



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**Facultad de Ingeniería
y Ciencias**

Ingeniería Biomédica

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO

Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de fatiga muscular durante la actividad física en deportistas de alto rendimiento

Mariana Nieto Ángel
Isabela Ramírez Agredo

Director

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano

Codirector

Ing. Luisa Fernanda García Ramírez

24 de julio de 2025

Santiago de Cali, 24 de julio de 2025

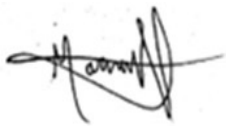
Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Cali

Cordial Saludo.

Por medio de la presente nos permitimos presentarle el Trabajo de Grado titulado “Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de fatiga muscular durante la actividad física en deportistas de alto rendimiento”.

Esperamos que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la profesión.

Atentamente,



Mariana Nieto Ángel



Isabela Ramírez Agredo

Santiago de Cali, 24 de julio de 2025

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Cali

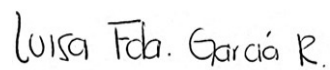
Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de fatiga muscular durante la actividad física en deportistas de alto rendimiento”, realizado por Mariana Nieto Ángel e Isabela Ramírez Agredo, estudiantes de Ingeniería Biomédica, se encuentra terminada y puede ser presentada para su sustentación.

Atentamente,



Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Director Trabajo de Grado



Ing. Luisa Fernanda García Ramírez
Co-Director Trabajo de Grado

Agradecimientos

A lo largo del desarrollo de este proyecto, han sido muchas las personas que han contribuido de manera significativa con su conocimiento, guía y apoyo constante. Este trabajo es el resultado de un proceso colectivo, en el que convergen el esfuerzo individual y el acompañamiento académico y humano recibido durante cada etapa.

Expresamos nuestra profunda gratitud al Dr. Luis Eduardo Tobón Llano, director de este trabajo de grado, y a la Ing. Luisa Fernanda García Ramírez, codirectora del proyecto, por su acompañamiento riguroso, orientación constante y compromiso académico a lo largo de todo el proceso. Su disposición, criterio y capacidad para guiarnos fueron fundamentales para la consolidación de esta propuesta.

Agradecemos también a todos los profesores que, a lo largo de nuestra formación, aportaron con sus conocimientos, orientaciones y exigencias al desarrollo de una perspectiva crítica y profesional. A quienes nos brindaron su tiempo y acompañamiento, gracias por contribuir significativamente al avance de este proyecto.

A todas las personas que nos apoyaron y creyeron en nosotras, en especial a nuestras amigas y compañeros, gracias por su cercanía, confianza y apoyo durante este camino.

Finalmente, a nuestras familias, por su respaldo permanente, por proporcionar las condiciones que permitieron nuestra dedicación plena, y por acompañarnos con firmeza y compromiso a lo largo de nuestra formación profesional.

Glosario

Símbolos

- Hz Hertzios. Unidad de frecuencia en el Sistema Internacional (ciclos por segundo).
mV Milivoltio. Unidad de potencial eléctrico ($1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$).

Acrónimos y Abreviaturas

<i>EMG</i>	Electromiografía. Técnica para registrar la actividad eléctrica generada por los músculos.
<i>ESP32</i>	Microcontrolador de alto rendimiento con conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, utilizado en aplicaciones de IoT y sistemas embebidos.
<i>Firebase Realtime Database</i>	Plataforma en la nube desarrollada por Google que permite el almacenamiento y sincronización de datos en tiempo real entre clientes conectados.
<i>Flutter</i>	Framework de código abierto para el desarrollo de interfaces gráficas nativas en múltiples plataformas desde una única base de código, utilizando el lenguaje Dart.
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Organización profesional dedicada al avance de la tecnología en ingeniería eléctrica y electrónica.
<i>NIRS</i>	Near-Infrared Spectroscopy (Espectroscopía de Infrarrojo Cercano). Técnica óptica no invasiva utilizada para medir la oxigenación del tejido.
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso). Soporte físico que permite la interconexión de componentes electrónicos.

Términos

<i>Electrodos de superficie</i>	Dispositivos colocados sobre la piel que detectan señales bioeléctricas, como la actividad muscular medida por EMG.
<i>LaTeX</i>	Lenguaje de marcado utilizado ampliamente para la redacción de documentos científicos, técnicos y académicos de alta calidad tipográfica.
<i>Vasto lateral</i>	Músculo del cuádriceps femoral ubicado en la cara externa del muslo. Interviene en la extensión de la rodilla y es activado durante ejercicios como sentadillas y carreras.
<i>Dart</i>	Lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado por Google, utilizado principalmente en el framework Flutter para el desarrollo de aplicaciones web y móviles.
<i>C++</i>	Lenguaje de programación de propósito general que permite programación de sistemas, utilizado en plataformas como Arduino para desarrollar lógica de control embebida.

Resumen

La fatiga muscular es un desafío relevante en el ámbito deportivo, especialmente en deportistas de alto rendimiento, ya que afecta directamente la capacidad funcional y eleva el riesgo de lesiones. El monitoreo en tiempo real de esta condición todavía presenta limitaciones, debido a la falta de herramientas portátiles, accesibles y precisas que permitan detectarla de forma no invasiva durante la actividad física.

El objetivo de esta propuesta es desarrollar un sistema de monitoreo portátil basado en tecnologías avanzadas de sensores para medir indicadores relacionados con la fatiga muscular durante el entrenamiento. Para su diseño, se utilizó una metodología que incluyó el análisis conceptual del sistema, la selección e integración de sensores fisiológicos, la implementación de un circuito de acondicionamiento de señal, el procesamiento digital a través de un microcontrolador y la visualización de datos mediante interfaces gráficas.

Además, se verificó el funcionamiento del prototipo en condiciones controladas mediante pruebas de laboratorio, para finalmente validar su desempeño mediante pruebas piloto.

El sistema desarrollado permite a los entrenadores identificar los momentos clave del entrenamiento en los cuales los deportistas se encuentran más propensos a padecer fatiga muscular con base en sus condiciones fisiológicas. Esta iniciativa representa un avance en la incorporación de tecnologías biomédicas al deporte, con impacto positivo en el rendimiento y la salud de los deportistas de alto rendimiento.

Palabras Clave: Entrenamiento, Fatiga muscular, Monitoreo portátil, Procesamiento de señales, Sensores biomédicos.

Abstract

Muscular fatigue represents a significant challenge in the field of sports, particularly for high-performance athletes, as it directly affects functional capacity and increases the risk of injury. Its real-time monitoring still faces limitations due to the scarcity of portable, accessible, and accurate tools capable of identifying it non-invasively during physical activity.

The aim of this proposal is to develop a portable monitoring system based on advanced sensor technologies to measure indicators associated with muscular fatigue during training. Its design followed a methodology that included the conceptual analysis of the system, selection and integration of physiological sensors, implementation of a signal conditioning circuit, digital processing via a microcontroller, and data visualisation through graphical interfaces.

Furthermore, the prototype's functionality was verified under controlled conditions through laboratory tests, and its performance was validated by means of pilot trials.

The developed system enables coaches to identify key moments during training when athletes are more prone to experiencing muscular fatigue, based on their physiological conditions. This initiative represents progress in the incorporation of biomedical technologies into sports, with a positive impact on both the performance and health of high-performance athletes.

Keywords: Training, Muscle fatigue, Portable monitoring, Signal processing, Biomedical sensors.

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo General	9
4.2. Objetivos Específicos	9
5. Marco de Referencia	11
5.1. Áreas Temáticas	11
5.2. Marco Teórico	11
5.2.1. Patinaje	11
5.2.2. Ubicación de electrodos para medición electromiográfica del músculo vasto lateral	13
5.2.3. Deportista de alto rendimiento	15
5.2.4. Actividad física	15
5.2.5. Fatiga muscular y rendimiento deportivo	15
5.2.6. Métodos de Evaluación de variables indirectas de Fatiga Muscular	17
5.2.7. Electromiografía de Superficie (EMG)	19
5.2.8. Plataformas de Desarrollo SW	27
5.2.9. Microcontrolador	28
5.2.10. Consideraciones para la planificación del plan de entreno	29
5.3. Marco Ético-Legal	32
5.3.1. Declaración de Helsinki	32
5.3.2. Resolución 8430 de 1993	33
5.3.3. Directrices Éticas Internacionales CIOMS-OMS	33
5.4. Trabajos Relacionados	34
6. Materiales y Métodos	35
6.1. Materiales	35
6.1.1. Componentes	35
6.1.2. Herramientas	36
6.2. Metodología	37
6.2.1. Aplicación de Encuestas	37
6.2.2. Requerimientos del sistema	39
6.2.3. Población y Selección Justa de Participantes	42

6.2.4. Tipo de Estudio	42
6.3. Diseño Metodológico: Enfoque Mixto	43
6.3.1. Componente Cualitativo	43
6.3.2. Componente Cuantitativo	43
6.3.3. Ejercicios durante el entrenamiento para el estudio de la fatiga muscular	44
6.3.4. Integración de Resultados	44
7. Resultados y Discusión	45
7.1. Resultados y Discusión	45
7.1.1. Descripción general del experimento	45
7.1.2. Resultados de las encuestas a entrenadores	45
7.1.3. Resultados de las encuestas a deportistas	48
7.1.4. Requerimientos del sistema según las encuestas	51
7.1.5. Selección de sensores	55
7.1.6. Proceso de diseño	55
7.1.7. Firebase	68
7.1.8. Procesamiento de los datos	74
7.1.9. Resultados de la prueba	84
7.1.10. Saturación de Oxígeno	84
7.1.11. Resultados obtenidos con EMG	88
7.1.12. Correlación entre variables y análisis integrado	92
7.1.13. Discusión	92
8. Conclusiones	95
9. Trabajos futuros	97
9.1. Trabajos Futuros	97
10. Anexos	99
Anexos	99
Anexo 1 – Manual de Usuario	101
Anexo 4 – Aval aprobado por el Comité de Ética	133
Bibliografía	135

Índice de figuras

3.1. Efecto de una estimulación tetánica corta de 50 Hz después de una cansada contracción de 45 s.	5
3.2. Distribución porcentual según el tipo de lesión.	6
3.3. Perfiles del POMS en los grupos de lesionados y no lesionados	7
5.1. Vasto lateral [1]	13
5.2. Líneas referencia [2]	14
5.3. Ubicación electrodos [3]	15
5.4. Causas de la fatiga muscular. Adaptado de: (LA FATIGA MUSCULAR, n.d.)	17
5.5. Sensor NIRS [4]	18
5.6. Señal SEMG obtenida durante una contracción estática. [5]	21
5.7. Bioimpedancia [6]	22
5.8. Resultados de termografía [7]	23
5.9. Acelerómetro IMU [8]	23
5.10. Dinamómetro isocinético [9]	25
5.11. Dinamómetro de agarre [10]	25
5.12. Sensor de deformación blando [5]	26
5.13. ESP32 DevKit V1 [11]	28
7.1. Edad de los entrenadores	46
7.2. Sexo	46
7.3. Años de experiencia de los entrenadores	47
7.4. Datos relevantes	47
7.5. Problemas para la implementación de un sistema de monitoreo de fatiga muscular	47
7.7. Edad	48
7.6. Ayuda tecnológica en la práctica deportiva	48
7.8. Sexo	49
7.9. Conocimiento sobre fatiga muscular	49
7.10. Experiencia previa de fatiga muscular	50
7.11. Síntomas de fatiga muscular	50
7.12. Uso de dispositivo	51
7.13.	51
7.14. Diagrama de la casa de la calidad (QFD) para selección de características del sistema	54
7.15. Diseño del sistema EMG inicial utilizado para pruebas preliminares.	56
7.16. PCB de EMG inicial	57
7.17. Circuito en protoboard	58
7.18. Diseño de PCB	59

7.19. Proceso de fabricación de PCB	59
7.20. Proceso de fabricación de PCB 2	60
7.21. Intentos de fabricación de PCB fallidos	61
7.22. PCB impresas con CNC	61
7.23. PCB fabricadas	62
7.24. Prototipo 1	63
7.25. Prototipo 2	64
7.26. Prototipo final	64
7.27. Diagrama de flujo del prototipo final	65
7.28. Prototipo final	66
7.29. Vista frontal	67
7.30. Vista lateral	68
7.31. Realtime Database	69
7.32. Correo creado para el proyecto	70
7.33. Cuenta errónea	70
7.34. Organización de datos en firebase	71
7.35. Número de muestras	71
7.36. Datos de EMG en firebase	72
7.37. Organización de datos de EMG	72
7.38. Datos NIRS en firebase	73
7.39. Organización de datos de NIRS	73
7.40. Funcionamiento del código promedio para EMG	75
7.41. Promedio de EMG	76
7.42. Diagrama de funcionamiento del código para cálculo de umbrales	77
7.43. Calibración y cálculo de umbrales	77
7.44. Diagrama de clasificación de estados	78
7.45. Clasificación de estados	78
7.46. Diagrama de flujo del cálculo de fatiga muscular	79
7.47. Cálculo de fatiga muscular	79
7.48. Diagrama de flujo de promedio de la señal NIRS	80
7.49. Promedio de la señal	81
7.50. Diagrama de flujo de la normalización de los datos	82
7.51. Normalización de datos	82
7.52. Diagrama de flujo de clasificación de estados	83
7.53. Clasificación de estados	83
7.54. Diagrama de flujo del cálculo de fatiga muscular	84
7.55. Cálculo de fatiga muscular	84
7.56. Resultados generales de NIRS	85
7.57. Comparación entre medición 1 y 5	86
7.58. FeedBack del deportista	87
7.59. Niveles de fatiga muscular	88

7.60. Resultados generales de la prueba	89
7.61. Comparación entre las mediciones 1, 3 y 7	90
7.62. Feedback de la deportista	91
7.63. Nivel de fatiga muscular	91
10.1. Pantalla de bienvenida	103
10.2. Pantalla de inicio de sesión	104
10.3. Pantalla de registro para entrenadores	105
10.4. Menú principal	106
10.5. Perfil del entrenador	107
10.6. Cambio de foto de perfil del entrenador	107
10.7. Perfil del deportista	108
10.8. Visualización del sensor EMG	108
10.9. Visualización del sensor NIRS	109
10.10EMG - Medición 3	109
10.11NIRS - Medición 1	110
10.12Análisis general - EMG	110
10.13Análisis general - NIRS	111
10.14Análisis por medición - EMG	111
10.15Análisis por medición - NIRS	112
10.16Comparación de gráficas - EMG	113
10.17Comparación de gráficas - NIRS	113
10.18Pantalla de retroalimentación del deportista	114
10.19Consentimiento informado entrenadores	116
10.20Consentimiento informado entrenadores	117
10.21Aval aprobado por el Comité de Ética	133

Índice de tablas

5.1. Incidencia y tiempo de recuperación de lesiones [12]	12
5.2. Evaluación de parámetros bioquímicos en la determinación de la fatiga en deportistas de alto nivel	27
5.3. Principios del entrenamiento deportivo	29
7.1. Requerimientos funcionales y no funcionales del sistema	52
7.2. Relación de características y su peso relativo en el sistema de monitoreo de fatiga muscular	53
7.3. Evaluación comparativa de tecnologías de sensores para monitoreo de fatiga muscular	55

Introducción

La fatiga muscular es un desafío crítico en el ámbito deportivo, especialmente en deportistas de alto rendimiento, ya que puede comprometer su desempeño, limitar su capacidad de recuperación y aumentar significativamente el riesgo de lesiones. Este fenómeno, resultado de la disminución de la capacidad funcional del músculo tras un esfuerzo prolongado o intenso, no solo afecta el rendimiento inmediato, sino que también puede tener consecuencias a largo plazo si no se gestiona adecuadamente [13]. Por esta razón, el monitoreo efectivo de la fatiga muscular se ha convertido en una prioridad tanto para entrenadores como para investigadores en el campo del deporte de alto nivel.

Aunque existen múltiples métodos para evaluar este fenómeno, como la bioimpedancia, espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS), electromiografía (EMG), termografía, acelerometría, dinamometría, sensores de deformación y análisis bioquímicos de marcadores como lactato y creatinafosfoquinasa, estas herramientas presentan importantes limitaciones. Entre los principales desafíos se encuentran los altos costos asociados, la complejidad técnica de algunos sistemas, el carácter invasivo de ciertas técnicas y la falta de accesibilidad para realizar un monitoreo continuo y en tiempo real durante las sesiones de entrenamiento. Además, la integración de estos métodos en escenarios prácticos sigue siendo un reto para los equipos deportivos.

A lo largo de este proyecto se diseñó y desarrolló un prototipo de un sistema de monitoreo no invasivo, portátil y de bajo costo, orientado a la detección de variables fisiológicas indirectas asociadas a la fatiga muscular durante un ejercicio de un entrenamiento. Para ello, se integraron sensores biomédicos, circuitos de acondicionamiento de señal, técnicas de procesamiento digital e interfaces de visualización, con el fin de obtener información en tiempo real sobre el estado muscular del atleta.

Durante el desarrollo se abordaron aspectos de instrumentación médica y procesamiento de señales, así como la revisión crítica de herramientas existentes para el monitoreo de la fatiga muscular, seleccionando aquellas viables para su implementación en un entorno controlado. El prototipo fue validado mediante pruebas de laboratorio, y su diseño contó con la aprobación del comité de ética de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, garantizando el cumplimiento de los principios éticos en la experimentación.

Este documento se organiza en varios capítulos. El primero presenta el planteamiento del problema, seguido por la justificación, los objetivos, general y específicos, el marco teórico, la metodología empleada, los resultados obtenidos y su análisis. Finalmente, se incluyen las conclusiones del proyecto y las proyecciones hacia trabajos futuros.

Planteamiento del Problema

Como es ampliamente reconocido, el campo deportivo alberga a una gran cantidad de deportistas a nivel global cuya disciplina, técnica y dedicación inciden de manera significativa en su proyección como profesionales. En este contexto, la fatiga muscular puede ser conceptualizada como “la disminución inducida por el ejercicio en la capacidad para producir fuerza” [14].

Los deportistas de alto rendimiento son aquellos que se desarrollan en la alta competencia y, por tanto, en procesos de preparación deportiva de forma sistemática, con alta exigencia y con el fin de obtener logros sobresalientes [15]. La fatiga muscular es una consecuencia natural de su entrenamiento y se manifiesta a través de dolor, debilidad muscular y una disminución del rendimiento. Esta condición suele surgir tras la realización de ejercicios de alta intensidad o de larga duración [16].

Además, los entrenadores frecuentemente carecen de los medios necesarios para medir con exactitud los niveles de fatiga muscular en sus deportistas durante las sesiones de entrenamiento, lo cual puede provocar sobrecarga muscular y, en consecuencia, aumentar el riesgo de lesiones [17]. En un estudio realizado en Chile sobre lesiones en deportistas universitarios, se realizó un seguimiento a 84 participantes durante un periodo de seis meses, registrando todas las lesiones ocurridas. Una de las más comunes fue la lesión muscular (16,7%). En esta población, fue más frecuente lesionarse durante los entrenamientos que en los partidos. Si bien estos resultados se basan en deportistas universitarios, reflejan que los entrenamientos representan el periodo de mayor frecuencia de lesiones [18].

Estos hallazgos refuerzan la necesidad de contar con un dispositivo o herramienta de monitoreo que permita identificar la presencia y/o ocurrencia de la fatiga muscular durante las sesiones de entrenamiento. Un estudio publicado en el *Journal of Sports Science Medicine* (2018) examinó las causas de lesiones en 600 deportistas de élite de diversas disciplinas. Los resultados revelaron que el 78% de las lesiones ocurrieron durante el entrenamiento, mientras que solo el 22% tuvieron lugar durante las competencias [19].

Aunque existen herramientas y dispositivos que permiten medir parámetros como fuerza, frecuencia cardíaca, frecuencia respiratoria, potencia generada, análisis de movimientos, concentración de lactato y mediciones de carga externa e interna (cuyas disociaciones pueden reflejar el nivel de fatiga del deportista), estas mediciones suelen realizarse en entornos controlados, lo que difiere del entorno cotidiano del deportista y puede generar variaciones significativas en los datos obtenidos [20]. A ello se suman limitaciones técnicas y económicas de los dispositivos actuales, como costos elevados que restringen su acceso y utilidad para deportistas y entrenadores.

Entre las tecnologías disponibles para la monitorización de la carga externa se encuentran dispositivos como el SRM™ y el PowerTap™, que permiten la medición continua de la producción de energía (Jobsen et al., 2009). Para evaluar la carga interna se utilizan pruebas de percepción del esfuerzo (RPE), frecuencia cardíaca, el índice FC-RPE, concentraciones de lactato, calidad del sueño

y cuestionarios [16].

Sin embargo, a pesar de la disponibilidad de estas tecnologías, la falta de conocimiento o experiencia en su aplicación puede impedir la implementación de un sistema de monitoreo práctico. Gran parte de lo que se conoce sobre monitorización proviene de experiencias personales o información anecdótica, lo que revela vacíos importantes en su estandarización y aplicabilidad.

Una monitorización adecuada de la carga de trabajo permitiría determinar si el deportista se está adaptando correctamente al programa de entrenamiento y contribuiría a reducir el riesgo de desarrollar sobreentrenamiento no funcional, patologías o lesiones [16].

Considerando todos estos aspectos, se desarrolló un sistema destinado a facilitar la monitorización efectiva de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento. Este sistema proporciona retroalimentación sobre el desempeño del deportista, lo que permite al entrenador identificar información clave del proceso de entrenamiento y con base en ella, ajustar las cargas, intensidades y tiempos de recuperación.

