 \text{ €} = 1.901,46 \text{ €}$$

Tabla 3. Tabla de costes totales de implementación en el ámbito sanitario.

Concepto	Coste €
<i>Dispositivo y software</i>	20.000
<i>Energía eléctrica</i>	1.02
<i>Instalación e integración</i>	22.98
<i>Formación al personal sanitario</i>	34.47
<i>Mantenimiento técnico</i>	1.901,46
<i>Total</i>	21.959,93

En los costes de implementación en el ámbito clínico asociados a la implementación de la propuesta se considera necesario incluir el coste del sistema EMG, dado que representa un desembolso esencial para cualquier institución que desee aplicar esta tecnología en un entorno real. Al final de este análisis se puede apreciar que, aunque el coste inicial pueda parecer elevado, se trata de una inversión dentro del ámbito sanitario, especialmente si se considera el impacto positivo que va a tener en la monitorización y rehabilitación de pacientes. El sistema finalmente se presenta como un proyecto modular y de carácter adaptable, permite su implementación progresiva y escalable a distintas unidades clínicas, ajustándose a las necesidades y recursos de cada institución.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El proyecto ha alcanzado los objetivos planteados inicialmente, aun así, el diseño del avatar de biofeedback y su implementación en un entorno virtual para la visualización de la actividad muscular sobre el avatar, son solo un primer paso en el desarrollo de soluciones tecnológicas más complejas y personalizadas en rehabilitación física. Esta primera versión representa un punto de partida sólido para el diseño de herramientas aplicadas a las terapias de rehabilitación física y genera oportunidades para nuevas soluciones personalizadas, inmersivas y adaptables al usuario. Aun sin haber realizado validación clínica con pacientes reales, se ha logrado establecer una base técnica robusta sobre la que avanzar. Las decisiones de diseño como la arquitectura de escenas, la elección del motor Unity, una estética que integra usabilidad y la integración con hardware biomédico real permiten visualizar el crecimiento del proyecto con nuevas funcionalidades.

Se abre un gran abanico de posibilidades de evolución que permitirán mejorar la interacción, aumentar la precisión de biofeedback, enriquecer la experiencia inmersiva del paciente y, en definitiva, potenciar el impacto clínico de la herramienta propuesta. No obstante, con más tiempo y una mayor experiencia en áreas como redes, diseño en Unity o podrían haberse implementado funcionalidades adicionales.

En primer lugar, se puede no limitar la plataforma desarrollada a su uso en el ámbito sanitario, además de ampliar a la medicina deportiva creando módulos específicos para esta. Entre sus usos se encuentra la utilización del control de la actividad muscular para prevenir lesiones, para realizar reconocimientos físicos y pruebas sobre sus capacidades deportivas, para monitorear entrenamientos exigentes evitando lesiones y para rehabilitación física por ejemplo en terapias de descarga muscular.

En segundo lado, la primera versión funcional solo integra ocho músculos de tren superior. Se comunica con un equipo lector de ocho canales. La escalabilidad de la plataforma es uno de los objetivos de los trabajos futuros tanto a nivel interior de la plataforma como a nivel exterior para poder establecer conexión con varios clientes al servidor o con una base de datos. Entre las mejoras previstas está la integración de músculos de tren inferior, faciales o músculos posteriores, e incluso la posibilidad de incluir todo el sistema muscular integrado, de forma que el usuario sea el que elija los músculos que quiere visualizar y trabajar, con la opción de restablecer esta configuración en cualquier momento. Siguiendo esta línea de personalización de la experiencia para conseguir mayor individualización se plantea también la incorporación de perfiles más complejos. Estos permitirán almacenar información adicional de usuario como la edad, el sexo o músculos afectados por alguna patología para que se tengan más en cuenta en la calibración y el procesamiento de los datos en

tiempo real. Los perfiles podrían guardarse para que, al iniciar la aplicación, el sistema reconozca automáticamente al usuario y cargue su configuración personalizada.