Justificación

La investigación propuesta se centra en el desarrollo de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento, con el fin de optimizar el rendimiento de deportistas de alto rendimiento, debido a que la fatiga muscular es un factor de riesgo importante para las lesiones deportivas. El aumento del entrenamiento, la fatiga acumulada y la discordancia entre las cargas prescritas y percibidas pueden incrementar considerablemente las lesiones deportivas durante el entrenamiento. [16]

Teniendo esto en cuenta, la fatiga muscular limita el rendimiento en deportistas de alto nivel, y aunque existen varios factores externos influyentes, como el sexo, la temperatura, la calidad de sueño, estado de ánimo y demás, nuestro estudio solo estará enfocado a la fatiga causada por el esfuerzo físico durante los entrenamientos deportivos. [21]

Ahora bien, es fundamental abordar la falta de herramientas precisas y accesibles para medir la fatiga muscular durante el entrenamiento. En la actualidad, la fatiga se evalúa mediante la medición de los niveles de lactato en sangre, la frecuencia cardíaca y diversas encuestas o escalas subjetivas. Esto significa que se emplean métodos que pueden ser invasivos o basados en percepciones personales. [22]

Dicho lo anterior, la fatiga muscular se debe a la disminución de la capacidad de un músculo para generar fuerza o potencia después de un período de actividad, como se muestra en la figura 3.1 [16]

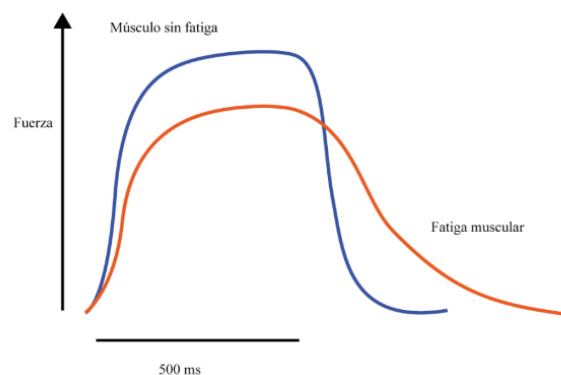


Figura 3.1: Efecto de una estimulación tetánica corta de 50 Hz después de una cansada contracción de 45 s.

En la figura anterior se observa una comparación entre un músculo sin fatiga y uno fatigado,

donde se evidencia la disminución de fuerza a partir del ejercicio. Además, los músculos fatigados son más susceptibles a sufrir daños, y se retrasa la recuperación del cuerpo después del ejercicio, lo que afecta el rendimiento tanto en entrenamientos como en competiciones posteriores [16].

Por otro lado, anualmente en Estados Unidos se registran alrededor de 4 millones de lesiones musculoesqueléticas relacionadas con el deporte, con una tasa de lesión de 15,4 por cada 1000 personas. [23] A pesar de la escasez de estudios en Colombia sobre lesiones deportivas, algunos informes señalan que en el patinaje el 80,8% de los atletas han sufrido lesiones. La figura 2 muestra que tanto mujeres como hombres tienen una mayor incidencia de lesiones por sobreuso que por trauma. Por lo tanto, en nuestro proyecto, orientaremos nuestro enfoque hacia el análisis del sobreuso, sin establecer diferencias basadas en el género. [23]

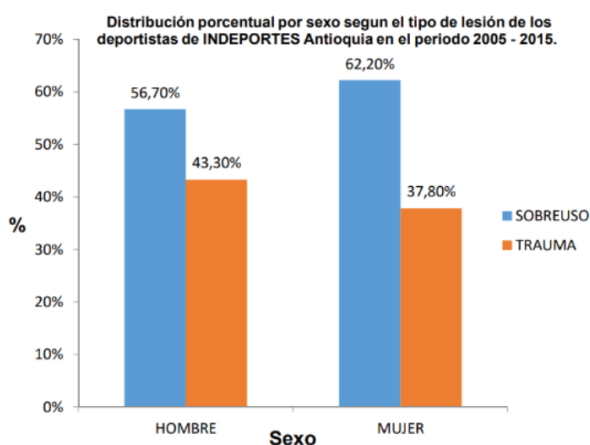


Figura 3.2: Distribución porcentual según el tipo de lesión.

Es crucial comprender que las lesiones deportivas no solo impactan el rendimiento físico, sino que también tienen consecuencias psicológicas significativas en los atletas, afectando su bienestar emocional y mental. Un artículo sobre los efectos psicológicos de las lesiones deportivas señala que el Perfil de Estados de Ánimo (POMS) es una herramienta útil para evaluar los estados emocionales de los atletas: Tensión (T): Indica el nivel de nerviosismo y preocupación. Depresión (D): Evalúa sentimientos de tristeza y desesperanza. Vigor (V): Mide el nivel de energía y entusiasmo. Hostilidad (H): Refleja la ira y la agresividad. Fatiga (F): Indica el grado de cansancio y falta de energía. Confusión (C): Evalúa el grado de confusión mental y falta de claridad. [24]

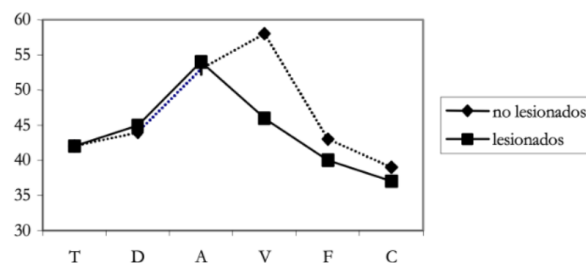


Figura 3.3: Perfiles del POMS en los grupos de lesionados y no lesionados

El análisis de los perfiles del POMS entre deportistas lesionados y no lesionados, como se muestra en la figura, revela diferencias significativas, especialmente en el factor V, relacionado con el rendimiento deportivo. También se evidencian discrepancias en los factores F y C. Comprender cómo las lesiones afectan el estado emocional de los deportistas puede facilitar la identificación temprana de signos de fatiga, permitiendo ajustes oportunos en los programas de entrenamiento. Así, herramientas como el POMS pueden complementar la monitorización fisiológica de la fatiga, proporcionando una visión integral del estado físico y mental del deportista [24].

El diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de fatiga muscular basado en sensores que midan en tiempo real mejorará la comprensión de la relación entre la fatiga muscular y el rendimiento deportivo. Esto facilitará que los entrenadores accedan a información relevante durante los entrenamientos, posibilitando sesiones más eficaces y estrategias de recuperación personalizadas. También permitirá ajustar las cargas de trabajo de forma precisa, reduciendo el riesgo de lesiones y favoreciendo un rendimiento deportivo.

La viabilidad de esta propuesta se fundamenta en la implementación de tecnologías ya establecidas, como la electromiografía, sensores infrarrojos, espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS), bioimpedancia, termografía infrarroja, acelerometría, dinamometría y sensores de deformación blanda, entre otras. Además, el proyecto se respalda en redes de colaboración previamente establecidas en el ámbito deportivo, incluyendo entrenadores de patinaje en Colombia, lo cual garantiza el acceso a deportistas y asegura la pertinencia y aplicabilidad del estudio.

Finalmente, el deporte de alto rendimiento está en constante crecimiento, con un notable aumento en Colombia, alcanzando un valor de \$3.4 billones en 2021 [25]. Este avance se atribuye al incremento en la participación deportiva, la profesionalización del deporte y la mayor inversión tanto pública como privada. Por lo tanto, el diseño del dispositivo propuesto puede influir significativamente en este sector, siendo un componente crucial para su desarrollo y atrayendo el interés de entidades deportivas y gubernamentales que respaldan el deporte en el país.

Objetivos

4.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema portátil de monitoreo de variables indirectas asociadas a la fatiga muscular, mediante el uso de sensores integrados, con el fin de identificar cuál de dichas variables ofrece una mayor capacidad indicativa de fatiga en deportistas de alto rendimiento.

4.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar el conjunto de sensores que cumpla con los criterios de selección en al menos un 90 % con el fin de garantizar la adquisición de señales durante el entrenamiento de deportistas de alto rendimiento.
- Elegir un protocolo de transmisión inalámbrica de señales que asegure la transferencia eficiente y en tiempo real de los datos recolectados para su aplicación en el entrenamiento de deportistas de alto rendimiento.
- Establecer un sistema de almacenamiento para los datos del sistema de monitoreo.
- Comparar el comportamiento de los datos obtenidos a través del sistema de monitoreo con los hallazgos reportados en la literatura, mediante pruebas experimentales controladas.
- Implementar una interfaz de visualización en tiempo real de los datos del sistema de monitoreo.

Marco de Referencia

5.1. Áreas Temáticas

- Fisiología muscular
- Procesamiento de señales biomédicas
- Sensores biomédicos
- Dispositivos de monitoreo wearable

5.2. Marco Teórico

5.2.1. Patinaje

El patinaje es una actividad recreativa y deportiva que consiste en deslizarse sobre una superficie regular mediante unos patines colocados en los pies. Se puede dividir, atendiendo a la superficie utilizada para patinar, en dos grandes categorías: sobre hielo y sobre ruedas. [26]

Dentro de estas modalidades, el patinaje de velocidad se ha consolidado como uno de los deportes más exigentes físicamente en Colombia, donde los atletas alcanzan velocidades que superan los 50 km/h [27] durante las competencias. Esta disciplina impone demandas extraordinarias sobre el sistema músculo-esquelético, especialmente en el vasto lateral del cuádriceps, músculo responsable del 75 % de la fuerza propulsiva durante la fase de empuje [28].

5.2.1.1. Características Fisiológicas del Patinador de Élite

Los patinadores profesionales desarrollan adaptaciones musculares específicas:

- **Capacidad explosiva:** Generan picos de fuerza de hasta 3 veces su peso corporal en cada zancada [29].
- **Resistencia anaeróbica:** Mantienen esfuerzos máximos durante (40-60) segundos en pruebas de 500 m [30].
- **Coordinación neuromuscular:** Ejecutan entre (120-150) zancadas por minuto con precisión milimétrica [31].

Un estudio reciente de la Universidad del Valle [32] con patinadores de la selección Colombia reveló que: «Los atletas de alto nivel presentan una capacidad de recuperación muscular un 30 % superior a deportistas recreativos, permitiéndoles acumular mayores volúmenes de entrenamiento sin sobrecarga».

5.2.1.2. Manifestaciones de Fatiga en Patinaje

1. Técnicos [33]

- Reducción del ángulo de flexión de rodilla ($>8^\circ$)
- Acortamiento de la fase de empuje (de 210 ms a 180 ms)
- Disminución en la frecuencia de zancada (15 % - 20 %)

2. Fisiológicos [34]

- Caída de la saturación de oxígeno muscular (SmO_2) bajo 55 %
- Aumento de lactato sanguíneo (>12 mmol/L)
- Pérdida de coordinación intermuscular

Durante el Campeonato Nacional Juvenil 2023, se observó que el 68 % de los patinadores presentaron fatiga muscular grado II después de pruebas de 1000 m, con una disminución promedio del 42 % en SmO_2 [35].

5.2.1.3. Riesgos Asociados a la Fatiga No Monitorizada

- **Incremento en lesiones:** 23 % tendinitis rotuliana, 17 % desgarros en vasto lateral [12]
- **Pérdida de rendimiento:** Disminución de 1.2 m/s en velocidad cuando $SmO_2 < 55$ % [36]
- **Recuperación prolongada:** Requieren 72 h adicionales cuando se superan umbrales críticos [37]

Lesión	Incidencia	Tiempo promedio de recuperación
Tendinitis rotuliana	23 %	4-6 semanas
Desgarro vasto lateral	17 %	8-10 semanas
Fracturas por estrés	9 %	10-12 semanas

Cuadro 5.1: Incidencia y tiempo de recuperación de lesiones [12]

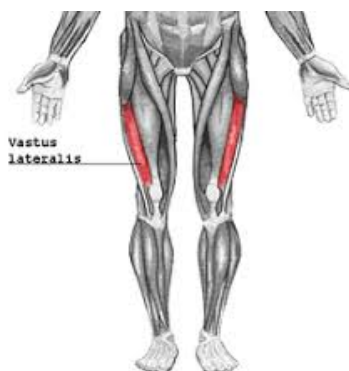


Figura 5.1: Vasto lateral [1]

5.2.1.4. Selección del Músculo: Vasto Lateral del Cuádriceps

Para este estudio se seleccionó el vasto lateral del cuádriceps femoral como músculo objetivo para la medición de variables indirectas de fatiga muscular. Esta elección se sustenta en criterios anatómicos, funcionales y tecnológicos que lo convierten en una región ideal para la aplicación de técnicas no invasivas como la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) y la electromiografía de superficie (sEMG).

El vasto lateral es una de las cuatro porciones del músculo cuádriceps femoral. Se origina en la cara lateral del trocánter mayor, la tuberosidad glútea y el labio lateral de la línea áspera del fémur, insertándose en la base de la rótula a través del tendón del cuádriceps [38]. Su función principal es la extensión de la articulación de la rodilla, siendo fundamental en actividades locomotoras como caminar, correr o pedalear [39]. Su ubicación superficial en la cara anterolateral del muslo favorece el uso de NIRS y EMG, ya que permite la colocación de sensores sin interferencias significativas de tejidos profundos o grasos [40].

La activa participación del vasto lateral durante movimientos de extensión lo convierte en un músculo indicador confiable para evaluar fatiga en contextos deportivos o de rehabilitación [41]. La combinación de EMG y NIRS proporciona una visión integral del comportamiento eléctrico y metabólico del músculo durante el esfuerzo físico.

5.2.2. Ubicación de electrodos para medición electromiográfica del músculo vasto lateral

Para garantizar una medición precisa de la actividad electromiográfica del músculo vasto lateral (VL) mediante electrodos de superficie, es fundamental realizar una correcta ubicación de los mismos, siguiendo tanto lineamientos anatómicos como las especificaciones del módulo utilizado. De acuerdo con Rosso [2] y Wang [3], los electrodos deben ubicarse con una inclinación entre 15° y 20° con respecto a la línea de referencia entre el lado lateral superior de la rótula y la espina ilíaca anterosuperior, alineados en paralelo con las fibras musculares del vasto lateral como se observa en fig.5.2. Esta posición permite captar adecuadamente la actividad del músculo, evitando interferen-

cias de estructuras vecinas como el recto femoral. Además, se recomienda situar los electrodos en la parte central del vientre muscular, lejos de los bordes donde podría haber solapamiento con otros músculos.

De acuerdo con las especificaciones del módulo utilizado (EMG AD8226), se deben conectar tres electrodos al cuerpo del sujeto. El electrodo de referencia debe colocarse en una zona inactiva, preferiblemente ósea, y conectarse al cable negro o marrón del módulo. Los otros dos electrodos deben ubicarse a lo largo del músculo vasto lateral: el primero, conectado al cable rojo, se sitúa en el punto medio del músculo; el segundo, conectado al cable azul, en su extremo distal, como se muestra en la Fig. 5.3. La orientación de los electrodos debe seguir la dirección de las fibras musculares, manteniendo entre ellos una separación aproximada de 2 cm para optimizar la selectividad de la señal y minimizar la interferencia electromiográfica de músculos adyacentes.

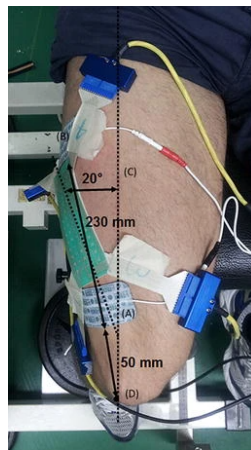


Figura 5.2: Líneas referencia [2]

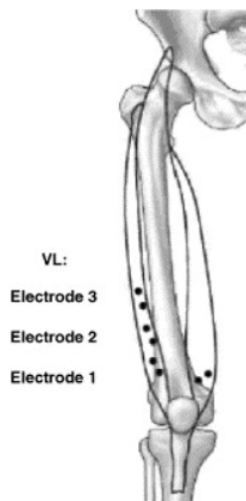


Figura 5.3: Ubicación electrodos [3]

5.2.3. Deportista de alto rendimiento

Para los fines de este estudio, se entiende por deportistas de alto rendimiento a aquellos atletas que participan activamente en competencias a nivel nacional o internacional, que entrenan bajo un régimen estructurado y supervisado por profesionales del deporte, con una frecuencia igual o superior a cuatro sesiones de entrenamiento por semana. Estos deportistas pertenecen a clubes o selecciones, y están expuestos a cargas físicas elevadas propias de sus procesos de entrenamiento competitivo [42].

5.2.4. Actividad física

La actividad física se define como cualquier movimiento corporal producido por los músculos esqueléticos que conlleva un gasto energético superior al del reposo [43]. En este estudio, resulta fundamental comprender cómo la actividad física afectan la dinámica de las señales electromiográficas (EMG) y la saturación de oxígeno muscular (S_{mO_2}), medidas indirectamente mediante sensores de superficie. Durante la contracción muscular inducida por ejercicio físico, se produce un aumento en la actividad eléctrica del músculo, reflejada en variaciones de voltaje captadas por los electrodos de EMG, así como una fluctuación en la oxigenación local registrada por los sensores NIRS. Estos cambios temporales en las señales permiten caracterizar fenómenos como la activación muscular, el consumo de oxígeno y posibles indicios de fatiga muscular.

5.2.5. Fatiga muscular y rendimiento deportivo

En este apartado se explorará la relación entre la fatiga muscular y el rendimiento deportivo, destacando su definición y los factores que contribuyen a su desarrollo. Se evidenciará cómo la fatiga

muscular puede influir en la capacidad de los deportistas para alcanzar su máximo potencial durante la competición.

5.2.5.1. Definición de fatiga muscular y su impacto en el rendimiento deportivo

La fatiga muscular es un fenómeno fisiológico complejo y multifactorial que se manifiesta cuando los deportistas ya no pueden mantener la intensidad de esfuerzo durante el entrenamiento o competencia [16]. Se puede definir como "la disminución transitoria (reversible) de la capacidad de rendimiento" que impide que la actividad deportiva se realice con el volumen, la intensidad, la coordinación o la precisión requerida [16].

La fatiga muscular tiene un impacto significativo en el rendimiento deportivo, ya que puede llevar a una disminución de la fuerza, velocidad, coordinación y precisión de los movimientos. Esto aumenta el riesgo de lesiones por sobrecarga y puede ser un indicador de algún tipo de daño relacionado con el deporte. [44]

Por otro lado, en el contexto de la investigación en un artículo escrito por el Ministerio de Salud en Cuba, se aborda la interrelación entre la actividad física intensa y prolongada, el estrés oxidativo metabólico y sus implicaciones para el rendimiento deportivo. Se destaca la producción de radicales libres oxidativos como resultado de la metabolización de productos finales del ejercicio, fenómeno que se intensifica con la duración y la intensidad del esfuerzo físico, especialmente en el deporte de alto rendimiento. Se subraya la importancia de aspectos como el descanso adecuado, la alimentación balanceada y la gestión del estrés para mitigar los efectos adversos del estrés oxidativo y promover la salud y el rendimiento óptimo en atletas y practicantes de ejercicio físico. [45]

Adicionalmente, el análisis resalta la necesidad de un enfoque integral que considere la relación entre el trabajo, el entrenamiento, el descanso y la recuperación para optimizar el desempeño deportivo y prevenir el agotamiento muscular en el contexto de la actividad física de alta intensidad. [46]

5.2.5.2. Factores que contribuyen a la fatiga muscular durante el entrenamiento y riesgos asociados

La fatiga muscular puede deberse a diversos factores, como un insuficiente período de recuperación después de un trabajo intenso y prolongado, desequilibrios en el metabolismo de los hidrógenos de carbono y proteínas, alteraciones en los niveles de iones y agua, reducción del aporte de oxígeno al músculo, hipoglucemia, desequilibrios electrolíticos, y demás factores que se pueden observar en la figura 5.4 [47]

Como se puede ver en la Figura 5.4 sobre causas de la fatiga muscular.

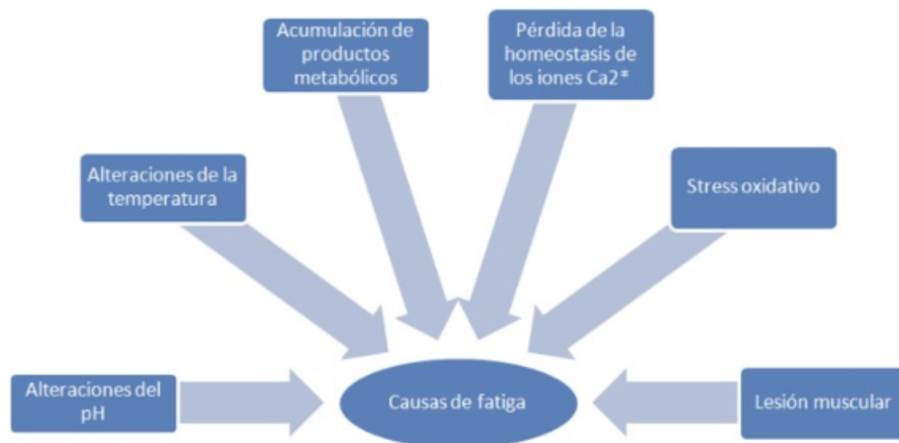


Figura 5.4: Causas de la fatiga muscular. Adaptado de: (LA FATIGA MUSCULAR, n.d.)

Por otra parte, como se explica en dicha imagen, estos factores pueden generar síntomas como cansancio, rigidez muscular, disminución de la coordinación y precisión, aumento de la respiración y la presión arterial, así como alteraciones a nivel sanguíneo y metabólico [47]. La acumulación de estos síntomas y la incapacidad del organismo para recuperarse adecuadamente llevan a un estado de sobreentrenamiento, lo que aumenta mucho el riesgo de lesiones. [17]

5.2.6. Métodos de Evaluación de variables indirectas de Fatiga Muscular

Durante el marco teórico, se analizarán los diferentes métodos utilizados para evaluar la fatiga muscular, destacando sus ventajas, limitaciones y la necesidad de herramientas más precisas y accesibles. Se pondrá énfasis en la importancia de contar con técnicas de evaluación confiables para optimizar el rendimiento deportivo.

5.2.6.1. Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIRS)

La espectroscopía de infrarrojo cercano (Near-Infrared Spectroscopy, NIRS) es una técnica óptica no invasiva que permite evaluar la oxigenación tisular mediante la medición de las concentraciones de oxihemoglobina (HbO_2) y desoxihemoglobina (HbR) en los músculos. Este método se basa en el principio de que la hemoglobina absorbe luz en el rango del infrarrojo cercano (700-1000 nm) de manera diferencial según su estado de oxigenación [48]. Durante la actividad física, los cambios en estas concentraciones reflejan el balance entre el suministro y consumo de oxígeno a nivel muscular, lo que permite identificar estados de fatiga temprana.

- **HbO_2 (Oxihemoglobina):** Es la hemoglobina que está unida al oxígeno. Su concentración refleja la cantidad de oxígeno que llega a los músculos o al cerebro, lo cual es esencial para la producción de energía durante el ejercicio aeróbico.

- **HbR (Desoxihemoglobina):** Es la hemoglobina que ha liberado su oxígeno en los tejidos. Su concentración refleja el oxígeno que ha sido utilizado y liberado en el proceso de metabolismo celular.

Principio de Funcionamiento

El NIRS opera bajo la Ley de Beer-Lambert, que relaciona la atenuación de la luz con las propiedades de absorción de los tejidos. El dispositivo emite luz mediante diodos emisores de luz (LEDs) en longitudes de onda específicas, la cual penetra el tejido muscular ((1-3) cm de profundidad) y es captada por fotodetectores después de la dispersión y absorción. La luz emitida, y recibida permite calcular la saturación de oxígeno (SmO_2), un indicador clave de la fatiga muscular [49].

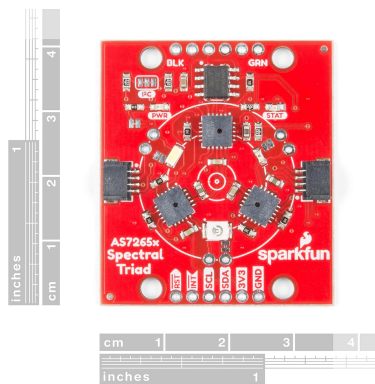


Figura 5.5: Sensor NIRS [4]

Componentes del Sistema NIRS

- Fuente de Luz: LEDs de alta precisión (610-860) nm con drivers para control de intensidad.
- Fotodetectores: Fotodiodos con filtros ópticos para aislar longitudes de onda específicas.
- Electrónica de Acondicionamiento: Amplificadores de transimpedancia para señales en el orden de nanoamperios.
- Conversores analógico-digital (ADC) de 16 bits para resolución adecuada.
- Interfaz de Comunicación: Protocolos I²C/SPI para integración con microcontroladores.

En deportistas, el NIRS detecta:

- Disminución de SmO_2 durante contracciones sostenidas, indicando mayor extracción de oxígeno.
- Retraso en la recuperación post-ejercicio, asociado a deuda metabólica [50].

Limitaciones:

- Profundidad limitada: Solo mide músculos superficiales (ej. vasto lateral).
- La luz del ambiente y el color de piel del usuario en el que se realizará la medición, puede influir generando interferencia al captar la señal.

Para este proyecto, se propone el uso del AS7263 por su:

- Bajo consumo energético (3.3 V, 12 mA en operación).
- Seis canales espectrales para mejorar la precisión.
- Medidas del sensor Medidas del sensor (4,5 mm × 4,7 mm), tamaño ideal para un dispositivo *wearable*. , tamaño ideal para un dispositivo *weareable*.

5.2.7. Electromiografía de Superficie (EMG)

La electromiografía de superficie (sEMG) es una técnica no invasiva que permite registrar la actividad eléctrica generada por los músculos durante la contracción. Estas señales, denominadas potenciales de acción muscular, se originan en las placas motoras y se propagan a lo largo de las fibras musculares, pudiendo ser detectadas por electrodos colocados sobre la piel [51]. En el ámbito deportivo, esta tecnología se utiliza ampliamente para analizar la respuesta neuromuscular durante el ejercicio físico [5].

Gracias a su capacidad para captar en tiempo real la señal eléctrica del músculo, la sEMG permite identificar cambios dinámicos que reflejan la progresión del esfuerzo. Su utilidad se centra en la detección de fatiga muscular, dado que el incremento en la intensidad del esfuerzo suele traducirse en mayores amplitudes de señal.

Principio de funcionamiento del sistema EMG

El sistema desarrollado consta de las siguientes etapas fundamentales:

- **Adquisición de la señal:** Los electrodos de superficie recogen los potenciales eléctricos del músculo evaluado, cuya amplitud oscila típicamente entre 0.1 V y 3.3 V según el nivel de contracción.
- **Acondicionamiento de la señal:**
 - *Amplificación:* Se emplea el amplificador de instrumentación AD8226 [52], diseñado para incrementar la señal sin distorsión y con alta inmunidad al ruido externo.
 - *Filtrado:* Se utilizan filtros pasa banda (20–500) Hz para eliminar el ruido proveniente del movimiento, la interferencia de la red eléctrica y otros componentes no deseados.

Componentes clave del sistema

El AD8226 destaca por sus características técnicas:

- Alta tasa de rechazo de modo común (CMRR >100 dB).
- Bajo nivel de ruido ($8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a 1 kHz).
- Amplio rango de alimentación y configuración de ganancia mediante resistencias externas.

Cambios observados en el voltaje durante el ejercicio

Durante la prueba, se evidenciaron variaciones claras en la señal EMG asociadas al ciclo de ejercicio:

- **Reposo:** Voltajes bajos y estables, por debajo de 0.5 V.
- **Ejercicio:** Aumentos significativos del voltaje, con picos superiores a (2.5-3) V, indicando una mayor activación muscular.
- **Recuperación:** Reducción progresiva del voltaje, sin retornar completamente al nivel basal.

Estas variaciones validan la funcionalidad del sistema para registrar estados de activación y recuperación del músculo, facilitando la identificación de la fatiga inducida por el ejercicio.

Limitaciones del sistema EMG

- La precisión depende en gran medida de la correcta colocación de los electrodos.
- Factores externos como sudoración o movimiento pueden afectar la calidad de la señal.

Integración en el sistema propuesto

El sistema EMG fue incorporado exitosamente en el prototipo final, permitiendo:

- El registro confiable de señales en tiempo real.
- La visualización clara de las fases de esfuerzo y reposo mediante el voltaje.
- La correlación directa con otras variables como saturación de oxígeno y percepción subjetiva.

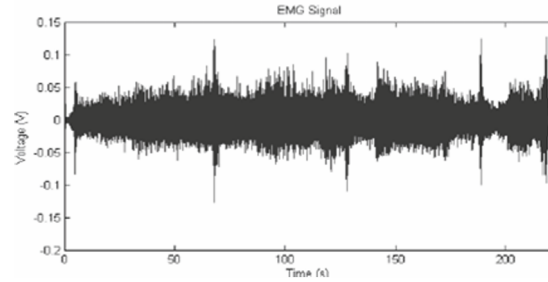


Figura 5.6: Señal SEMG obtenida durante una contracción estática. [5]

5.2.7.1. Sensor de Fuerza Resistivo (FSR)

Los Force-Sensing Resistors (FSR) son transductores piezorresistivos que convierten la fuerza mecánica aplicada sobre su superficie en cambios de resistencia eléctrica. Estos sensores son particularmente útiles en aplicaciones biomecánicas debido a su perfil delgado, bajo costo y alta sensibilidad a cargas estáticas y dinámicas [53]. En el contexto de este proyecto, el FSR se implementará para medir la fuerza de reacción generada por la planta del pie durante actividades cíclicas (ej. pedaleo en bicicleta estática), lo que permitirá inferir cambios en la capacidad de generación de fuerza del cuádriceps (vasto lateral) asociados a fatiga.

Principio de Funcionamiento El sensor FSR opera bajo el principio del efecto piezorresistivo:

- Sin carga: La resistencia es alta ($>1 \text{ M}\Omega$) debido al bajo contacto entre partículas conductoras en la película polimérica.
- Con carga: La presión aplicada (0.1–10) kg comprime el material, aumentando el contacto entre partículas y reduciendo la resistencia (hasta $\sim 1 \text{ k}\Omega$).

La relación fuerza-resistencia no es lineal y sigue aproximadamente la ecuación:

$$R = R_0 F^n \quad (5.1)$$

donde R_0 es la resistencia sin carga, F es la fuerza aplicada y n es un exponente empírico (~ 0.7 para el FSR 406).

Sensor FSR 406 El FSR 406 de la serie Force Sensing ResistorTM 400 de Interlink Electronics es un sensor resistivo de película gruesa polimérica (PTF) que disminuye su resistencia al aumentar la fuerza aplicada sobre su superficie. Con un área sensible cuadrada de 43.69 mm, este sensor está diseñado para aplicaciones que requieren detección de fuerza en un rango amplio (desde toques ligeros hasta presiones intensas). [54]

Circuito Acondicionador Divisor de tensión: Convierte la variación de resistencia en voltaje (0–5 V). Usa una resistencia de medición (R_M) en serie con el FSR: [54]

$$V_{out} = V_{cc} \times \frac{R_M}{R_{FSR} + R_M} \quad (5.2)$$

5.2.7.2. Bioimpedancia

La bioimpedancia eléctrica (BIA) es un método que mide la resistencia y reactancia de los tejidos corporales a través de una corriente eléctrica de baja intensidad y alta frecuencia. Aunque se utiliza principalmente para medir la composición corporal (especialmente el porcentaje de grasa y masa muscular), estudios recientes han explorado su potencial para evaluar la fatiga muscular de manera indirecta. [55]

Durante la fatiga muscular, las propiedades eléctricas del músculo cambian debido a factores como la acumulación de lactato, cambios en el volumen celular y alteraciones en la hidratación intracelular y extracelular. Estos cambios influyen en los valores de bioimpedancia y pueden dar indicios del nivel de fatiga o recuperación.

Sin embargo, este método se utiliza cada vez más para evaluar la eficiencia de la recuperación muscular y para planificar periodos de descanso en atletas de alto rendimiento. Aunque no es tan específico como otros métodos directos (como NIRS o electromiografía), la BIA es útil para obtener un perfil general del estado del músculo y su capacidad de recuperación.



Figura 5.7: Bioimpedancia [6]

5.2.7.3. Termografía Infrarroja

Este método mide la radiación infrarroja emitida naturalmente por la piel, capturando imágenes térmicas que reflejan la temperatura de la superficie. Durante el ejercicio, la actividad metabólica y el flujo sanguíneo en los músculos aumentan, lo que genera calor detectable con cámaras infrarrojas. La fatiga muscular tiende a correlacionarse con variaciones en la temperatura, como un aumento inicial

seguido de una estabilización o disminución debido al agotamiento metabólico y la termorregulación del cuerpo.

En un estudio llevado a cabo por la Technische Universität Kaiserslauter en el año 2021, se evaluó los efectos de la fatiga muscular asimétrica en la temperatura de la piel de músculos abdominales y de la espalda en 41 participantes (22 hombres y 19 mujeres; edad: $22,63 \text{ años} \pm 3,91 \text{ años}$). Los sujetos realizaron flexiones laterales en una silla romana hasta el agotamiento, y las temperaturas de la piel se midieron antes, después y 24 horas después mediante termografía infrarroja.

Los resultados de la figura 2.4 mostraron una disminución significativa de la temperatura después del ejercicio, con recuperación a los niveles iniciales tras 24 horas. Se encontraron diferencias térmicas asimétricas después del ejercicio en las áreas superior e inferior de la espalda y el abdomen, pero no en las mediciones previas ni en el seguimiento. Esto sugiere que la termografía puede ser útil para monitorear la fatiga y la recuperación muscular, así como para diseñar ejercicios de rehabilitación. [7]

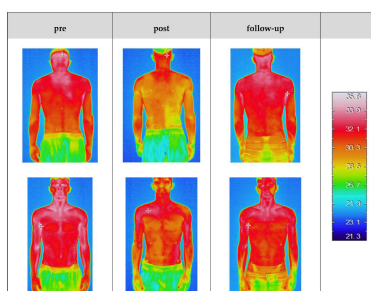


Figura 5.8: Resultados de termografía [7]

5.2.7.4. Acelerometría

La acelerometría es una técnica biomecánica que utiliza sensores para medir aceleraciones en múltiples direcciones, siendo una herramienta clave para evaluar la fatiga muscular de forma no invasiva y en tiempo real. Estos sensores, generalmente parte de las unidades de medición inercial (IMUs), capturan datos en tres ejes (X, Y, Z), lo que permite registrar movimientos dinámicos como correr, caminar o saltar.

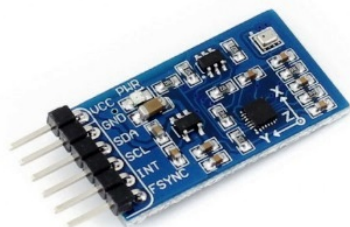


Figura 5.9: Acelerómetro IMU [8]

La fatiga muscular se manifiesta como variaciones en la amplitud, frecuencia y regularidad de las aceleraciones, debido a la disminución del control motor y la fuerza muscular. Sensores como los STATSports Apex, usados en deportes de equipo, y el ActiGraph GT3X+, ampliamente empleado en investigación clínica, ofrecen información precisa sobre patrones de movimiento y fatiga. Por su parte, dispositivos avanzados como el XSens MTw Awinda integran acelerómetros, giroscopios y magnetómetros para un análisis más completo, útil en estudios biomecánicos y clínicos. Estas herramientas son ideales para deportes, donde permiten monitorear el rendimiento y prevenir lesiones, y en rehabilitación, al identificar patrones anormales en pacientes en recuperación. [56]

5.2.7.5. Dinamometría

La dinamometría es una técnica no invasiva que mide la fuerza muscular mediante dispositivos diseñados para evaluar la capacidad de contracción en diferentes condiciones, como ejercicios isométricos, isotónicos o isocinéticos. Este método es ampliamente utilizado en deportes y rehabilitación para evaluar la fuerza máxima, la resistencia muscular y la fatiga. [57]

- **Isométrica:** El músculo genera fuerza sin cambiar su longitud, lo que es ideal para medir la fuerza máxima y la resistencia.
- **Isocinética:** Permite medir la fuerza en movimientos a velocidad constante, lo que es útil para evaluar la potencia muscular en diferentes rangos de movimiento.
- **Fuerza-Tiempo:** Los dinamómetros digitales miden cambios en la fuerza a lo largo del tiempo, lo que permite identificar la velocidad de fatiga mediante parámetros como el índice de fatigabilidad y la resistencia a contracciones sostenidas.

Y de acuerdo a la condición que queramos evaluar, existen varios tipos de dinamómetros, los cuales son: [58]

1. **Dinamómetros isocinéticos:** Dispositivos de laboratorio que miden fuerza concéntrica y excéntrica en articulaciones como la rodilla y el hombro, destacándose por su precisión en estudios biomecánicos.



Figura 5.10: Dinamómetro isocinético [9]

2. **Dinamómetros de agarre:** Evaluados en pruebas de fuerza de mano, frecuentemente utilizados para identificar cambios en la fatiga durante ejercicios sostenidos de contracción máxima.



Figura 5.11: Dinamómetro de agarre [10]

5.2.7.6. Sensores de deformación blandos

Son dispositivos diseñados para medir cambios en la forma y tamaño de los músculos durante la contracción, proporcionando datos no invasivos sobre la actividad y fuerza muscular, se basan principalmente en materiales flexibles y altamente sensibles que permiten el monitoreo en tiempo real de la biomecánica muscular. [59]

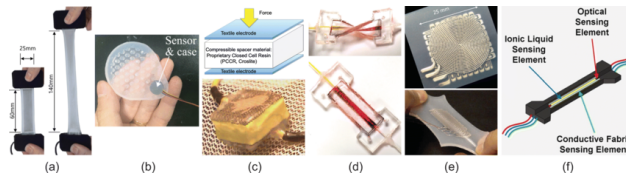


Figura 5.12: Sensor de deformación blando [5]

Estos sensores están hechos de compuestos como fibra de carbono integrada en silicona o poliuretano, los cuales son capaces de detectar cambios en la resistencia eléctrica cuando el músculo debajo de la piel se contrae y deforma. Este cambio es proporcional a la fuerza muscular generada.

Estos sensores se colocan sobre el músculo de interés utilizando adhesivos o se integran en ropa inteligente, lo que permite la monitorización en actividades físicas dinámicas.

Para medir la resistencia eléctrica, estos sensores por medio de circuitos electrónicos simples, convierten las señales de resistencia en datos cuantitativos sobre la deformación muscular y, por ende, la fuerza generada durante contracciones isométricas o dinámicas.

5.2.7.7. Parámetros bioquímicos

Cuadro 5.2: Evaluación de parámetros bioquímicos en la determinación de la fatiga en deportistas de alto nivel

Nombre del marcador bioquímico	Resumen de marcador de fatiga	Fatiga en el deportista
Creatina-fosfoquinasa (CPK)	La creatina-fosfoquinasa es una enzima que se encuentra predominantemente en el corazón, el cerebro y el músculo esquelético.	El ejercicio extenuante provoca daño muscular, evidenciándose en pérdida de fuerza, debilidad, sensibilidad y aumento de los niveles CPK sanguíneos.
Transaminasa Glutamicopirúvica (GPT)	La enzima ALT (GPT) está en el hígado y los riñones y, en una pequeña cantidad, en los glóbulos rojos y en los músculos estriados.	Evalúa el daño muscular relacionado con calambres musculares y el daño hepático relacionado con problemas de afecciones debido al entrenamiento.
Nitrógeno ureico (Bun)	El nitrógeno ureico es lo que se forma cuando la proteína se descompone.	Indicador de la adaptación, asimilación y recuperación del deportista a las cargas de entrenamiento impuestas.
La deshidrogenasa láctica (DHL)	Es una proteína que ayuda a producir energía en el cuerpo.	Evalúa el estado del músculo, su estado bioquímico Y la adaptación a la carga física durante el entrenamiento.

Nota: la tabla muestra los “Métodos para evaluar la fatiga en el deportista”, obtenido del simposio internacional en ciencias de la actividad física, deporte y la salud. [60]

5.2.8. Plataformas de Desarrollo SW

Firestore es una plataforma de desarrollo de aplicaciones creada por Google que proporciona herramientas backend integradas, como bases de datos en tiempo real, autenticación de usuarios, almacenamiento en la nube y funciones de análisis, lo que permite desarrollar aplicaciones móviles y web de forma sencilla y escalable. Flutter es un kit de desarrollo de interfaces gráficas (UI toolkit) también desarrollado por Google, que permite crear aplicaciones nativas multiplataforma (Android, iOS, web y escritorio) a partir de una única base de código escrita en el lenguaje Dart. La integración entre Flutter y Firestore facilita la creación de aplicaciones modernas con interfaces intuitivas, gestión dinámica de datos y sincronización en tiempo real, siendo una combinación especialmente útil en proyectos que requieren interacción continua entre el usuario y la base de datos .

evaluación de la fatiga muscular que sean prácticos, económicos y accesibles en el entorno deportivo.

5.2.10. Consideraciones para la planificación del plan de entreno

En la siguiente sección, se abordarán las consideraciones clave para la planificación del plan de entrenamiento, haciendo hincapié en los principios fundamentales del entrenamiento deportivo. Se resaltarán la importancia de la especificidad, la progresión y la individualización para maximizar el rendimiento y prevenir lesiones en los deportistas de alto nivel.

5.2.10.1. Principios de entrenamiento deportivo

Los principios metodológicos del entrenamiento constituyen un conjunto de pautas generales que guían el proceso de mejora de la aptitud física. Estos principios se sustentan en aspectos biológicos, psicológicos y pedagógicos, según lo señalado por Cañadas y García en 2005 [63].

Los principios del entrenamiento deportivo, incluyendo la especificidad, la progresión y la individualización, son fundamentales para optimizar el rendimiento y minimizar el riesgo de lesiones en los deportistas de alto nivel [63].

Ahora bien, entre dichos principios podemos encontrar los que serán descritos en la siguiente tabla:

Cuadro 5.3: Principios del entrenamiento deportivo

Principios	Descripción
Principio de participación activa y consciente del entrenamiento	El principio de participación activa y consciente del entrenamiento promueve la comprensión por parte de los deportistas del propósito de cada acción durante el entrenamiento. Esto implica analizar movimientos, identificar errores y entender cómo corregirlos para mejorar el rendimiento. Es importante que los deportistas conozcan los resultados de su actividad y los comparen con sus propias impresiones para identificar áreas de mejora. Además, este principio sugiere la elaboración conjunta de objetivos, participación en la planificación de programas de entrenamiento y la realización de pruebas para evaluar el progreso. Una actitud consciente hacia el entrenamiento aumenta el interés y el entusiasmo en las competiciones, contribuyendo a un entrenamiento efectivo y un desempeño exitoso.

Principios	Descripción
Principio de desarrollo multilateral	El principio de desarrollo multilateral es ampliamente reconocido en la educación y el entrenamiento deportivo. Implica la necesidad de exponerse a diversas actividades para adquirir habilidades básicas antes de especializarse. Este principio reconoce la interdependencia entre los sistemas y órganos del cuerpo, así como entre los aspectos fisiológicos y psicológicos. Durante el entrenamiento, es fundamental que se trabaje de manera armoniosa con varios sistemas y capacidades. Aunque este principio es especialmente relevante en niños y jóvenes, no implica que todo su tiempo de entrenamiento se dedique a actividades multilaterales. A medida que un atleta se desarrolla y mejora, su entrenamiento puede volverse más especializado y enfocado en sus habilidades específicas.
Principio de especialización	La especialización deportiva conlleva adaptaciones morfológicas y funcionales específicas. El cuerpo se ajusta a las demandas de la actividad, no solo a nivel físico, sino también técnico, táctico y psicológico. Esta especialización se fundamenta en un desarrollo previo multilateral. A lo largo de la carrera deportiva, el volumen de ejercicios específicos aumenta gradualmente. En el entrenamiento especializado, se distinguen dos enfoques: ejercicios específicos para el deporte y ejercicios para desarrollar capacidades físicas. La proporción entre ambos varía según el deporte practicado, por lo tanto, es crucial planificar cuidadosamente la relación entre el entrenamiento multilateral y el especializado, especialmente debido a la tendencia actual de alcanzar el máximo rendimiento deportivo a una edad más temprana, basado en el potencial funcional más que en la edad cronológica.
Principio de individualización	Este principio implica diseñar programas de entrenamiento personalizados que tengan en cuenta factores como la edad, el sexo, el nivel de habilidad, la experiencia previa en el deporte, la genética, las preferencias personales y los objetivos específicos del deportista. Esto puede implicar ajustes en la intensidad, la duración, la frecuencia y el tipo de ejercicio, así como la progresión del entrenamiento a lo largo del tiempo. Al personalizar el entrenamiento, se puede optimizar el progreso del deportista, mejorar el rendimiento y reducir el riesgo de lesiones, lo que puede conducir a resultados más exitosos a largo plazo.
Principio de variedad	El principio de variedad en el entrenamiento se centra en la necesidad de diversificar las rutinas de entrenamiento para evitar la monotonía y el aburrimiento, especialmente en deportes donde se requiere un alto volumen de entrenamiento. Para mantener la motivación y maximizar el progreso, los entrenadores deben disponer de un amplio repertorio de ejercicios que se ajusten a las demandas técnicas y físicas del deporte.