Aumentando el nivel de funcionalidad, otro hito a conseguir será la conexión de la plataforma con una base de datos y un servidor tal y como se ha planteado antes. De esta forma se crea una arquitectura cliente-servidor con más de un cliente. El sistema permitirá una gestión centralizada de la información, se encontraría almacenada mediante un canal seguro, empleando protocolos de seguridad y confidencialidad: gestión de contraseñas y cifrado de datos en tránsito y en la base de datos. Estas funcionalidades conseguirán que el sistema pueda obtener registros de datos, generar estadísticas para cada usuario, e incluso la conexión con un módulo de alertas que monitorizará la estimulación muscular y advertirá de patrones en las señales medidas. Desde el perfil de usuario se tendrá acceso a configuraciones desde su perfil, en él se permite el acceso a sus estadísticas, a editar datos personales, y se ampliará progresivamente. En cuanto a la accesibilidad, se contempla la posibilidad de incorporar distintos modos visuales adaptados a personas con dificultades visuales, así como la opción de cambiar el idioma de la interfaz.

El desarrollo de la plataforma del avatar con biofeedback en Realidad Virtual representa un punto de partida prometedor en la creación de herramientas tecnológicas aplicadas a la rehabilitación física.



Figura 55. Esquema conceptual de los trabajos futuros. Elaboración propia.

Los trabajos futuros se centran en ampliar su campo de aplicación, mejorar la personalización, escalar su funcionalidad e integrar nuevas capacidad técnicas. En la figura Figura 55. Esquema conceptual de los trabajos futuros. Elaboración propia. se presenta de forma conceptual el alcance del proyecto. El sistema evoluciona hacia un modelo más completo, conectado y accesible, se presenta como una herramienta para abrir múltiples posibilidades tanto en el ámbito sanitario

como en el deportivo, con potencial clínicos y preventivo. Asimismo, se prevé una mejorar sustancial de la experiencia del usuario, fomentando la adaptabilidad, la protección de datos y la inclusión.

Finalmente, el desarrollo de esta propuesta de Trabajo Fin de Grado ha sido una gran oportunidad para combinar los conocimientos adquiridos en el grado desde el desarrollo de software hasta la integración con dispositivos biomédicos. Ha finalizado con una plataforma funcional y con posible aplicación en el ámbito real de la rehabilitación física. En el proceso se han requerido habilidades resolutivas, técnicas, y creativas. No sólo se ha demostrado la viabilidad técnica del planteamiento inicial si no también la importancia de la innovación en el ámbito sanitario, en definitiva, de la Ingeniería Biomédica .

6 BIBLIOGRAFÍA

- ¿Cuál es el salario de un ingeniero biomédico en España? (s.f.). Obtenido de UAX - Univerisidad Alfonso X El Sabio: <https://www.uax.com/blog/salud/cuanto-cobra-ingeniero-biomedico>
- 3D Organon. (s.f.). *3D Organon VR Anatomy | Estándar*. Obtenido de <https://store.3dorganon.com/es/enterprise/59-3d-organon-vr-anatomy-estandar.html>
- ABLE Human Motion. (27 de Agosto de 2024). *Beneficios de la rehabilitación robótica | ABLE Human Motion*. Obtenido de <https://www.ablehumanmotion.com/beneficios-de-la-rehabilitacion-robotica/>
- Admin. (13 de Mayo de 2023). *Cúantas sesiones de fisioterapia por semana se recomiendan*. Obtenido de Clínica Columbia - Centro de rehabilitación: <https://www.clinicacolumbia.com/cuantas-sesiones-de-fisioterapia-por-semana-son-recomendables/>
- ASEM. (29 de Julio de 2024). *¿Qué son las enfermedades neuromusculares?* Obtenido de <https://www.asem-esp.org/que-son/>
- Aukstakalnis, S., & Blatner, D. (1992). *Silicon Mirage; The Art and Science of Virtual Reality*. United States: Peachpit Press.
- Barros, G., Moreira, I., & Ríos, R. (1 de Septiembre de 2018). Tratamiento - rehabilitación y manejo global de las enfermedades neuromusculares. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 29(5), 560-569. doi:10.1016/j.rmcl.2018.07.005
- CNMC. (21 de Junio de 2024). El gasto de los hogares en paquetes de telecomunicaciones aumentó levemente en 2023. *CNMC Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia*. Recuperado el 22 de Abril de 2025, de <https://www.cnmc.es/prensa/panel-hogares-gastos-telecomunicaciones-20240621>
- Equipo editorial de Indeed. (8 de Agosto de 2024). *¿Cuánto gana un ingeniero biomédico en España?* Obtenido de Guía profesional de Indeed; Salario Ingeniero Biomédico: <https://es.indeed.com/orientacion-laboral/remuneracion-salarios/cuanto-gana-un-ingeniero-biomedico-espana>
- FEDACE. (s.f.). Obtenido de https://fedace.org/rehabilitacion_dano_cerebral.html
- FEDACE. (s.f.). *El proceso de rehabilitación del daño cerebral*. Obtenido de Daño cerebral: La rehabilitación y la vuelta a casa.: https://fedace.org/rehabilitacion_dano_cerebral.html
- FEDACE. (s.f.). *La rehabilitación y vuelta a casa*. Obtenido de https://fedace.org/vuelta_casa

- FEDACE. (s.f.). *Qué es y causas principales* . Obtenido de Daño cerebral estatal: El daño cerebral:
<https://fedace.org/dano-cerebral>
- Gila, L., Malanda, A., Rodríguez Carreño, I., Rodríguez Falces, J., & Navallas, J. (s.f.). *Métodos de procesamiento y análisis de señales electromiográficas*. Obtenido de
https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272009000600003
- Guttmann Barcelona. Institut per a la Salut Cerebral. (s.f.). *Robótica para la rehabilitación*. Obtenido de <https://barcelona.guttmann.com/es/article/robotica-para-la-rehabilitacion>
- Guzmán-Muñoz, E., & Méndez-Rebolledo, G. (2018). Vista de Electromiografía en las Ciencias de la Rehabilitación. *Salud Uninorte*, 13.
- Hospital Galenia. (25 de Mayo de 2021). *¿Qué es una rehabilitación física ortopédica?* Obtenido de <https://hospitalgalenia.com/que-es-una-rehabilitacion-fisica-ortopedica/>
- Iaccarino, M. A., Bhatnagar, S., & Zafonte, R. (s.f.). *Rehabilitation after traumatic brain injury*. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25702231/>
- ICAC. (14 de Noviembre de 2023). *Esclerosis lateral amiotrófica: síntomas y diagnóstico*. Obtenido de <https://columna.com/esclerosis-lateral-amiotrofica/>
- ICAC. (8 de Abril de 2024). *Electromiografía: un estudio clave para detectar enfermedades neuromusculares*. Obtenido de <https://columna.com/electromiografia-estudio-clave-detectar-enfermedades-neuromusculares/>
- Incerti, E., & Cadoz, C. (1995). *Topology, Geometry, Matter of Vibrating Structures Simulated with CORDIS-ANIMA Sound Synthesis*.
- INE - Instituto Nacional de Estadística. (s.f.). *Salario medio anual por sectores de actividad económica y periodo (10911)*. Obtenido de INE:
<https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=10911>
- Inrobics. (18 de Junio de 2024). *¿En qué consiste la terapia robótica y qué posibilidades ofrece?* Obtenido de <https://inrobics.com/terapia-robotica-posibilidades-ofrece/#:~:text=El%20concepto%20de%20terapia%20rob%C3%B3tica,otros%20profesionales%20de%20la%20salud.>
- Irited. (22 de Noviembre de 2023). *¿Qué tipos de rehabilitación existen?* Obtenido de <https://www.iriteb.com/que-tipos-de-rehabilitacion-existen/>
- Junquera, R. (s.f.). *Control motor; Qué es, principios, función, en qué patologías se altera y cómo se recupera*. Obtenido de *Qué es, principios, función, en qué patologías se altera y cómo se recupera*