Principios	Descripción
Principio de modelación del proceso de entrenamiento	Este principio se centra en la planificación y diseño sistemático de un programa de entrenamiento que guíe al deportista desde su nivel actual de rendimiento hasta el logro de sus metas específicas. Este principio reconoce que el progreso en el rendimiento deportivo es un proceso gradual y continuo que requiere una estructura cuidadosa y progresiva. La modelación del proceso de entrenamiento implica también la evaluación continua del progreso del deportista y la adaptación del programa de entrenamiento según sea necesario. Esto puede implicar ajustes en la intensidad, la duración, la frecuencia y el tipo de ejercicio, así como la incorporación de nuevas técnicas o enfoques de entrenamiento a medida que el deportista avanza en su desarrollo.
Principio de aumento progresivo de la carga	El principio de aumento progresivo de la carga implica incrementar gradualmente la intensidad, el volumen y la complejidad del entrenamiento para evitar la adaptación del cuerpo a un nivel constante de esfuerzo. Esta adaptación puede limitar el progreso y, en algunos casos, incluso empeorar el rendimiento físico. Se puede aumentar la carga de manera continua o con fluctuaciones, pero es importante variarla para estimular continuamente el crecimiento y la mejora.
Principio de la continuidad del proceso del entrenamiento	El principio de continuidad del entrenamiento enfatiza la importancia de mantener un proceso de entrenamiento constante a largo plazo para alcanzar un alto rendimiento deportivo. Esto implica encontrar un equilibrio entre el esfuerzo y el descanso, ya que el cuerpo necesita tiempo para recuperarse y adaptarse después del ejercicio. Las interrupciones en el entrenamiento, como lesiones o enfermedades, pueden afectar negativamente el rendimiento, especialmente si se interrumpe un progreso rápido. Los descansos adecuados son necesarios para la recuperación del cuerpo, y la duración óptima de los descansos puede variar según las necesidades individuales.
Principio de unidad entre la preparación general y especial	El principio de unidad entre la preparación general y especial establece la importancia de equilibrar el trabajo de entrenamiento en diferentes etapas. Esto implica dedicar tiempo tanto a la preparación general como a la específica, así como a la obtención y mantenimiento de la forma deportiva y la maestría en el deporte. Algunos entrenadores pueden violar este principio al enfocarse únicamente en resultados rápidos, lo cual puede perjudicar la formación atlética del deportista y acortar su vida deportiva en general.

Principios	Descripción
Principio de las variaciones ondulatorias de las cargas	El principio de variaciones ondulatorias de las cargas se basa en la interacción entre el agotamiento y el restablecimiento del organismo durante el entrenamiento, lo que lleva a un efecto de supercompensación. Se considera la dinámica ondulatoria como esencial para establecer el volumen e intensidad adecuados en diferentes ciclos de entrenamiento. Esta variante implica alternar cargas grandes, medianas y pequeñas para reflejar mejor el equilibrio entre trabajo y descanso. Este método abarca los períodos preparatorios, competitivo y de transición, cada uno con diferentes niveles de volumen e intensidad. La variabilidad en el volumen e intensidad se refleja en las ondas pequeñas, medianas y grandes, respectivamente. Los cambios ondulatorios de las cargas se justifican por las oscilaciones periódicas en la actividad del organismo, la acción conjunta de los procesos de fatiga y recuperación, la adaptación del organismo a la carga y la correlación entre volumen e intensidad de los microciclos de entrenamiento, así como la necesidad de variar los ejercicios y mantener un equilibrio óptimo entre ellos.

En conjunto, la aplicación de estos principios proporciona un marco integral para el diseño y la implementación de un sistema de entrenamiento efectivo que mejore el rendimiento y la salud de los deportistas de alto nivel.

5.3. Marco Ético-Legal

5.3.1. Declaración de Helsinki

El presente estudio se acoge a los principios éticos contemplados en la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial, documento rector de la ética en la investigación con seres humanos [64]. En este marco, se prioriza la protección de los derechos, el bienestar y la dignidad de los participantes, asegurando que estos prevalezcan por encima de los intereses científicos o sociales.

Si bien no se espera un beneficio directo para los participantes, los resultados podrán contribuir a optimizar los planes de entrenamiento en deportistas de alto rendimiento, generando un impacto positivo a nivel poblacional. En consecuencia, la participación se basa en una visión de contribución voluntaria al avance del conocimiento en ciencias del deporte y salud.

Se aplicará un consentimiento informado claro, voluntario y por escrito, previo a la participación en cualquier fase del estudio, incluyendo tanto la etapa de encuestas como la prueba piloto. Este documento detallará el propósito del estudio, los procedimientos, los posibles riesgos, el uso de la información recolectada, y la libertad del participante para retirarse en cualquier momento sin perjuicio alguno.

La investigación se desarrollará por personal capacitado y con experiencia, siguiendo métodos científicos validados, bajo supervisión ética y con salvaguardas que protejan la integridad física, emocional y psicológica de las personas involucradas.

5.3.2. Resolución 8430 de 1993

Este proyecto se ajusta a lo dispuesto por la Resolución 008430 de 1993, emitida por el Ministerio de Salud de Colombia, que regula los aspectos científicos, técnicos y administrativos de la investigación en salud con seres humanos [65].

Según el Artículo 11, este estudio se clasifica como investigación con riesgo mínimo, ya que involucra encuestas y una prueba piloto en condiciones controladas, sin intervenciones invasivas ni procedimientos que representen una alteración significativa del bienestar físico, mental o social de los participantes.

En cumplimiento con el Artículo 5 de esta resolución, se garantizará en todo momento el respeto por la dignidad, privacidad y bienestar de los sujetos de investigación. El estudio se desarrollará bajo parámetros metodológicos sólidos y éticamente responsables, avalados por el Comité de Ética en Investigación de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.

Además, conforme al Artículo 6, antes de iniciar la recolección de datos, se obtendrá: (i) la aprobación formal del Comité de Ética en Investigación, (ii) la autorización de la institución donde se llevará a cabo la prueba piloto, y (iii) el consentimiento informado de los participantes. Se implementarán salvaguardas que garanticen la seguridad física y psicológica de los involucrados.

El tratamiento de los datos personales se hará con estricto cumplimiento del Artículo 8, el cual establece que la confidencialidad de los participantes debe ser protegida. La información recolectada será almacenada de manera segura, con acceso restringido únicamente a los investigadores principales, y no se divulgará de forma que permita la identificación de las personas involucradas.

5.3.3. Directrices Éticas Internacionales CIOMS-OMS

Este estudio también se ajusta a las Directrices Éticas Internacionales para la Investigación en Salud que Involucra a Seres Humanos, emitidas por el Consejo de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas (CIOMS) en colaboración con la Organización Mundial de la Salud (OMS) [66].

Según la Pauta 1, la justificación ética del proyecto radica en su contribución potencial a mejorar la salud y el rendimiento de los deportistas a través de la innovación tecnológica y el monitoreo de la fatiga muscular.

En coherencia con la Pauta 9, se garantiza la equidad en la selección de los participantes, asegurando que la inclusión se base en criterios científicos, no en condiciones de vulnerabilidad, dependencia o facilidad de acceso. Los deportistas invitados a participar serán mayores de edad, con conocimiento previo de sus derechos y con la libertad de aceptar o rechazar su participación sin consecuencias negativas.

Por último, el estudio evaluará cuidadosamente los posibles riesgos y beneficios, conforme a la Pauta 5. Aunque no se prevé un beneficio directo para los participantes, los resultados obtenidos podrían contribuir al diseño de estrategias de entrenamiento más eficientes, lo cual representa un beneficio indirecto para la comunidad deportiva. Se tomarán medidas para minimizar cualquier posible incomodidad durante la prueba piloto, y se establecerán protocolos de atención inmediata en caso de que se presente alguna molestia o evento inesperado.

5.4. Trabajos Relacionados

La fatiga muscular ha sido objeto de estudio en la fisiología del ejercicio y la biomecánica durante décadas. Desde los primeros estudios de A. V. Hill sobre fatiga a principios del siglo XX, se ha comprendido que involucra aspectos tanto periféricos como centrales del sistema neuromuscular. [67] A lo largo de este tiempo, se han desarrollado diversas tecnologías para evaluar y monitorear la fatiga muscular.

En la actualidad, los centros especializados en fisiología del ejercicio emplean tecnologías variadas para esta evaluación. Entre estas se incluyen los ergómetros específicos, como los dinamómetros isocinéticos y los ergómetros de cicloergómetro. [68] Estos dispositivos permiten realizar pruebas controladas de fatiga, analizando la capacidad de generación de fuerza y la resistencia muscular. Sin embargo, algunas técnicas de evaluación pueden resultar invasivas. Por ejemplo, la obtención de biopsias musculares para analizar la composición de las fibras musculares y la actividad enzimática es un procedimiento que implica cierto grado de invasión y requiere habilidades especializadas [69]. Además, la colocación de electrodos para registrar la actividad eléctrica muscular durante el ejercicio puede resultar incómoda para los sujetos evaluados. Por otro lado, en los últimos años han surgido nuevas tecnologías no invasivas para el monitoreo de la fatiga muscular. Dispositivos portátiles basados en electromiografía de superficie (EMG) permiten registrar la actividad eléctrica de los músculos de forma continua durante el ejercicio [70]. Asimismo, sistemas de análisis de imagen como la termografía infrarroja ofrecen información sobre la temperatura muscular y la distribución de flujo sanguíneo, indicativos de fatiga [71]. Además de las tecnologías, diversos investigadores han propuesto modelos teóricos para explicar la fatiga muscular desde perspectivas integradoras. Enoka y Duchateau [68] han desarrollado modelos que consideran aspectos neurales, biomecánicos y metabólicos. También, estudios recientes han explorado el uso de inteligencia artificial y análisis de big data para predecir la fatiga muscular y optimizar programas de entrenamiento. [72] En el 2022, la Universidad Militar de Nueva Granada investigó métodos para evaluar la fatiga muscular, centrándose en entender mejor el proceso de contracción muscular en ese estado. Los resultados son fundamentales para mejorar tratamientos y el rendimiento deportivo. [73] Durante este mismo año, en un programa de doctorado en la Universidad de Extremadura se investigó sobre la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diversos protocolos de entrenamiento de sentadillas. Los resultados mostraron que la fatiga muscular aumentó en todos los protocolos, afectando el rendimiento de los deportistas. [74]

Materiales y Métodos

6.1. Materiales

6.1.1. Componentes

- **Impresora 3D (DREMEL):** Utilizada para la fabricación de piezas estructurales del prototipo.
- **Filamento PLA:** Se empleó ácido poliláctico como material termoplástico para la impresión 3D.
- **Microcontrolador ESP32 DevKit V1:** Encargado de la adquisición, procesamiento y transmisión de las señales provenientes del sistema EMG y del sensor NIRS.
- **Módulo EMG:** Sensor de electromiografía para la adquisición de señales eléctricas musculares, con salida analógica de señal cruda.
- **Sensor NIRS (SparkFun – AS7263):** Sensor espectral de infrarrojo cercano para la medición de parámetros ópticos asociados a la oxigenación muscular.
- **Jumpers:** Cables de conexión utilizados para integrar los distintos módulos en el protoboard y la PCB.
- **PCB:** Placa de circuito impreso utilizada para la integración final de los componentes electrónicos.
- **Tela antifuído:** Utilizada como recubrimiento en las piezas impresas en 3D que están en contacto con la piel, facilitando su limpieza y garantizando higiene.
- **Espuma:** Añadida en zonas de contacto para mejorar la comodidad del usuario durante el uso del prototipo.
- **Velcro y resorte:** Empleados para ajustar el dispositivo al cuerpo del deportista de forma segura y flexible.
- **Electrodos:** Utilizados para la detección de señales eléctricas musculares en conjunto con el módulo EMG.
- **Protoboard:** Utilizado durante la fase inicial de pruebas y prototipado del circuito electrónico.

- **Placa PCB para EMG (fase inicial):** En esta etapa se ensambló un circuito prototipo con los siguientes componentes:
 - **Resistencias de precisión:**
 - 2 de 390 k Ω , 1 de 10 k Ω , 3 de 2.7 k Ω , 1 de 100 k Ω , 1 de 27 k Ω
 - 1 de 620 k Ω , 1 de 4.7 k Ω , 1 de 82 k Ω , 3 de 100 Ω , 2 de 2.2 k Ω
 - 2 de 5.6 k Ω , 1 de 1.2 k Ω
 - 2 trimpots de 20 k Ω
 - **Condensadores cerámicos/poliéster:**
 - 6 de 100 nF, 3 de 47 nF
 - **Condensadores electrolíticos:**
 - 3 de 100 μ F, 1 de 1 μ F
 - **Amplificadores operacionales:**
 - 3 TL072, 2 TL084, 2 INA128
 - **Otros componentes:**
 - 3 borneras de 2 pines (color azul)
 - 3 bases para integrados de 8 pines (TL072)
 - 1 base para integrado de 14 pines (TL084)

6.1.2. Herramientas

- **Computador portátil:** Herramienta principal para programación, diseño, análisis y documentación durante todo el desarrollo del proyecto.
- **Instrumentación de laboratorio:** Se utilizaron osciloscopio, multímetro, fuente de voltaje, pilas, estación de soldadura y estaño para pruebas, montaje y validación del circuito electrónico.
- **Bases de datos IEEE Xplore, PubMed y Google Scholar:** Consultadas para la búsqueda de literatura científica y sustento teórico del proyecto.
- **Software Autodesk Fusion 360:** Empleado para el diseño y modelado tridimensional de las estructuras del sistema.
- **Lenguaje Dart y framework Flutter:** Utilizados para el desarrollo de la aplicación móvil que permite visualizar y registrar datos fisiológicos.
- **Firestore Realtime Database:** Plataforma empleada para el almacenamiento estructurado de sesiones y parámetros fisiológicos.
- **Google Forms:** Utilizado para la elaboración y aplicación de encuestas dirigidas a usuarios y entrenadores.

- **Microsoft Word:** Usado para la elaboración de documentos administrativos y de gestión ética, incluyendo los formatos del Comité de Ética.
- **Arduino IDE:** Ambiente de desarrollo utilizado para la programación del microcontrolador ESP32.

6.2. Metodología

6.2 Metodología

El desarrollo de este proyecto se estructuró en una serie de etapas metodológicas diseñadas para abordar de forma integral el diseño, implementación y validación de un sistema de monitoreo de fatiga muscular. A partir de la identificación de necesidades por parte de entrenadores y deportistas, se establecieron requerimientos funcionales y no funcionales que guiaron la toma de decisiones en el diseño del prototipo.

Con base en estos requerimientos, se aplicaron herramientas de análisis como la casa de calidad, que permitió priorizar características clave en la selección de sensores y componentes tecnológicos. Posteriormente, se desarrollaron módulos electrónicos, software y estructuras físicas para integrar los sensores EMG y NIRS dentro de un sistema capaz de capturar, transmitir y visualizar datos fisiológicos en tiempo real.

Cada etapa del proceso fue validada mediante pruebas preliminares en laboratorio y una prueba piloto controlada, orientada a evaluar la factibilidad técnica del sistema. Asimismo, se adoptó un enfoque metodológico mixto que combinó la recopilación de datos cuantitativos mediante sensores con información cualitativa obtenida a través de encuestas, con el fin de correlacionar variables fisiológicas con la percepción subjetiva de la fatiga muscular.

Etapas 1: Revisión Bibliográfica y Definición de Objetivos

Durante la primera etapa del proyecto se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de literatura científica y técnica a través de bases de datos como *PubMed*, *IEEE Xplore* y *Google Scholar*, con el propósito de identificar información relevante sobre la fatiga muscular y los métodos existentes para su monitoreo. En paralelo, se realizó una revisión de patentes con el fin de detectar tecnologías previamente desarrolladas relacionadas con la medición de la fatiga muscular, evitando así duplicidades y aprovechando oportunidades de innovación.

6.2.1. Aplicación de Encuestas

Como complemento a la revisión de literatura y al diseño conceptual del sistema, se diseñaron y aplicaron encuestas dirigidas a entrenadores y deportistas. El objetivo de esta actividad fue conocer de primera mano sus necesidades y percepciones sobre la fatiga muscular, reconociendo que la dimensión subjetiva también es un aspecto importante en su evaluación. La información obtenida permitió orientar el diseño del dispositivo hacia un enfoque centrado en el usuario.

6.2.1.1. Criterios de Inclusión y Exclusión (Encuestas)

Con el fin de asegurar la pertinencia y validez de los datos recolectados en esta fase del estudio, se definieron criterios específicos de inclusión y exclusión, aplicables exclusivamente a los participantes de las encuestas. La delimitación precisa de estos criterios permitió establecer una población objetivo coherente, garantizando la calidad metodológica y el control de variables externas que pudieran afectar la interpretación de los resultados.

Criterios de inclusión

- Tener entre 12 y 65 años de edad.
- Aceptar voluntariamente participar en el estudio y autorizar el uso de la información con fines investigativos.
- Para los deportistas: haber participado en sesiones de entrenamiento estructuradas durante al menos los últimos seis meses. Esta condición garantiza una continuidad en la exposición al estímulo físico y permite una evaluación más precisa de la percepción de fatiga [75].
- Para los entrenadores: tener experiencia en la planificación y monitoreo del rendimiento físico de deportistas, lo que asegura una perspectiva informada sobre las variables relacionadas con la carga y la recuperación [76].

Criterios de exclusión

- Tener menos de 12 años o más de 65 años.
- No haber participado recientemente en entrenamientos activos (en el caso de deportistas).
- No desempeñar funciones relacionadas con el diseño o supervisión de entrenamientos (en el caso de entrenadores).
- Negarse a participar o no completar la encuesta de manera voluntaria.

Con la información obtenida a partir de las encuestas, diseñadas para recopilar percepciones subjetivas sobre la fatiga muscular y las estrategias actualmente utilizadas para su manejo, se identificaron aspectos clave relacionados con la experiencia de los usuarios. Los participantes de este estudio fueron entrenadores y deportistas. Los entrenadores, como responsables del desarrollo y planificación de los entrenamientos, proporcionaron información relevante sobre los métodos empleados para evaluar y gestionar la fatiga muscular. Por su parte, los deportistas aportaron datos relacionados con su experiencia directa, los síntomas percibidos durante las sesiones de entrenamiento y las estrategias de recuperación utilizadas.

Para guiar el desarrollo del prototipo, se definieron una serie de requerimientos derivados de esta información, los cuales sirvieron de base para la selección de tecnologías y diseño del sistema.

6.2.2. Requerimientos del sistema

A partir de las encuestas realizadas a los deportistas, fue posible identificar y definir los requerimientos tanto funcionales como no funcionales necesarios para el desarrollo del sistema de monitoreo de la fatiga muscular. Estos requerimientos incluyeron aspectos como la precisión en la medición, la comodidad durante el uso, la durabilidad del dispositivo, la facilidad de interpretación de los datos y la integración con otras herramientas tecnológicas. Con base en esta información, se llevó a cabo un análisis estructurado mediante la metodología de la Casa de la Calidad (QFD), lo que permitió priorizar los requerimientos según su impacto en la satisfacción del usuario y la viabilidad técnica. De esta manera, se pudo determinar cuáles características eran imprescindibles en el diseño del sistema y cuáles podían considerarse secundarias o prescindibles según el contexto de uso.

Etapa 2: Selección de Sensores

Esta etapa comprendió una investigación detallada y una evaluación comparativa de sensores disponibles en el mercado. Se inició con una exploración de distintas opciones, para guiar la toma de decisiones, herramienta que permitió analizar en qué medida las características técnicas de los sensores cumplían con los requerimientos priorizados por los usuarios.

Posteriormente, se realizó un análisis comparativo entre distintas tecnologías de sensores disponibles para el monitoreo de variables fisiológicas relacionadas con la fatiga muscular. Para ello, se elaboró una tabla de evaluación que incluyó múltiples criterios como precisión, costo, facilidad de integración, tamaño, consumo energético y compatibilidad con dispositivos portátiles. A cada criterio se le asignó un peso relativo según su importancia, y se evaluaron diferentes opciones de sensores en función de estos parámetros. Este proceso permitió respaldar de manera objetiva la selección final de las tecnologías más adecuadas para el sistema, resultando en la elección de dos sensores principales: uno basado en espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) para medir la saturación de oxígeno muscular, y otro de electromiografía de superficie (EMG) para capturar la actividad eléctrica del músculo.

Etapa 3: Desarrollo del Sistema de Transmisión

En esta fase se evaluaron diferentes tecnologías de transmisión inalámbrica con el objetivo de garantizar una transferencia de datos eficiente y en tiempo real desde los sensores hacia el sistema de almacenamiento. Se consideraron alternativas como Bluetooth y Wi-Fi, analizando aspectos clave como la velocidad de transmisión, el alcance operativo, el consumo energético y la compatibilidad con dispositivos móviles.

Tras realizar las pruebas correspondientes, se determinó que la tecnología Wi-Fi era la más adecuada para el sistema. Esta decisión se basó en su alta tasa de transferencia, su estabilidad en entornos dinámicos como los entrenamientos y su integración efectiva con el microcontrolador utilizado, así como con la base de datos en tiempo real implementada. Además, su compatibilidad con redes móviles facilita el uso del sistema desde distintos dispositivos durante la actividad física.

Etapa 4: Implementación del Sistema de Almacenamiento

Para esta etapa se investigaron diversas plataformas de almacenamiento en la nube, priorizando el cumplimiento de criterios como seguridad, confidencialidad y accesibilidad de los datos recolectados. Se seleccionó Firebase como plataforma de almacenamiento, empleando tanto su servicio de Cloud Storage como su Realtime Database. Esta elección respondió a su alta compatibilidad con la

arquitectura del sistema y su capacidad para sincronizar datos de forma eficiente, rápida y segura.

Etapa 5: Diseño de la Interfaz de Visualización

Finalmente, se diseñó una interfaz móvil interactiva enfocada en la visualización en tiempo real de los datos fisiológicos obtenidos. El proceso inició con un análisis de interfaces existentes, identificando aquellas compatibles con los sensores seleccionados y las tecnologías de transmisión adoptadas. Luego, se realizaron pruebas de compatibilidad para asegurar una integración fluida entre los datos generados y la interfaz en desarrollo.

La interfaz fue configurada e implementada teniendo en cuenta las necesidades específicas de los usuarios finales, siendo estos los entrenadores y posteriormente ajustada con base en la retroalimentación obtenida durante las pruebas funcionales. La herramienta empleada fue Flutter, un framework de desarrollo multiplataforma que facilita la creación de aplicaciones móviles modernas y eficientes. Flutter opera con el lenguaje Dart, el cual combina características de lenguajes como C++ y Java, ofreciendo un entorno robusto para el desarrollo de interfaces conectadas directamente con Firebase.

Etapa 6: Integración de sensores con componentes electrónicos

Previo a la evaluación funcional del sistema, se desarrolló un prototipo inicial con el objetivo de integrar los sensores seleccionados junto con los componentes electrónicos necesarios para su funcionamiento. Para ello, se diseñó una placa de circuito impreso (PCB) que permitió la conexión estructurada de los elementos del sistema, facilitando la captura, procesamiento y transmisión de las señales fisiológicas.

Además, se realizó un modelado tridimensional básico utilizando el software Fusion 360, con el fin de fabricar una carcasa mediante impresión 3D en impresora Dremel. Este diseño, orientado exclusivamente a pruebas de ensamblaje y validación electrónica, sirvió como soporte físico provisional para alojar el hardware del sistema durante las primeras fases de prueba. No se consideraron aún criterios ergonómicos ni de adaptación corporal en esta etapa, dado que el enfoque se centró en comprobar la funcionalidad del sistema electrónico integrado.

Una vez ensamblado el prototipo, se procedió a verificar su funcionamiento en un entorno simulado, asegurando la operatividad conjunta de los módulos de adquisición, transmisión, almacenamiento y visualización de datos. Esta verificación resultó fundamental para validar la arquitectura del sistema y avanzar hacia la etapa de pruebas controladas.

Etapa 7: Pruebas y Evaluación del Sistema

La etapa final del proyecto consistió en la ejecución de pruebas piloto de rendimiento del sistema completo bajo condiciones controladas de laboratorio, validando así su funcionalidad.

Durante esta fase, se evaluó el desempeño general del sistema, incluyendo la precisión de los sensores, la estabilidad de la transmisión inalámbrica, la integridad del almacenamiento en la nube y la correcta visualización de datos en tiempo real.

6.2.2.1. Pruebas piloto

Criterios de inclusión:

- Ser deportista activo del Club de Patinaje Huellas.
- Tener entre 12 años y 19 años de edad, rango que corresponde al grupo poblacional con el cual se espera implementar el sistema en el futuro cercano. Este grupo presenta características fisiológicas particulares del proceso de maduración, siendo ideal para evaluar la factibilidad y tolerancia de la prueba en contextos reales de entrenamiento deportivo [77].
- Haber participado regularmente en entrenamientos de alta intensidad durante los últimos seis meses. Esta condición permite asegurar que el deportista se encuentra en un nivel adecuado de adaptación al esfuerzo físico, lo cual es fundamental para la obtención de datos confiables [75].
- No presentar lesiones musculares activas o condiciones médicas que interfieran con la prueba.
- Aceptar voluntariamente participar en la prueba piloto y contar con el consentimiento informado firmado por sus representantes legales, en cumplimiento de las normas éticas vigentes para investigación con menores de edad [65, 78].
- Comprometerse a cumplir con las condiciones previas a la prueba (mínimo 8 horas de sueño, abstinencia de alcohol, psicoactivos o suplementos que puedan alterar la percepción o respuesta fisiológica a la fatiga) [79].

Criterios de exclusión:

- Presentar alguna lesión o condición médica que limite el desempeño físico durante la prueba.
- No pertenecer al rango de edad definido (12 años a 19 años).
- No cumplir con las condiciones establecidas para la prueba.
- No contar con el consentimiento informado del acudiente o retirarse voluntariamente en cualquier etapa.

La elección de trabajar con un grupo reducido de máximo dos deportistas adolescentes responde tanto a la viabilidad operativa del estudio como a su naturaleza exploratoria. Esta estrategia facilita la logística del experimento, reduce el riesgo asociado y permite un monitoreo cercano del proceso. En estudios piloto, muestras pequeñas son consideradas adecuadas cuando el objetivo es evaluar la factibilidad y ajustar procedimientos antes de realizar una investigación a mayor escala [80].

6.2.3. Población y Selección Justa de Participantes

La población objetivo de este estudio está compuesta por miembros activos del Club de Patinaje Huellas, incluyendo tanto a deportistas como a entrenadores. Esta población ha sido seleccionada intencionalmente debido a su familiaridad con rutinas de entrenamiento estructuradas y a su potencial interés en herramientas que optimicen la planificación y monitoreo del rendimiento físico.

El proyecto se divide en dos componentes principales: encuestas y pruebas piloto, cada uno con propósitos distintos y con roles específicos asignados a los participantes.

- **Deportistas:** participarán tanto en la aplicación de encuestas como en las pruebas piloto. En las encuestas, aportarán información subjetiva relacionada con su experiencia de entrenamiento y percepción de fatiga. En la prueba piloto, se trabajará con un grupo focal compuesto por máximo dos deportistas adolescentes. La elección de un grupo reducido responde a criterios de accesibilidad y viabilidad, y busca facilitar el monitoreo detallado de cada caso dentro de una primera aproximación exploratoria del sistema propuesto.
- **Entrenador:** los entrenadores del Club de Patinaje Huellas participarán en ambas fases del estudio. En las encuestas, ofrecerán su perspectiva técnica y subjetiva sobre el monitoreo de la fatiga. En las pruebas piloto, cumplirá sólo un entrenador un rol de supervisión directa durante las sesiones de recolección de datos, garantizando el cumplimiento del protocolo, el plan de entreno y la seguridad de los deportistas.

La selección de participantes sigue el principio de equidad y pertinencia científica, considerando la capacidad de cada grupo para aportar información relevante al estudio. Aunque el grupo focal de la prueba piloto es pequeño y no pretende representar a toda la población, su función es proporcionar retroalimentación inicial sobre la viabilidad del dispositivo desarrollado, en condiciones reales de uso. Esta estrategia es común en estudios de tipo exploratorio con enfoque técnico [81].

Todos los participantes serán seleccionados conforme a criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos, garantizando una participación justa, voluntaria y libre de coerción, en concordancia con los principios de la ética en investigación biomédica [65, 78].

6.2.4. Tipo de Estudio

El presente proyecto se enmarca en el campo de la ingeniería biomédica, adoptando un enfoque integrador que combina conocimientos en diseño electrónico, procesamiento de señales y evaluación fisiológica. Se propone la implementación de un dispositivo destinado a medir indicadores asociados a la fatiga muscular, empleando principios de tecnologías avanzadas para la adquisición y análisis de datos.

La metodología se centra en la selección de sensores adecuados para captar señales que permitan medir variables indirectas de la fatiga muscular. Además, se realizarán encuestas dirigidas a entrenadores y deportistas para recopilar percepciones subjetivas sobre la fatiga muscular. Como parte

del estudio, se llevará a cabo una prueba piloto en un deportista con el fin de obtener y analizar datos, lo que permitirá aproximarse a la caracterización de la fatiga muscular durante el entrenamiento.

El proyecto está orientado al desarrollo de un prototipo funcional a nivel de laboratorio, considerando tanto los aspectos técnicos como las implicaciones éticas y legales. En cuanto a estas últimas, se garantiza el cumplimiento de regulaciones aplicables, la protección de datos personales y la confidencialidad de las opiniones recolectadas mediante encuestas. A futuro, se pretende que los datos relacionados con la fatiga muscular o las métricas específicas de cada paciente sean tratados de forma estrictamente confidencial, asegurando su protección mediante protocolos avanzados de seguridad en el desarrollo del software. Esto incluye la implementación de controles de acceso para garantizar la integridad y privacidad de la información durante su almacenamiento y análisis.

6.3. Diseño Metodológico: Enfoque Mixto

El presente estudio adopta un enfoque mixto con el fin de obtener una comprensión más completa del fenómeno de la fatiga muscular durante el entrenamiento deportivo. Esta metodología integra de manera sistemática métodos cuantitativos y cualitativos, lo que permite una integración de datos que fortalece la validez de los hallazgos. La combinación de ambas perspectivas facilita la correlación entre datos objetivos, como los registrados por sensores, y las interpretaciones subjetivas obtenidas mediante encuestas o entrevistas. Así, se posibilita la identificación de patrones, tendencias y factores subyacentes que influyen en el rendimiento y en el diseño de estrategias más efectivas de entrenamiento y recuperación en deportistas de alto rendimiento [74].

6.3.1. Componente Cualitativo

El componente cualitativo se implementará a través de encuestas estructuradas aplicadas a los deportistas y entrenadores del Club de Patinaje Huellas. Estas encuestas incluirán preguntas de múltiple respuesta y preguntas abiertas, diseñadas para captar la percepción subjetiva de la fatiga muscular. Las dimensiones consideradas incluyen:

- Percepción del esfuerzo físico y mental.
- Percepción de dolor muscular.

Las respuestas cuantitativas serán tratadas estadísticamente (frecuencias, medias, etc), mientras que las respuestas cualitativas se analizarán para identificar patrones narrativos.

6.3.2. Componente Cuantitativo

El componente cuantitativo se desarrollará mediante una prueba piloto con dos deportistas del Club de Patinaje Huellas. Se recopilarán variables indirectas de fatiga muscular mediante sensores fisiológicos:

- **NIRS (Espectroscopía del Infrarrojo Cercano):** Para evaluar la oxigenación muscular (variables: saturación de oxígeno tisular y hemoglobina total).
- **EMG (Electromiografía de Superficie):** Para medir la actividad eléctrica del músculo en contracción (variables: amplitud de la señal en voltios).

La prueba consistió en la realización de una sentadilla profunda e incluyó tres fases: una fase inicial de reposo, una fase central con esfuerzos controlados y una fase final de recuperación activa. Durante toda la prueba se registraron en tiempo real las señales fisiológicas mediante sensores NIRS y EMG. Los datos obtenidos fueron analizados mediante visualizaciones gráficas y estadística descriptiva, con el propósito de identificar tendencias y patrones asociados a la aparición de fatiga muscular.

6.3.3. Ejercicios durante el entrenamiento para el estudio de la fatiga muscular

Previo a la toma de datos, se establecieron una serie de condiciones que debían ser cumplidas por cada participante con el fin de asegurar la validez de los resultados obtenidos. Cada sujeto se comprometió a seguir los lineamientos definidos para la realización de las pruebas, entre los cuales se incluyó haber tenido un descanso adecuado, con al menos ocho horas de sueño la noche anterior. Asimismo, se solicitó evitar el consumo de bebidas alcohólicas, sustancias psicoactivas o suplementos que pudieran alterar el rendimiento fisiológico durante las mediciones.

El protocolo de ejercicio fue diseñado por un entrenador profesional en patinaje, quien proporcionó una rutina compuesta por distintos ejercicios físicos. No obstante, únicamente se realizaron sentadillas profundas, ya que este ejercicio fue seleccionado específicamente por su capacidad de inducir condiciones fisiológicas relacionadas con la fatiga muscular. La ejecución de las pruebas piloto se llevó a cabo bajo condiciones controladas. La elección y aplicación de las actividades físicas se realizó de forma conjunta entre el entrenador y el equipo investigador, con el objetivo de estudiar variables indirectas asociadas a la fatiga de manera controlada y reproducible.

6.3.4. Integración de Resultados

Ambos tipos de datos, cuantitativos y cualitativos se integrarán mediante un análisis complementario que busca correlacionar los resultados fisiológicos de los sensores con las percepciones subjetivas recogidas en las encuestas. Esta triangulación permitirá interpretar, por ejemplo, si valores elevados de fatiga muscular en el EMG coinciden con una alta percepción de esfuerzo por parte del deportista.

La inclusión de un enfoque mixto no solo responde a una necesidad metodológica, sino también a una comprensión holística del rendimiento deportivo, que integra cuerpo, experiencia y contexto [74].

Resultados y Discusión

7.1. Resultados y Discusión

7.1.1. Descripción general del experimento

Como punto de partida, se aplicaron dos encuestas dirigidas a entrenadores y deportistas de alto rendimiento, con el objetivo de identificar sus necesidades, prioridades y percepciones en torno al monitoreo de la fatiga muscular. Esta información fue fundamental para orientar el diseño del sistema y asegurar su pertinencia en contextos reales de entrenamiento.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas piloto controladas con el objetivo de medir variables fisiológicas asociadas a la fatiga muscular durante la realización de sentadillas profundas. El análisis se centró en tres fases: reposo, ejecución de la sentadilla y recuperación. Para ello, se emplearon dos sensores principales: un módulo de espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS) para medir la saturación de oxígeno muscular (SmO_2), y un módulo de electromiografía de superficie (EMG) para registrar la actividad eléctrica del músculo.

En el caso del sensor NIRS, se utilizó un módulo comercial que permitió realizar mediciones continuas de SmO_2 a lo largo de las diferentes fases del ejercicio. En cuanto al sistema EMG, durante la fase inicial del desarrollo se construyó un prototipo desde cero, utilizando una placa de circuito impreso y componentes electrónicos personalizados. En esta etapa se diseñaron, implementaron y probaron filtros, amplificadores y sumadores con el fin de obtener una señal muscular adecuada. Sin embargo, mientras se gestionaba la adquisición de un módulo EMG comercial, este sistema propio permitió avanzar en las pruebas preliminares. Finalmente, con el objetivo de mejorar la portabilidad, la estabilidad de la señal y la integración con la interfaz del sistema, en la versión final del prototipo se incorporó un módulo EMG de tipo comercial.

7.1.2. Resultados de las encuestas a entrenadores

El análisis de las encuestas realizadas a entrenadores deportivos permitió identificar aspectos clave sobre la percepción y viabilidad del sistema de monitoreo desarrollado. Los resultados son presentados en gráficos y discutidos a continuación.

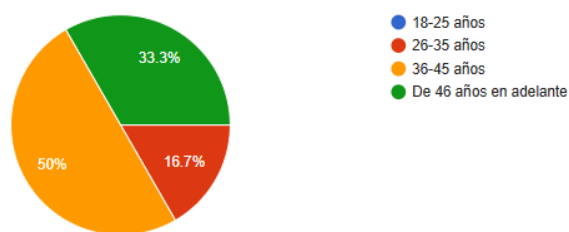


Figura 7.1: Edad de los entrenadores

La distribución etaria de los entrenadores encuestados muestra una mayor proporción entre los 36 años y 45 años (50 %), seguidos por el grupo de 46 años en adelante (33.3 %), y un porcentaje menor entre los 26 años y 35 años (16.7 %). Este perfil sugiere una población con experiencia consolidada en el ámbito deportivo, lo que otorga un respaldo significativo a las valoraciones obtenidas sobre el sistema propuesto, ya que provienen de profesionales con criterio técnico formado en el campo.

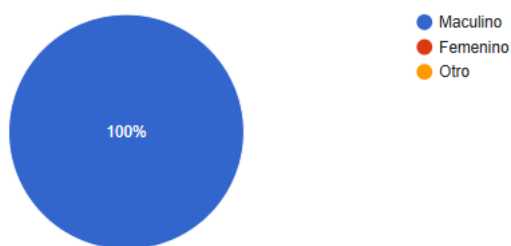


Figura 7.2: Sexo

El 100 % de los entrenadores participantes se identificó como masculino. Si bien este dato no tiene un impacto directo en la funcionalidad del sistema, resalta una limitación en cuanto a la representatividad de género en la muestra, lo cual podría considerarse para futuros estudios con el fin de obtener una visión más diversa.

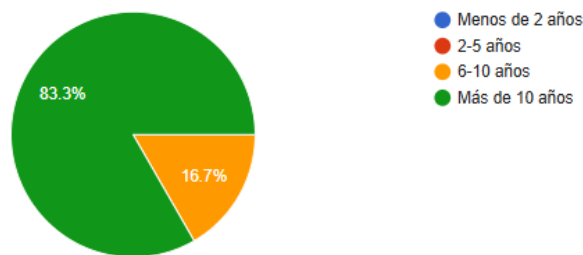


Figura 7.3: Años de experiencia de los entrenadores

La mayoría de los encuestados (83.3%) reportó más de 10 años de experiencia, mientras que el 16.7% indicó tener entre 6 años y 10 años. Este dato es particularmente relevante, ya que evidencia que las opiniones recogidas provienen de entrenadores con conocimiento profundo en la planificación, monitoreo y evaluación de cargas de trabajo, lo que fortalece la confiabilidad de las observaciones emitidas sobre la utilidad del sistema.

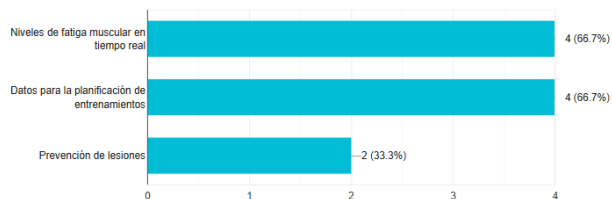


Figura 7.4: Datos relevantes

Entre los datos considerados más útiles por los entrenadores, se destacan la medición en tiempo real del nivel de fatiga muscular y la generación de información para la planificación de entrenamientos, ambos con un 66.7%. Asimismo, un 33.3% resaltó la prevención de lesiones como un beneficio clave. Esto confirma que el sistema no solo cumple una función diagnóstica, sino que también representa una herramienta estratégica para el diseño de sesiones de entrenamiento más seguras y efectivas.

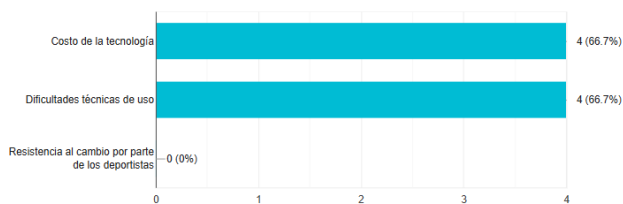


Figura 7.5: Problemas para la implementación de un sistema de monitoreo de fatiga muscular

Los principales desafíos para la implementación de un sistema como el desarrollado fueron el

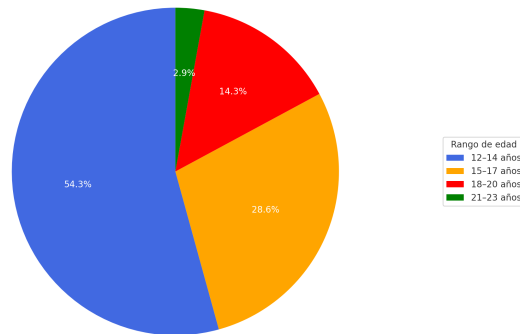


Figura 7.7: Edad

costo de la tecnología y la dificultad técnica de uso, ambos señalados por el 66.7% de los encuestados. Este hallazgo resalta la necesidad de seguir trabajando en la optimización del hardware y la simplificación de la interfaz de usuario. Curiosamente, ningún entrenador percibió resistencia por parte de los deportistas, lo que representa una ventaja para su futura adopción en escenarios deportivos reales.

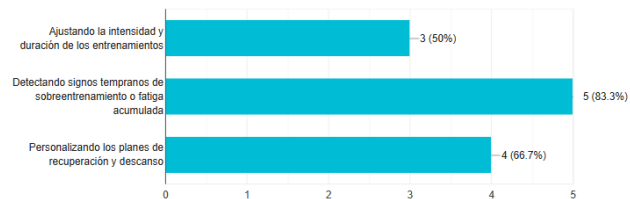


Figura 7.6: Ayuda tecnológica en la práctica deportiva

La mayoría de entrenadores (83.3%) considera que el sistema ayuda a detectar signos tempranos de fatiga muscular, mientras que un 66.7% valoró su utilidad para personalizar las rutinas de recuperación y descanso. Además, un 50% opinó que puede aumentar el interés y la duración de los entrenamientos. Estos resultados demuestran que el sistema tiene el potencial de impactar positivamente en varios aspectos del proceso de entrenamiento, desde la prevención de lesiones hasta la motivación de los deportistas.

7.1.3. Resultados de las encuestas a deportistas

El análisis de las respuestas proporcionadas por los deportistas permite conocer sus percepciones en torno al uso del sistema, su comprensión sobre la fatiga muscular y los posibles beneficios o preocupaciones que genera la incorporación de tecnología durante el entrenamiento.

El análisis de los datos recolectados muestra que la mayoría de los encuestados se encuentran en el rango de edad de 12 años a 14 años, representando el 54.3% del total de respuestas. Este resultado

sugiere que la población participante está compuesta principalmente por adolescentes en una etapa temprana, lo cual podría influir en las necesidades, preferencias o comportamientos relacionados con el tema de estudio. El segundo grupo más representativo es el de 15 años a 17 años con un 28.6 %, seguido por el grupo de 18 años a 20 años con un 14.3 %. Finalmente, el grupo de 21 años a 23 años fue el menos representativo, con solo el 2.9 % de las respuestas. Esta distribución etaria es importante para orientar adecuadamente el diseño de estrategias, productos o servicios, asegurando que estén alineados con las características y expectativas del grupo predominante.

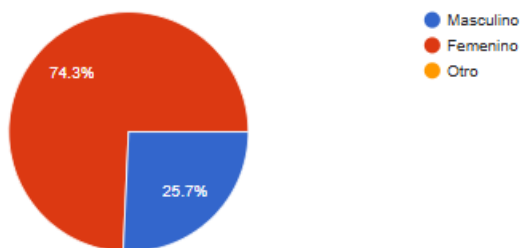


Figura 7.8: Sexo

El 74.3 % de los encuestados se identificó como femenino, mientras que el 25.7 % como masculino. Esta distribución demuestra que el sistema fue evaluado en su mayoría por mujeres, por lo que se consideró la importancia de garantizar un diseño ergonómico cómodo y adaptable a diferentes morfologías corporales para mantener la comodidad durante el uso prolongado.