- Lemus, K. (29 de Mayo de 2024). *Características de la Realidad Virtual: una Guía para Principiantes*. Obtenido de <https://blog.inmersys.com/caracteristicas-de-la-realidad-virtual>
- Levis, D. (2006). ¿Qué es la realidad virtual. Mateus, S., & Giraldo, JE (2012). “Diseño de un modelo 3D del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid con Realidad Virtual”. Scielo.
- Mayo Clinic. (s.f.). *Electromiografía*. Obtenido de Electromiografía: <https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/emg/about/pac-20393913>
- Mayo Clinic. (s.f.). *Neuropatía periférica - Síntomas y causas*. Obtenido de <https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/peripheral-neuropathy/symptoms-causes/syc-20352061>
- Mayo Clinic. (s.f.). *Rehabilitación Cardíaca*. Obtenido de Rehabilitación Cardíaca: <https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/cardiac-rehabilitation/about/pac-20385192>
- McLaughlin, K. P. (16 de mayo de 2020). *Biology Dictionary*. Obtenido de Moto neuron: <https://biologydictionary.net/motor-neuron/>
- MedlinePlus. (14 de Febrero de 2024). *Lesión cerebral traumática*. Obtenido de <https://medlineplus.gov/spanish/traumaticbraininjury.html>
- Ministerio de Sanidad. (s.f.). *Prestaciones del Sistema Nacional de Salud*. Obtenido de <https://www.sanidad.gob.es/organizacion/sns/docs/prestaciones08.pdf>
- National Center for Advancing Translational Sciences. (s.f.). *Polimiositis | Sobre la enfermedad | GARD*. Obtenido de <https://rarediseases.info.nih.gov/espanol/12786/polimiositis>
- National Library of Medicine. (s.f.). *Distrofia muscular*. Obtenido de <https://medlineplus.gov/spanish/musculardystrophy.html>
- National Library of Medicine. (s.f.). *Miastenia Gravis*. Obtenido de <https://medlineplus.gov/spanish/myastheniagravis.html>
- Noticias de la Ciencia. (4 de Mayo de 2024). El cibermareo provocado por el uso de realidad virtual. *Noticias de la Ciencia y la Tecnología (Amazings)*. Obtenido de <https://noticiasdelaciencia.com/art/46577/el-cibermareo-provocado-por-el-uso-de-realidad-virtual>
- Paolacabralt. (21 de Febrero de 2024). *Rehabilitación Neurológica ¿Qué efectos tiene intensificarla?* Obtenido de <https://neuralintensive.com/blog/que-efectos-tiene-intensificar-la-rehabilitacion-neurolologica/>

- Romano, R., Wolff, G., Wernly, B., Masyuk, M., Piayda, K., Leaver, S., . . . Jung, C. (25 de Octubre de 2022). Virtual and augmented reality in critical care medicine: the patient's, clinician's, and researcher's perspective. *Critical Care*, 26(1). doi:10.1186/s13054-022-04202-x
- Salcedo Eugenio, G., Ojados González, D., Ibarra Berrocal, I., & Macián Morales, Á. (Noviembre de 2023). Automatización para la evaluación ergonómica integrando las tecnologías de realidad virtual, captura de movimiento, electromiografía de superficie y uso de exoesqueleto. *Universidad Politécnica de Cartagena*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10317/13481>
- SER (Sociedad Española de Reumatología). (s.f.). *Rehabilitación*. Obtenido de <https://www.ser.es/wp-content/uploads/2016/08/Rehabilitacion.pdf>
- Simulators, M. T. (18 de marzo de 2022). *SOLUCIÓN DE APRENDIZAJE DE ANATOMÍA RV INMERSIVA - BODY MAP PRO | More than Simulators*. Obtenido de <https://morethansimulators.com/simulador/solucion-aprendizaje-anatomia-rv-inmersiva/>
- Tarifasgasluz. (21 de Abril de 2025). tarifasgasluz.com. *¿Cuál es el precio de la luz hoy y las horas más baratas?* Obtenido de <https://tarifasgasluz.com/comparador/precio-kwh#:~:text=El%20precio%20medio%20de%20la,0%2C1860%20%E2%82%AC/kWh>.
- Top Doctors. (s.f.). *Electromiografía: qué es, síntomas y tratamiento | Top Doctors*. Obtenido de <https://www.topdoctors.es/diccionario-medico/electromiografia>
- Universidad de Valencia. (s.f.). *Clinica Universitaria de Nutrición, Actividad Física y Fisioterapia*. Obtenido de Unidad de Fisioterapia: <https://www.uv.es/fundacion-lluis-alcanyis/es/asistencia/clinica-universitaria-nutricion-actividad-fisica-fisioterapia/unidad-fisioterapia.html>
- Unreal Engine. (s.f.). *La herramienta de creación 3D en tiempo real más potente*. Obtenido de <https://www.unrealengine.com/es-ES>
- World Health Organization: WHO. (22 de Abril de 2024). *Rehabilitación*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>