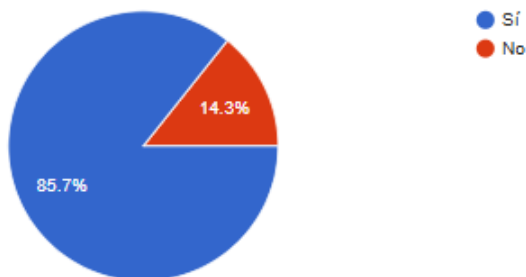


Figura 7.9: Conocimiento sobre fatiga muscular

El 85.7 % de los deportistas afirmaron conocer el concepto de fatiga muscular. Este resultado evidencia una alta conciencia sobre esta condición fisiológica, lo cual facilita la adopción de tecnologías de monitoreo como el sistema propuesto. Una mayor comprensión del fenómeno por parte del usuario final contribuye significativamente a valorar la importancia de registrar y analizar variables fisiológicas durante la práctica deportiva, promoviendo el uso responsable y proactivo del sistema.

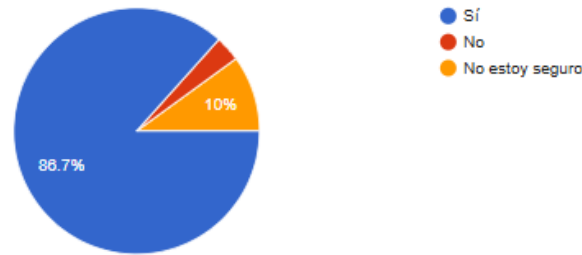


Figura 7.10: Experiencia previa de fatiga muscular

El 86.7 % de los encuestados indicó haber experimentado fatiga muscular, mientras que el 10 % expresó no estar seguro y solo un 3.3 % afirmó no haberla sentido. Este hallazgo valida la pertinencia del sistema desarrollado, al tratarse de una condición frecuente entre los deportistas. Su monitoreo adecuado no solo permite optimizar el rendimiento físico, sino que también podría contribuir, de forma indirecta, a la prevención de lesiones por sobrecarga. Este último aspecto representa una posible línea de trabajo futuro, en la medida en que se integren funciones predictivas y de alerta en el sistema.

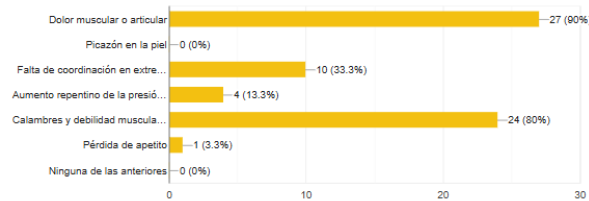


Figura 7.11: Síntomas de fatiga muscular

Los síntomas más frecuentes reportados por los deportistas fueron el dolor muscular o articular (90%), los calambres y la debilidad muscular (80%), y la falta de coordinación (33.3%). Estos resultados coinciden con la literatura científica, lo cual valida el diseño del sistema al enfocarse en la medición de variables fisiológicas relacionadas con estos síntomas, como la señal electromiográfica (EMG) y la saturación de oxígeno (SmO_2) mediante NIRS.

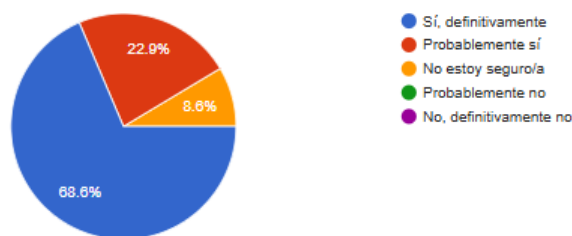


Figura 7.12: Uso de dispositivo

El 68.6 % de los deportistas indicó que definitivamente utilizaría un sistema como el propuesto, y un 22.9 % respondió que probablemente sí. Esto refleja una alta aceptación por parte de los usuarios potenciales, lo que respalda la viabilidad del sistema para ser integrado en rutinas de entrenamiento habituales.

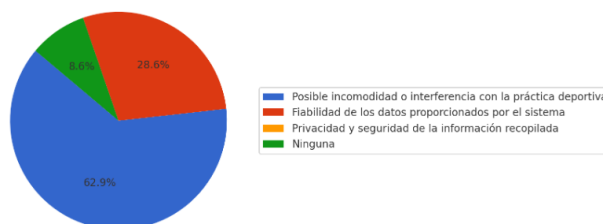


Figura 7.13:

Las principales preocupaciones reportadas por los deportistas fueron la posible incomodidad o interferencia con la práctica deportiva (62.9%) y la fiabilidad de los datos proporcionados por el sistema (28.6%). Solo un 8.6% mencionó preocupaciones sobre la privacidad de la información. Estos hallazgos refuerzan la importancia de priorizar el diseño ergonómico, la precisión de los sensores y la claridad en la visualización de resultados para garantizar una experiencia de uso positiva.

7.1.4. Requerimientos del sistema según las encuestas

A partir de las encuestas realizadas, se establecieron los criterios fundamentales para seleccionar la tecnología más adecuada para el monitoreo de variables indirectas de fatiga muscular en deportistas de alto rendimiento. Durante la fase inicial de ideación del proyecto, se diseñaron dos instrumentos de recolección de información: una encuesta dirigida a entrenadores y otra a deportistas, con el objetivo de comprender sus opiniones, necesidades y expectativas en relación con la implementación y evaluación de un sistema de monitoreo fisiológico.

Las respuestas obtenidas permitieron identificar con claridad los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema, entre los que se destacan la precisión en la medición, la comodidad durante

el uso, la durabilidad del dispositivo, la facilidad de interpretación de los datos y la interoperabilidad con plataformas móviles.

Con base en estos hallazgos, se construyó una casa de la calidad (QFD) que permitió asignar pesos relativos y priorizar características clave según la importancia atribuida por los usuarios a cada requerimiento. Este proceso fue fundamental para orientar la selección de sensores y definir criterios técnicos durante el diseño del prototipo.

A continuación, se presentan los requerimientos funcionales y no funcionales priorizados, la tabla de comparación entre pares y la correspondiente casa de la calidad que sirvió como base para la toma de decisiones técnicas en el desarrollo del sistema.

Cuadro 7.1: Requerimientos funcionales y no funcionales del sistema

Requerimiento	Descripción
Requerimientos funcionales	
Precisión en la medición	Mediciones precisas y fiables de los niveles de fatiga muscular.
Monitoreo en tiempo real	Supervisar la fatiga muscular de manera continua durante el entrenamiento, sin retrasos significativos.
Resistencia a factores ambientales	Resistencia al sudor, humedad y otros factores externos presentes durante la práctica deportiva.
Almacenamiento de datos	Registrar y guardar datos recolectados para su análisis posterior y seguimiento individualizado.
Requerimientos no funcionales	
Comodidad	El sistema debe ser ergonómico y confortable, permitiendo un uso prolongado sin generar incomodidades.
Durabilidad y costo-efectividad	El sistema debe ser resistente, tener una larga vida útil y ser económicamente viable para su implementación.
Facilidad de uso	La interfaz debe ser intuitiva y amigable, facilitando la interpretación de los datos por parte del usuario.
Portabilidad y diseño compacto	El sistema debe ser liviano, fácil de transportar y no interferir con la movilidad del deportista.
Compatibilidad con otras tecnologías	El sistema debe ser interoperable con dispositivos comunes como teléfonos móviles, relojes inteligentes y software de análisis.
Alertas de fatiga muscular	Emitir notificaciones ante niveles críticos de fatiga detectados durante el ejercicio.
Seguridad de los datos del usuario	Proteger la información personal y fisiológica del usuario frente a accesos no autorizados o fugas de datos.

Cuadro 7.2: Relación de características y su peso relativo en el sistema de monitoreo de fatiga muscular

Criterio	Precisión en la medición de fatiga muscular	Comodidad durante el uso	Durabilidad del dispositivo (Costo-efectivo)	Facilidad de uso	Portabilidad y diseño compacto	Monitoreo en tiempo real	Compatibilidad con otras tecnologías	Alertas de fatiga muscular	Resistencia a factores ambientales	Seguridad de los datos del usuario	Capacidad de almacenamiento de datos	Suma	Peso relativo
Precisión en la medición de fatiga muscular	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	0.17
Comodidad durante el uso	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0.03
Durabilidad del dispositivo (Costo-efectivo)	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0.05
Facilidad de uso	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	5	0.08
Portabilidad y diseño compacto	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	7	0.11
Monitoreo en tiempo real	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0.15
Compatibilidad con otras tecnologías	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3	0.05
Alertas de fatiga muscular	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	8	0.12
Resistencia a factores ambientales	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	6	0.09
Seguridad de los datos del usuario	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0.05
Capacidad de almacenamiento de datos	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	8	0.12

REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	IMPORTANCIA RELATIVA	CARACTERÍSTICAS DE INGENIERIA							
		Sensores precisos	Material ergonómico y resistente	Duración de la batería	Conectividad inalámbrica	Análisis de datos	Sistema de retroalimentación visual	Base estable y segura, adherible al cuerpo	
Precisión en la medición de fatiga muscular	0.17	5	3	2	2	4	4	3	
Comodidad durante el uso	0.03	2	5	1	4	2	3	3	
Durabilidad del dispositivo (costo-efectivo)	0.05	3	5	2	3	2	2	4	
Facilidad de uso	0.08	3	4	3	4	3	5	3	
Portabilidad y diseño compacto	0.11	4	3	3	4	2	2	2	
Monitoreo en tiempo real	0.15	5	2	3	5	3	4	2	
Compatibilidad con otras tecnologías	0.05	3	2	2	5	3	4	3	
Alertas de fatiga muscular	0.12	4	1	2	3	2	2	3	
Resistencia a factores externos	0.09	4	4	3	3	1	2	3	
Seguridad de los datos del usuario	0.05	2	1	2	3	3	2	1	
Capacidad de almacenamiento de datos	0.12	4	2	4	5	4	2	1	
Importancia atribuida (%)		4.00	2.67	2.64	3.68	2.80	2.98	2.45	

Figura 7.14: Diagrama de la casa de la calidad (QFD) para selección de características del sistema

Con base en los requerimientos definidos, se llevó a cabo el desarrollo técnico del sistema siguiendo una secuencia estructurada de etapas, que incluyó la evaluación comparativa de tecnologías de sensores, el diseño de los módulos electrónicos, y la validación funcional mediante pruebas piloto. A continuación, se presenta la tabla de comparación de sensores utilizada como apoyo en la etapa de selección tecnológica.

7.1.5. Selección de sensores

Cuadro 7.3: Evaluación comparativa de tecnologías de sensores para monitoreo de fatiga muscular

Criterio	Peso (%)	NIRS	Bioimpedancia	EMG	IRT	FSR
Precisión en la medición	30	9	7	8	6	7
Portabilidad	15	8	5	9	5	9
Compatibilidad con microcontrolador	10	9	5	9	6	9
Costo	15	6	8	7	4	9
Invasividad / Comodidad	10	9	6	8	9	9
Disponibilidad comercial	10	8	7	9	7	8
Facilidad de integración	10	8	6	9	6	9
Puntaje total ponderado (%)		91.0	69.5	91.0	63.5	86.0

El análisis comparativo presentado en la Tabla 7.3 permitió establecer, de manera objetiva, cuáles sensores presentan un mejor desempeño global para el monitoreo de la fatiga muscular, considerando criterios técnicos y de implementación. Los sensores NIRS y EMG obtuvieron los puntajes ponderados más altos (91.0%), destacándose por su alta precisión, compatibilidad con microcontroladores y facilidad de integración al sistema. El sensor FSR también mostró un desempeño elevado (86.0%), lo que lo posiciona como una tecnología complementaria viable para la medición de presión o fuerza aplicada durante el ejercicio. En contraste, la bioimpedancia y la termografía infrarroja obtuvieron puntajes significativamente menores, principalmente por su menor portabilidad, mayor complejidad de integración y baja compatibilidad con sistemas embebidos portátiles. Estos resultados respaldan la decisión de seleccionar NIRS y EMG como tecnologías principales para el sistema, garantizando una alta fidelidad en la medición de variables indirectas de fatiga muscular y facilitando el desarrollo de un dispositivo práctico y funcional para escenarios reales de entrenamiento.

7.1.6. Proceso de diseño

Cada etapa del proceso se centró en integrar y mejorar los componentes electrónicos, optimizar su distribución física y garantizar la correcta adquisición de señales fisiológicas.

Durante la fase inicial del proyecto, se utilizó un sistema de adquisición de señal EMG basado en una placa previamente diseñada por los docentes de la asignatura de Instrumentación Médica. Posteriormente, llevamos a cabo la organización y soldadura de los componentes electrónicos conforme al esquema entregado. El circuito integraba una etapa de amplificación con amplificador de instrumentación, filtros pasaaltas y pasabajos tipo multiple feedback, y un filtro notch centrado en 60 Hz para la atenuación del ruido de red. Este montaje permitió realizar pruebas funcionales preliminares del sistema mientras se gestionaba la adquisición del módulo EMG comercial, el cual fue incorporado en la versión final del prototipo.

A continuación, se presenta la evolución del diseño desde la construcción del módulo EMG inicial, la integración del módulo de NIRS, obteniendo sistema de monitoreo con una carcasa impresa

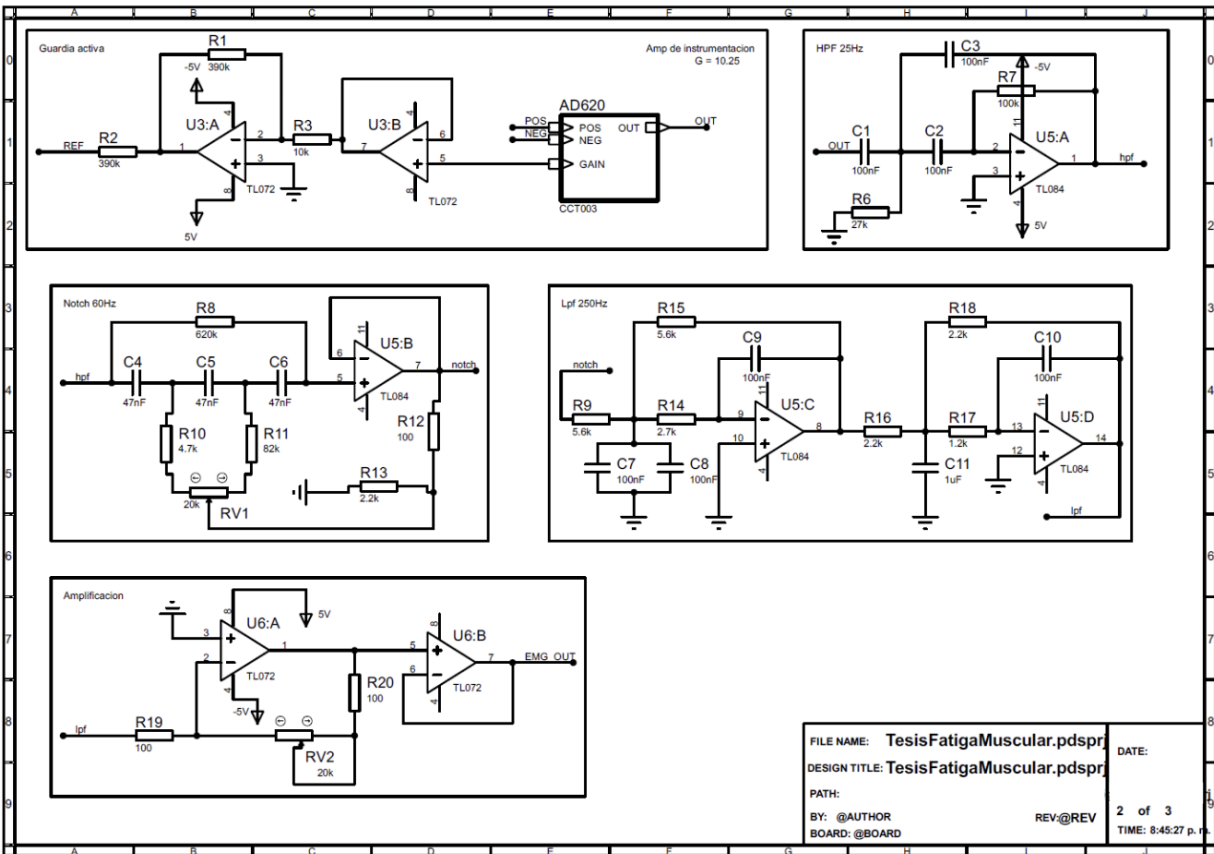


Figura 7.15: Diseño del sistema EMG inicial utilizado para pruebas preliminares.

en 3D y una PCB personalizada.

7.1.6.1. EMG inicial

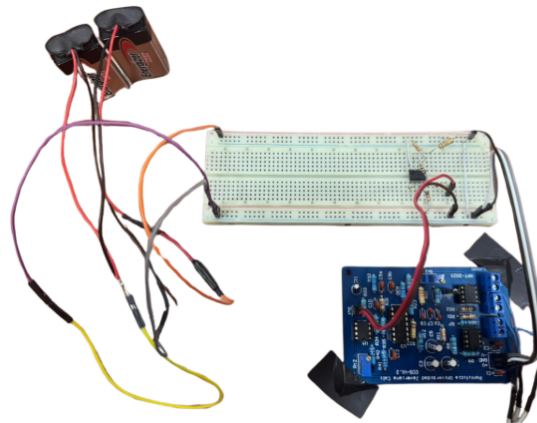


Figura 7.16: PCB de EMG inicial

En esta imagen se observa la primera versión funcional del módulo de electromiografía (EMG), alimentado mediante un sistema de baterías externas. Los componentes están conectados a través de latiguillos sobre una protoboard, incluyendo una placa desarrollada desde cero con los elementos soldados según cálculos eléctricos precisos. Además, se implementó un circuito sumador que permitió desplazar la señal hacia el eje positivo, elevando el voltaje de base a 2.5V, facilitando su interpretación y compatibilidad con el microcontrolador.

7.1.6.2. Circuito en protoboard

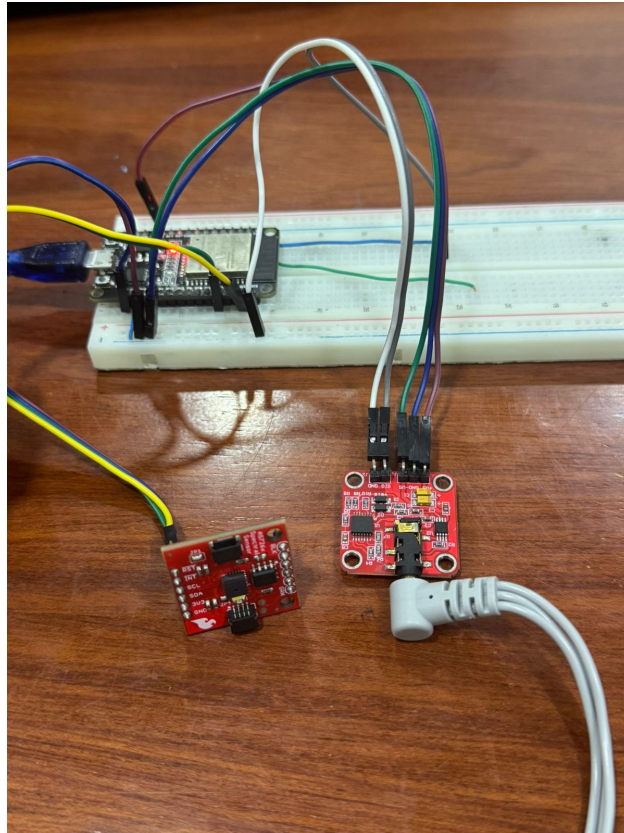


Figura 7.17: Circuito en protoboard

Esta figura muestra la integración completa de los módulos NIRS y EMG conectados al microcontrolador, todos montados sobre una protoboard. Es posible identificar claramente los latiguillos que conducen hacia los electrodos de superficie, evidenciando la conexión funcional entre los sensores y el sistema de adquisición. Esta configuración fue utilizada para validar la correcta lectura de señales en condiciones reales controladas antes de migrar a una versión soldada y compacta.

7.1.6.3. Diseño de PCB e impresión

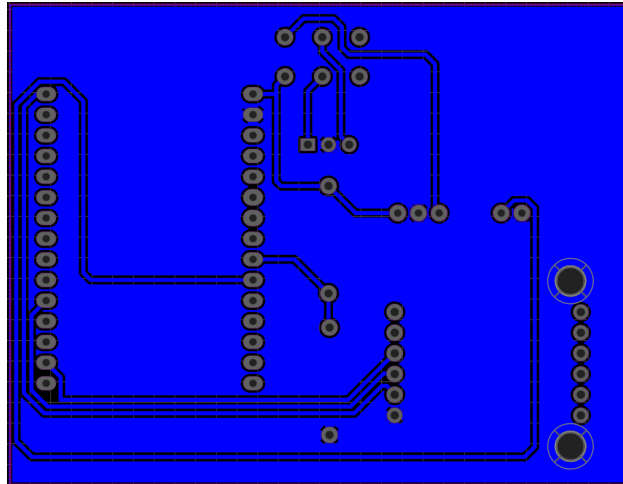


Figura 7.18: Diseño de PCB

Aquí se presenta el diseño del circuito (PCB) desarrollado para integrar los componentes del sistema de monitoreo. Se organizaron cuidadosamente todos los elementos electrónicos necesarios para garantizar funcionalidad, minimizar el ruido y optimizar el espacio, permitiendo una mejor implementación en el prototipo final.

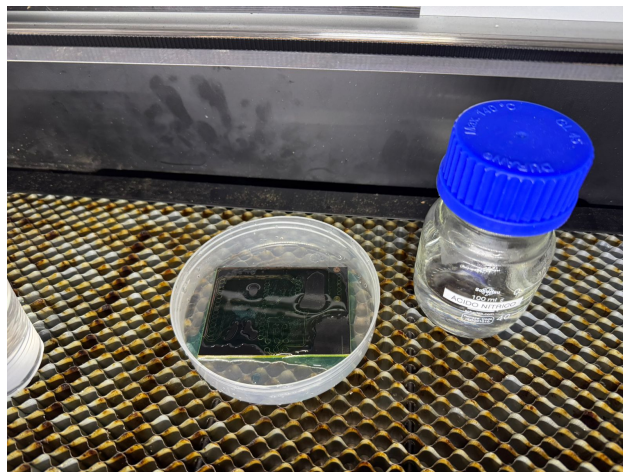


Figura 7.19: Proceso de fabricación de PCB

Estas imágenes documentan el proceso de fabricación inicial de la PCB en el Centro de Automatización de Procesos (CAP) de la universidad. Bajo la supervisión del coordinador Simón Plata, se imprimió la placa desde cero, aplicando los insumos necesarios para revelar correctamente las

pistas de cobre.

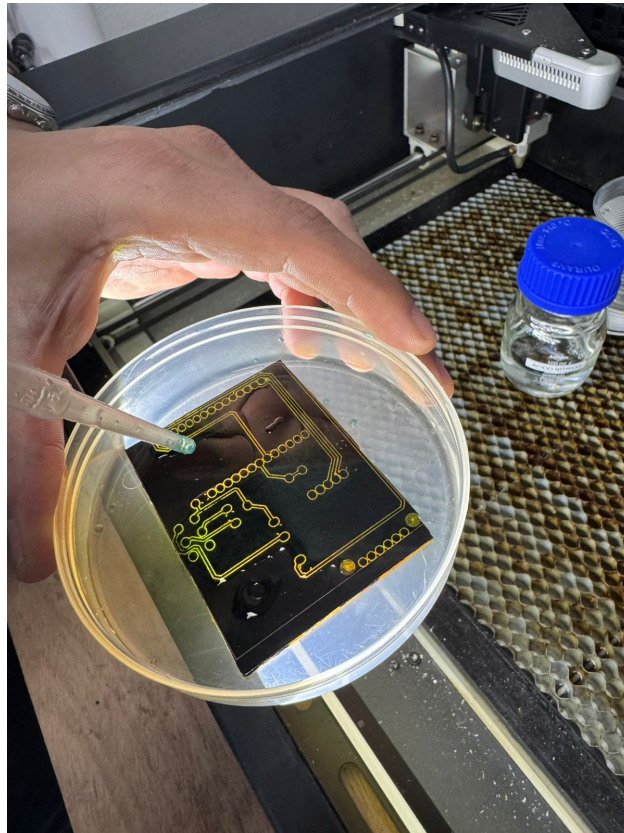


Figura 7.20: Proceso de fabricación de PCB 2

En esta imagen se le estaba aplicando ácido nítrico para quitar el exceso de cobre que quedó después de hacer el corte láser.

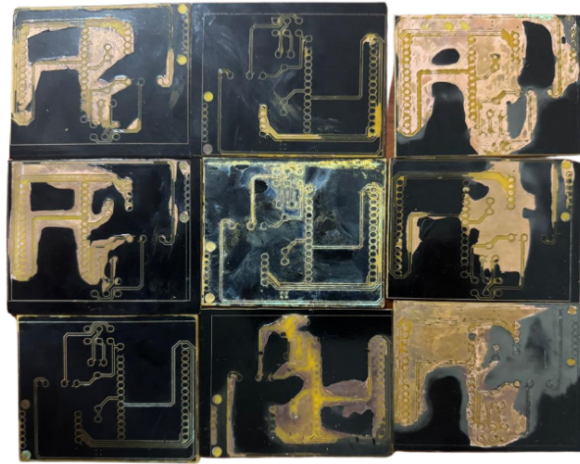


Figura 7.21: Intentos de fabricación de PCB fallidos

Durante las pruebas iniciales de fabricación se realizaron múltiples intentos de transferencia del diseño a la placa PCB. Sin embargo, las condiciones técnicas del laboratorio, como la falta de equipos especializados y la variabilidad en el tiempo de exposición o temperatura durante el proceso de revelado, no permitieron obtener resultados satisfactorios. Adicionalmente, los ácidos utilizados en el proceso de grabado, específicamente el ácido acético y el ácido nítrico, son altamente corrosivos. Su manipulación requiere extrema precisión, ya que una aplicación incorrecta en cantidad o ubicación puede dañar las pistas del circuito o incluso destruir por completo la placa, como se evidencia en la Figura 7.18.

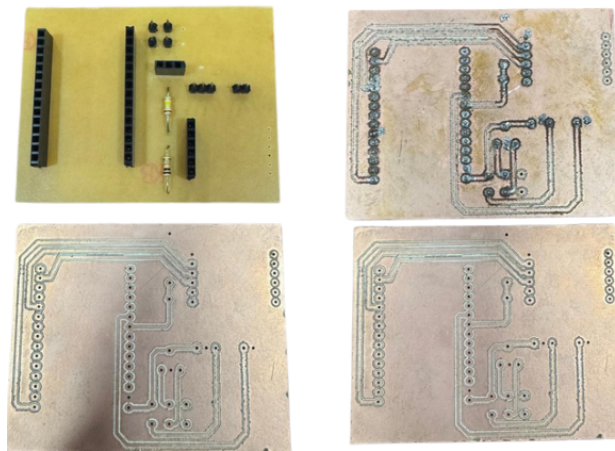


Figura 7.22: PCB impresas con CNC

Esto motivó la decisión de optar por una fabricación asistida por máquina CNC, con el fin de obtener una placa de mayor calidad y precisión.

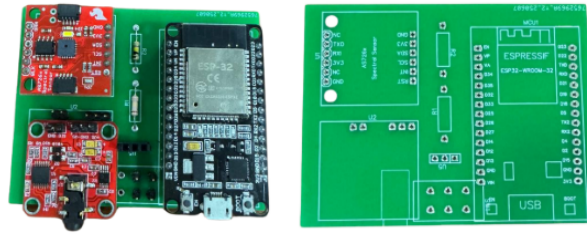


Figura 7.23: PCB fabricadas

En esta imagen se observa la versión final de la PCB seleccionada para el prototipo definitivo. Se muestra la correcta distribución de los componentes, el etiquetado para su identificación, así como una calidad de conexión superior. Esta versión fue elegida por cumplir con las condiciones eléctricas, estructurales y funcionales definidas en la fase de diseño.

7.1.6.4. Prototipo 1

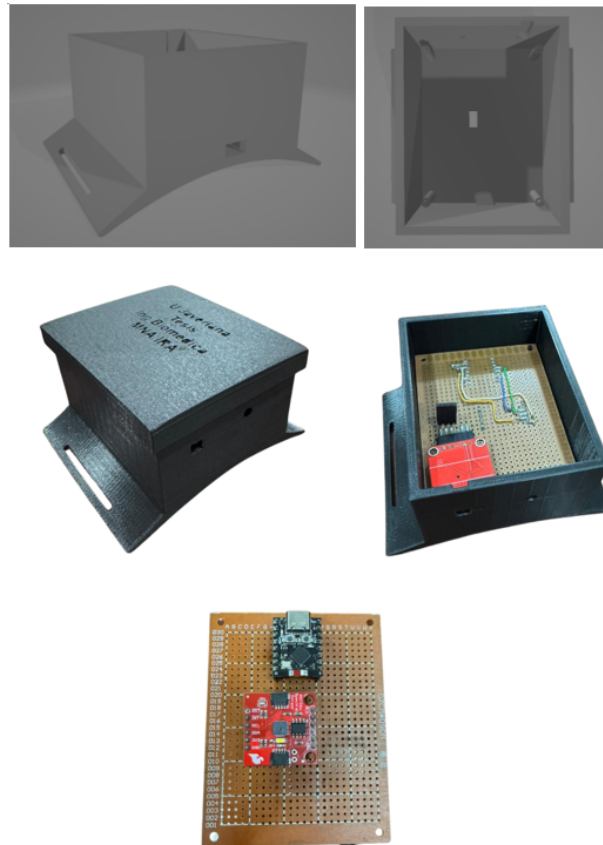


Figura 7.24: Prototipo 1

Mediante la herramienta Fusion 360 se diseñó la carcasa del primer prototipo en 3D. La estructura incluye orificios específicos para la salida del sensor NIRS (con tecnología de infrarrojo cercano) y para los latiguillos conectados a los electrodos de superficie. Posteriormente, se migró a una configuración soldada en baqueta para optimizar el espacio y garantizar mayor estabilidad dentro del encapsulado.

7.1.6.5. Prototipo 2

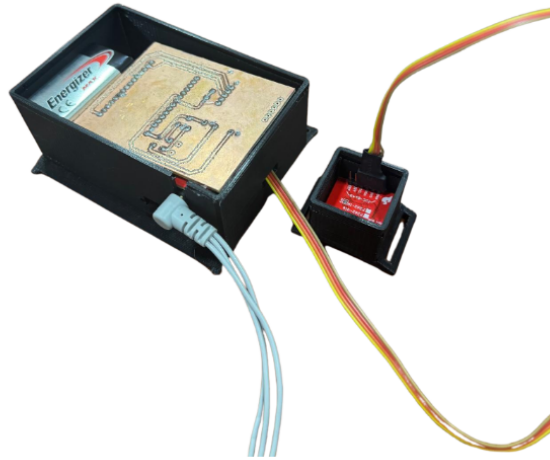


Figura 7.25: Prototipo 2

En este segundo diseño, se observa una caja externa independiente para el módulo NIRS, lo que permite mejorar la calidad de sus mediciones al reducir interferencias. El resto de componentes se integró en una carcasa más amplia, también diseñada en Fusion 360, la pcb observada es en CNC para validar el correcto funcionamiento estructural y del prototipo.

7.1.6.6. Prototipo Final

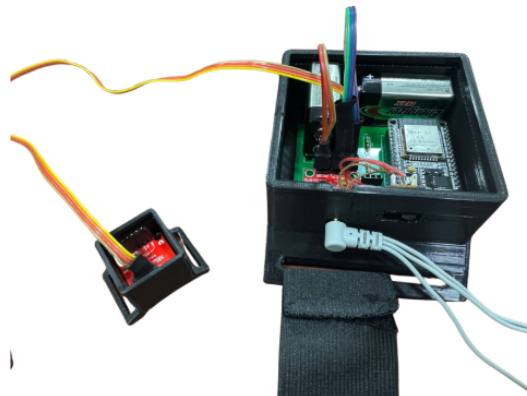


Figura 7.26: Prototipo final

En esta etapa, se integraron todos los componentes electrónicos a la PCB funcional con las respectivas correcciones de diseño. El sistema incluye una banda elástica con velcro para facilitar su correcta fijación a la pierna del usuario durante las pruebas piloto. La integración final asegura robustez, portabilidad y un diseño ergonómico adaptado a las necesidades del contexto deportivo.

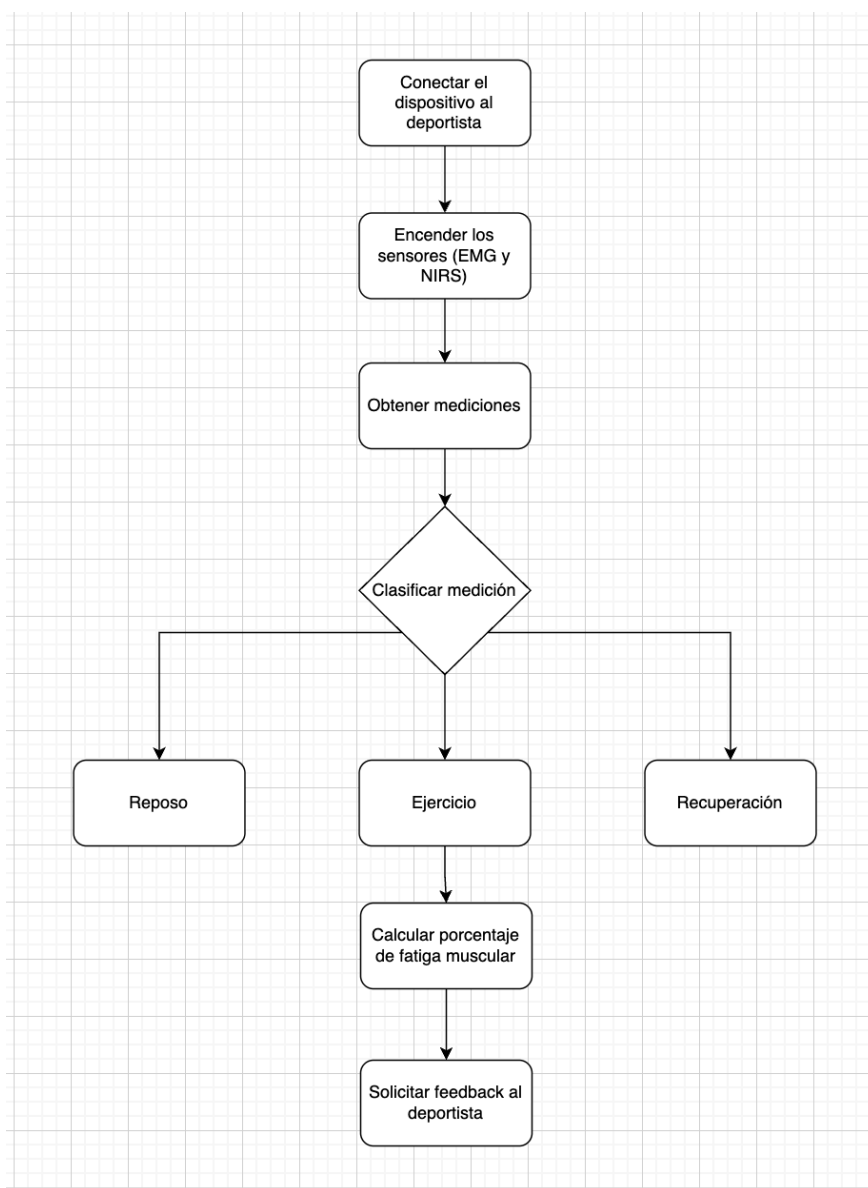


Figura 7.27: Diagrama de flujo del prototipo final

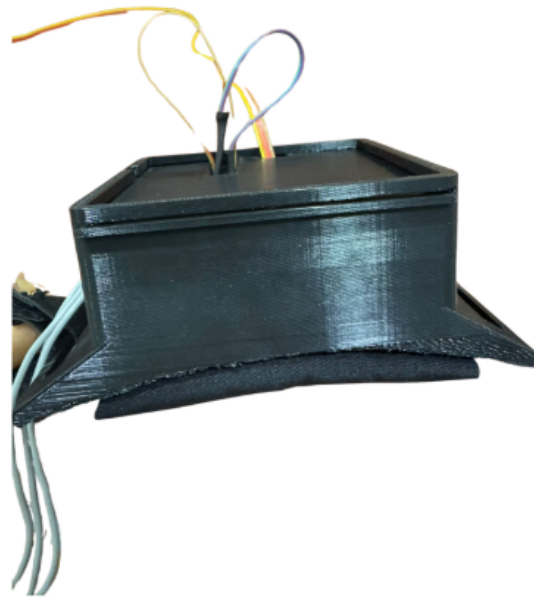


Figura 7.28: Prototipo final

Para garantizar comodidad y seguridad durante el uso, se adicionó una capa inferior de espuma recubierta con tela antifluido. Esta mejora evita el contacto directo del usuario con la carcasa rígida impresa en 3D, reduciendo posibles molestias cutáneas y permitiendo un uso prolongado sin generar incomodidades.

Como primer paso, se realizó la medición del deportista siguiendo los lineamientos establecidos en el marco teórico, con el fin de garantizar una correcta ubicación de los electodos. A continuación, se presentan las imágenes que muestran la colocación de los electodos desde una vista lateral y frontal.



Figura 7.29: Vista frontal

En esta imagen se muestra la vista frontal del sistema de monitoreo completamente instalado en la pierna de la usuaria. Se puede observar la correcta disposición de los electrodos de superficie adheridos sobre la piel, ubicados anatómicamente sobre el músculo vasto lateral para la medición electromiográfica. El módulo NIRS se encuentra orientado en paralelo a las fibras musculares para garantizar lecturas estables de la saturación de oxígeno tisular. Todo el conjunto está fijado mediante bandas elásticas con velcro, permitiendo estabilidad sin comprometer la movilidad del usuario. Además, el prototipo principal se posiciona en la cara externa del muslo, asegurando que las conexiones se mantengan organizadas y sin interferencias durante el movimiento.



Figura 7.30: Vista lateral

Desde la vista lateral, se evidencia con mayor claridad la distribución ergonómica del prototipo. El diseño de la carcasa permite alojar de manera compacta el sistema electrónico completo (PCB, ESP32 y módulo de alimentación), ubicado en una zona que no interfiere con el rango de movimiento de la articulación de la rodilla. Se aprecia también la orientación y alineación de los cables hacia los puntos de medición, con una organización adecuada para evitar tensiones o desconexiones accidentales. Esta configuración fue clave para asegurar la comodidad de la usuaria durante el desarrollo de las pruebas piloto, manteniendo la integridad de las señales adquiridas en tiempo real.

7.1.7. Firebase

Una vez finalizada la integración física del prototipo, se procedió a la implementación de la arquitectura de comunicación inalámbrica entre el sistema de adquisición y la plataforma de visualización. Para ello, se utilizó un microcontrolador ESP32 devkit V1, el cual cuenta con conectividad Wi-Fi integrada y un excelente rendimiento energético, lo que lo hace ideal para aplicaciones portátiles. Este dispositivo fue programado en el entorno de desarrollo Arduino IDE, permitiendo la captura en tiempo real de las señales eléctricas provenientes de los sensores EMG y NIRS a través de su conversor analógico-digital (ADC). Posteriormente, los datos serán visualizados desde la aplicación

y transmitidos a Firebase.

La plataforma seleccionada para el almacenamiento y sincronización de los datos fue Firebase Realtime Database, debido a su capacidad para actualizar información de forma instantánea y su compatibilidad con múltiples sistemas operativos. Firebase funcionó como intermediario entre el sistema físico y la interfaz de usuario, permitiendo almacenar mediciones fisiológicas de forma continua y confiable, sin necesidad de memoria local.

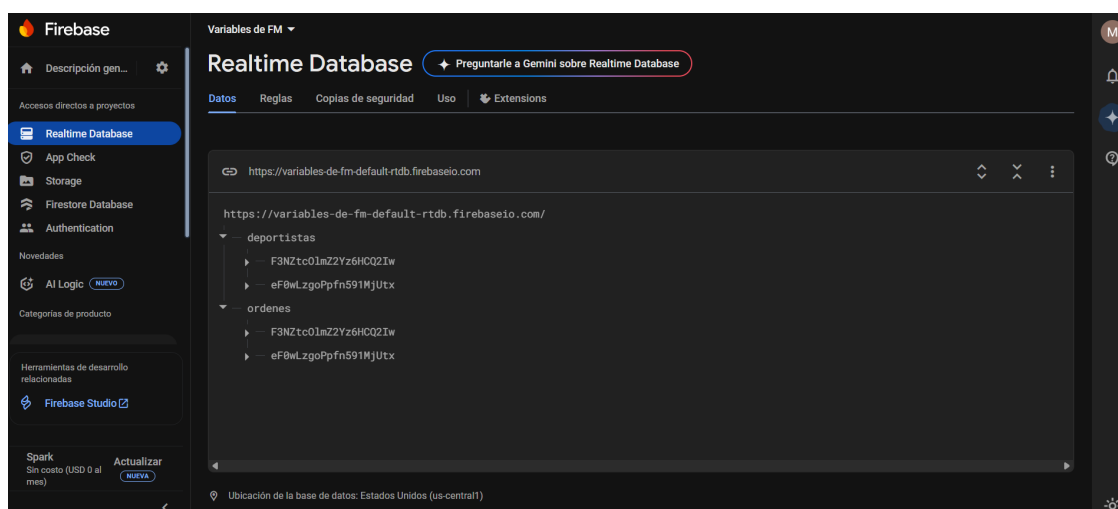


Figura 7.31: Realtime Database

En la Realtime Database de Firebase se implementó una estructura funcional que permite almacenar y gestionar la información generada por la aplicación móvil. El objetivo principal fue registrar de manera organizada los perfiles de los deportistas creados desde la app, permitiendo que cada uno de ellos almacene sus propias sesiones de entrenamiento. Para cada sesión se guarda la fecha, el número de mediciones realizadas y los datos capturados por los sensores. Además, se configuró una sección específica para las órdenes del sistema, en la que se controlan las instrucciones de encendido o apagado del monitoreo, en función de las acciones realizadas por el usuario dentro de la aplicación. Esta estructura facilita una comunicación fluida entre la app y la base de datos, y permite una trazabilidad clara de los datos recolectados en cada entrenamiento.



Figura 7.32: Correo creado para el proyecto

Para fines del proyecto, se creó un correo electrónico exclusivo para vincular la base de datos en tiempo real de Firebase: fatigamuscular0431@gmail.com. Esta decisión permitió mantener separadas las credenciales del sistema de monitoreo respecto a cuentas personales, facilitando así una gestión más organizada, segura y escalable del acceso a la plataforma. Además, contar con un correo dedicado garantiza una mayor trazabilidad en el manejo de datos y habilita futuras integraciones o pruebas sin comprometer la privacidad o integridad de otras cuentas.

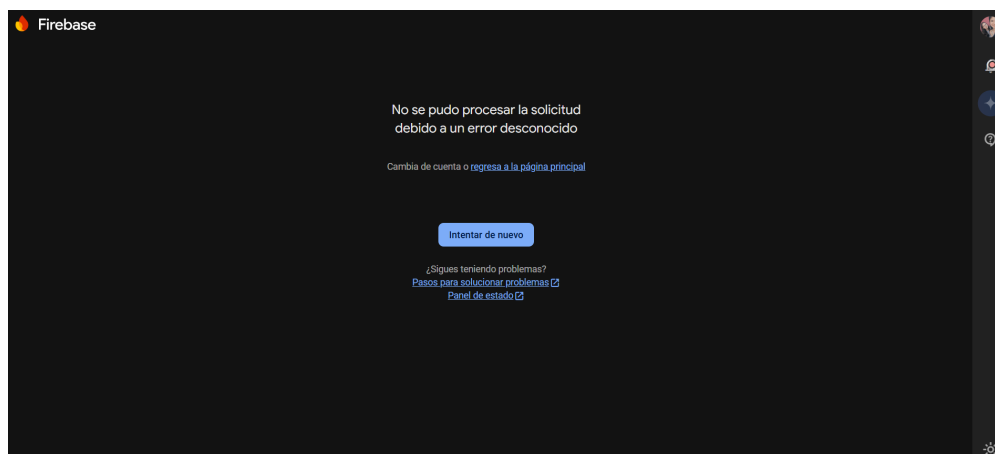


Figura 7.33: Cuenta errónea

Por tal motivo, si se intenta acceder a la base de datos desde una cuenta no autorizada, el sistema mostrará un error de acceso, bloqueando la visualización o modificación de los datos almacenados, tal como se evidencia en la Figura 7.33. Esta restricción fue implementada intencionalmente como una medida de seguridad para evitar que personas externas al proyecto puedan acceder, alterar o eliminar información crítica. Limitar el acceso únicamente a la cuenta institucional creada para este

fin no solo protege la integridad de los datos recolectados, sino que también facilita la trazabilidad de los cambios realizados durante el desarrollo y pruebas del sistema. Esta práctica es especialmente importante en proyectos que manejan información sensible o en los que se prevé una futura ampliación del equipo de trabajo, ya que permite mantener un control centralizado sobre los permisos y niveles de acceso.

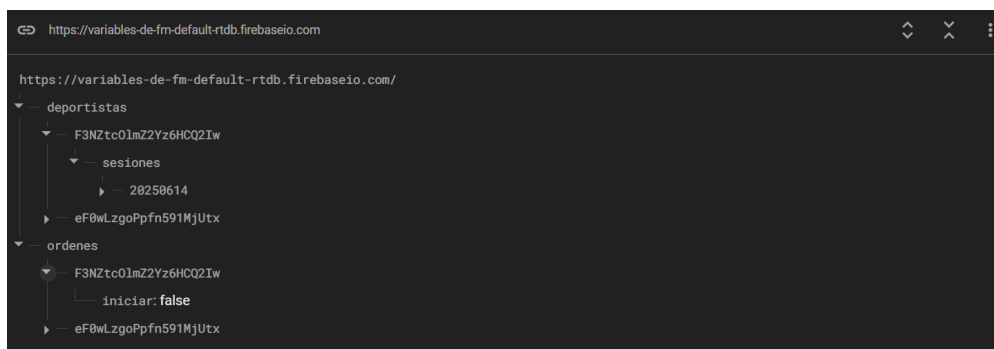


Figura 7.34: Organización de datos en firebase

En la base de datos de Firebase se estructuraron dos secciones principales: 'deportistas' y 'órdenes', cada una con una función específica dentro del sistema. En la sección de 'deportistas', se almacena la credencial individual de cada usuario registrado, y dentro de cada una se registran las diferentes sesiones de entrenamiento organizadas por fecha. Esta organización permite que, al visualizar el calendario en la aplicación, el sistema muestre las mediciones fisiológicas correspondientes a cada día de entrenamiento de forma ordenada y accesible. Por otro lado, la sección de 'órdenes' actúa como un canal de control para el inicio de la medición en tiempo real: en ella, cada perfil de deportista contiene un parámetro llamado 'iniciar', cuyo valor puede ser 'true o false', dependiendo de si el usuario ha presionado el botón 'Iniciar medición' en la aplicación. Esta lógica permite sincronizar de forma sencilla la interfaz del usuario con la activación del sistema de monitoreo, asegurando que los datos se registren únicamente cuando se autorice explícitamente desde la app.

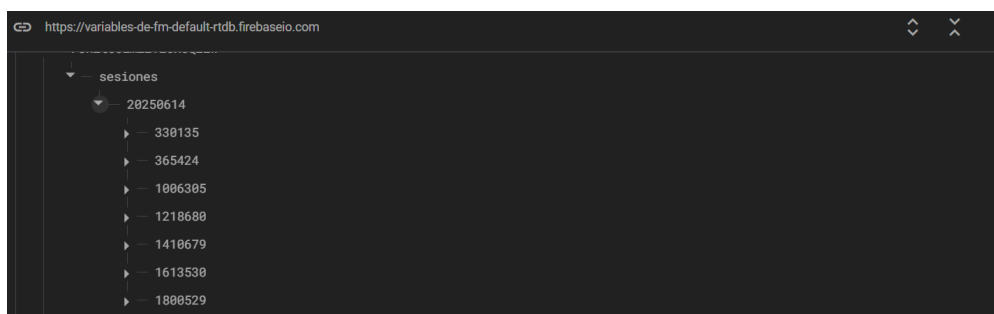


Figura 7.35: Número de muestras

Al hacer clic en el nodo de 'sesión' dentro de la credencial de un deportista específico, es posible

visualizar las fechas correspondientes a cada entrenamiento registrado. Dentro de cada fecha, se almacenan las muestras capturadas durante la sesión, organizadas en orden ascendente.

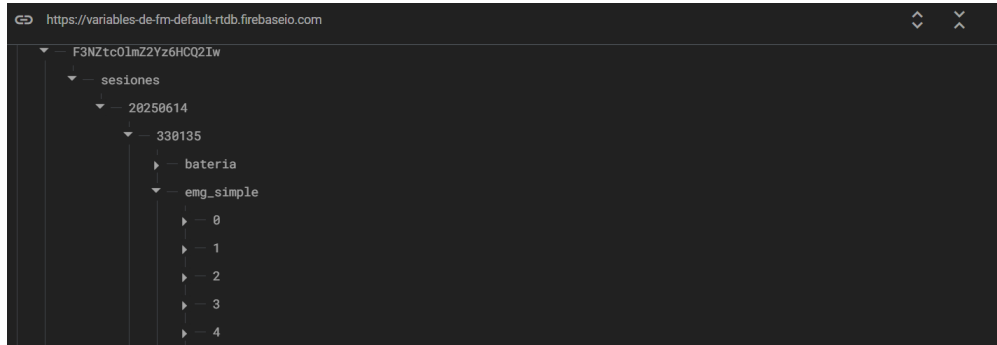


Figura 7.36: Datos de EMG en firebase

Dentro de cada muestra se encuentran organizadas tres secciones principales: NIRS, EMG y batería, correspondientes a los datos capturados por cada componente del sistema en ese momento específico. Al seleccionar la sección de EMG, se despliegan las 30 mediciones consecutivas realizadas durante esa muestra, permitiendo un análisis detallado de la actividad eléctrica muscular en ese intervalo.

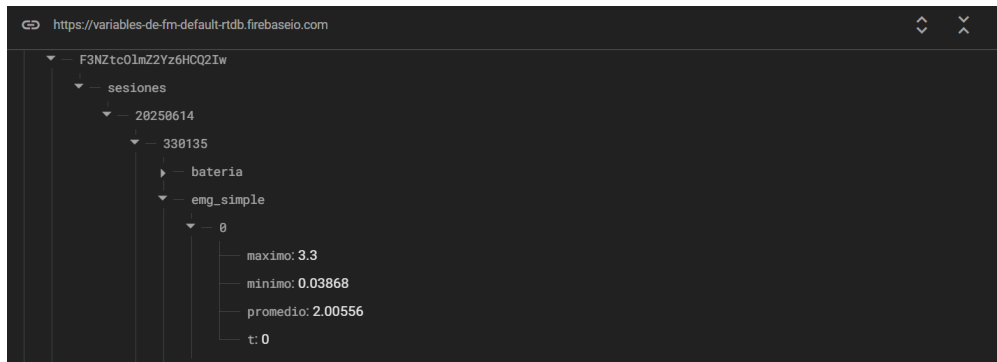


Figura 7.37: Organización de datos de EMG

Dentro de cada una de las 30 mediciones del EMG se almacenan tres parámetros clave: el valor máximo, el valor mínimo y el promedio de la señal captada en ese instante de tiempo. Estos valores permiten una caracterización precisa de la actividad muscular. Específicamente, el valor que se muestra en la pantalla de la aplicación corresponde al promedio calculado en cada medición, ya que este proporciona una representación más estable y confiable del nivel de activación muscular durante el ejercicio.

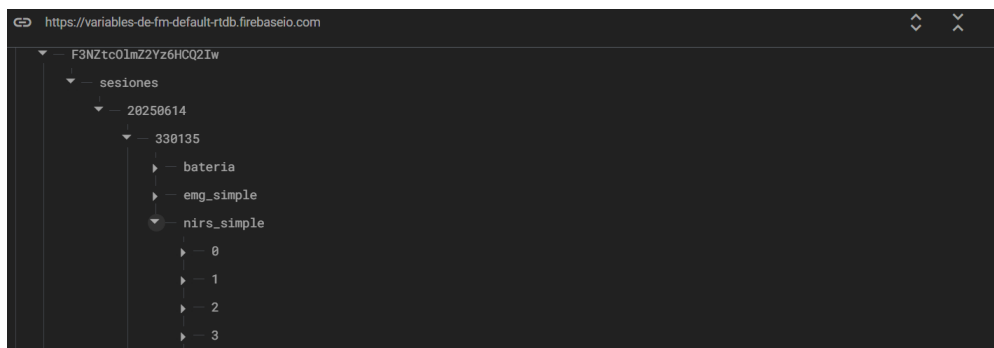


Figura 7.38: Datos NIRS en firebase

Dentro de cada muestra se encuentran organizadas tres secciones principales: NIRS, EMG y batería, correspondientes a los datos capturados por cada componente del sistema en ese momento específico. Al seleccionar la sección de NIRS, se despliegan las 30 mediciones consecutivas realizadas durante esa muestra, permitiendo un análisis detallado de la saturación de oxígeno muscular en ese intervalo.

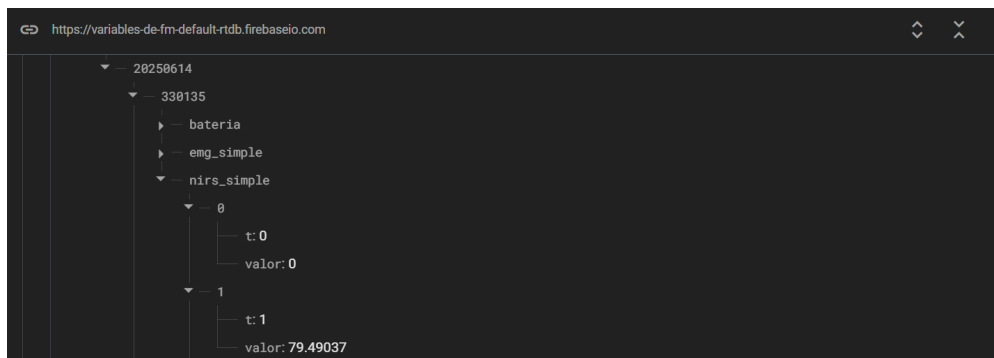


Figura 7.39: Organización de datos de NIRS

Por otro lado, en la sección de NIRS dentro de cada muestra, se registra únicamente el valor de saturación de oxígeno tomado por el sensor, junto con el tiempo exacto en el que fue capturado. Esta información permite organizar las mediciones en orden ascendente según el tiempo, facilitando su análisis cronológico y permitiendo visualizar cómo varía la oxigenación muscular a lo largo de la sesión de entrenamiento.

En paralelo, se desarrolló una aplicación utilizando el framework Flutter, codificada en el lenguaje Dart. Dart es un lenguaje de programación desarrollado por Google, orientado a objetos y diseñado específicamente para la creación de interfaces gráficas rápidas, modernas y multiplataforma. Su sintaxis clara, así como su integración directa con Flutter, permiten construir aplicaciones móviles y web desde una única base de código, lo que agiliza el desarrollo y asegura una experiencia uniforme para el usuario final.

La aplicación fue diseñada para recibir, interpretar y visualizar las señales fisiológicas en tiempo real, facilitando el monitoreo continuo de parámetros clave como la saturación de oxígeno muscular y la actividad electromiográfica. La interfaz gráfica fue construida bajo un enfoque intuitivo, lo que facilita su uso tanto por entrenadores como por investigadores, sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados.

Un aspecto fundamental del sistema es su accesibilidad multiplataforma. La aplicación puede ejecutarse mediante una pestaña web en dispositivos móviles Android o iOS, sin requerir instalación como aplicación nativa. Esta característica reduce las barreras de acceso, permite su implementación inmediata en campo y asegura compatibilidad con una amplia gama de dispositivos personales.

7.1.8. Procesamiento de los datos

7.1.8.1. Procesamiento de EMG

1. **Extracción y Promedio de Señal:** Los datos EMG suelen llegar como listas de valores por bloque o por segundo. El procesamiento consiste en calcular el promedio de cada bloque y luego el promedio de cada medición de esta forma.

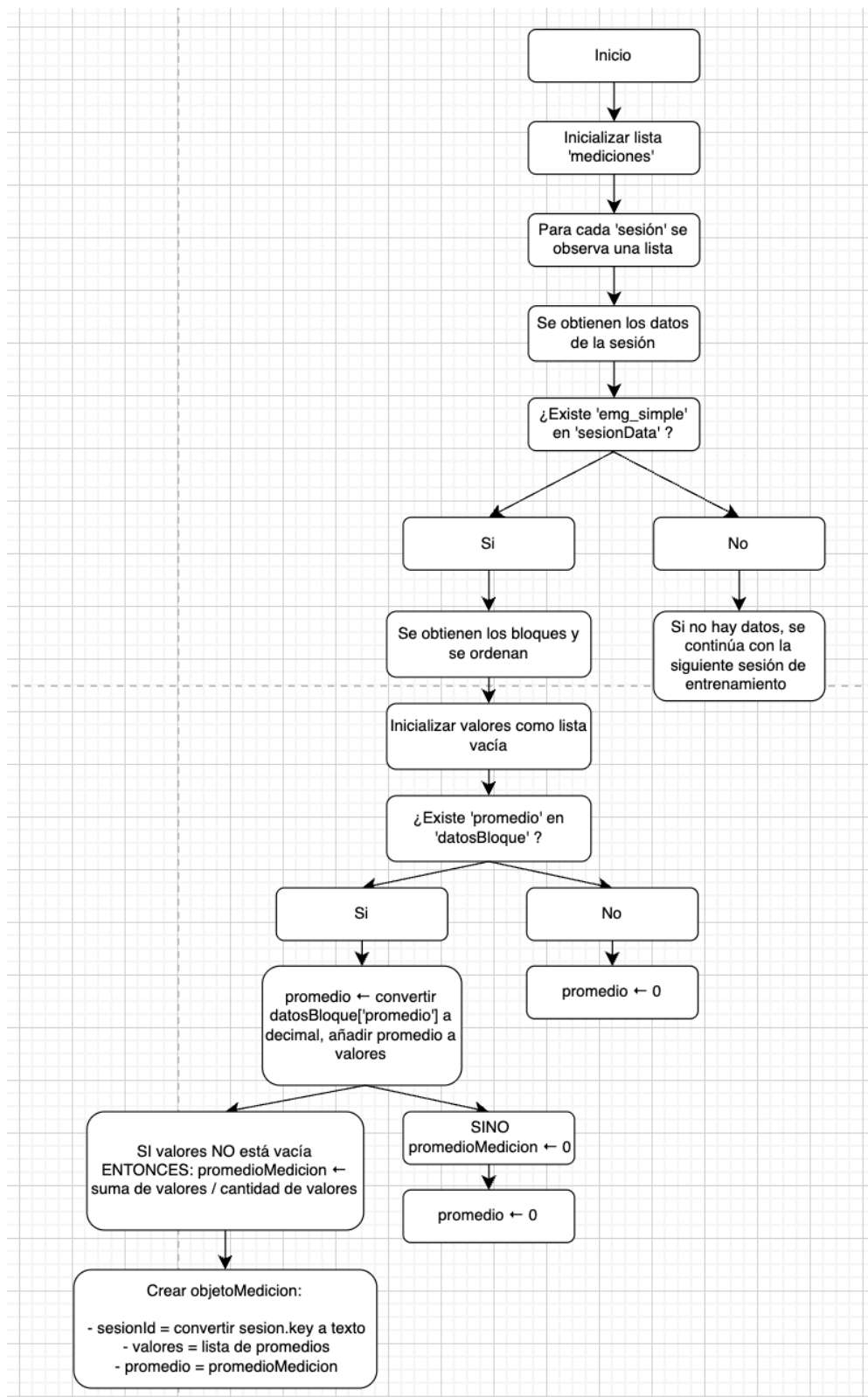


Figura 7.40: Funcionamiento del código promedio para EMG

```
List<_MedicionEmg> mediciones = [];
for (final sesion in sesionesList) {
    final sesionData = sesion.value as Map<dynamic, dynamic>;
    if (sesionData.containsKey('emg_simple')) {
        final bloques = sesionData['emg_simple'];
        List<MapEntry> bloquesList = ... // ordenar bloques
        List<double> valores = [];
        for (final bloque in bloquesList) {
            final b = bloque.value as Map<dynamic, dynamic>;
            final promedio = (b['promedio'] as num?)?.toDouble() ?? 0;
            valores.add(promedio);
        }
        double promedioMedicion = valores.isNotEmpty
            ? valores.reduce((a, b) => a + b) / valores.length
            : 0;
        mediciones.add(_MedicionEmg(
            sesionId: sesion.key.toString(),
            valores: valores,
            promedio: promedioMedicion,
        ));
    }
}
```

Figura 7.41: Promedio de EMG

2. **Calibración y Umbrales:** Se utiliza el promedio de las primeras mediciones (2) en reposo para calibrar los umbrales de clasificación.

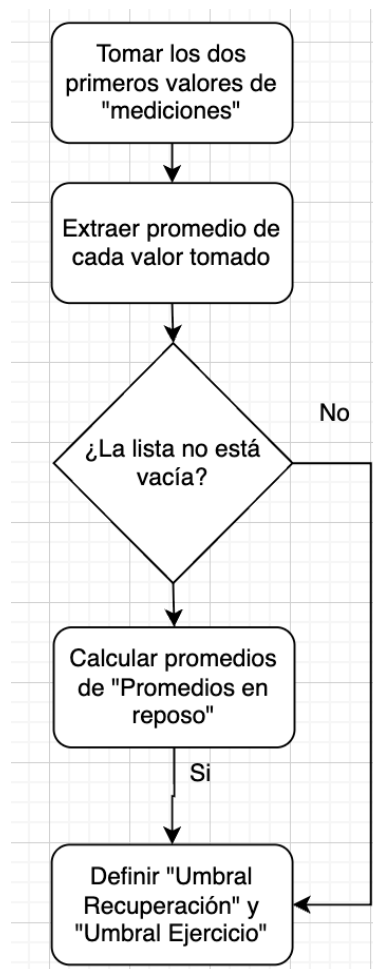


Figura 7.42: Diagrama de funcionamiento del código para cálculo de umbrales

```
final List<double> promediosReposo = mediciones.take(2).map((m) => m.promedio).toList();
final double promedioReposo = promediosReposo.isNotEmpty()
    ? promediosReposo.reduce((a, b) => a + b) / promediosReposo.length
    : 0;

final double umbralSuperiorReposo = 0.67;
final double umbralEjercicio = 0.90;
```

Figura 7.43: Calibración y cálculo de umbrales

3. **Clasificación de Estados:** Se clasifica cada medición según su promedio.

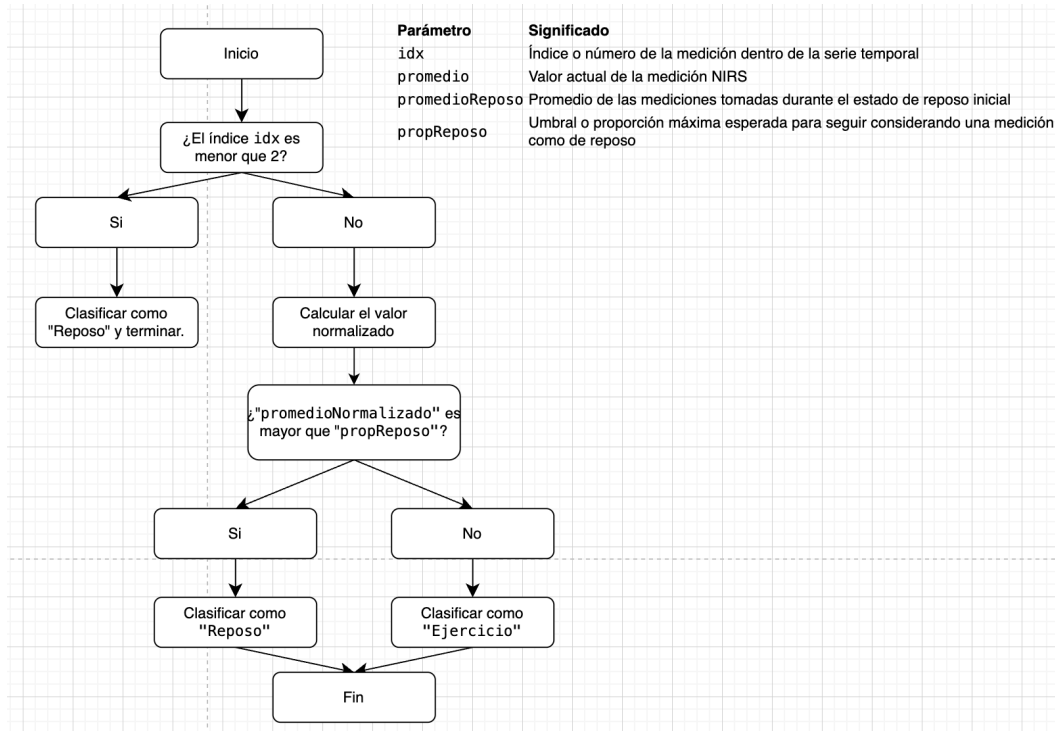


Figura 7.44: Diagrama de clasificación de estados

```

String _clasificaMedicion(List< MedicionEmg> mediciones, int idx, double umbralReposo, double umbralEjercicio) {
    final promedio = mediciones[idx].promedio;
    if (promedio < umbralReposo) {
        return "Reposo";
    } else if (promedio > umbralEjercicio) {
        return "Ejercicio";
    } else {
        return "Recuperacion";
    }
}

```

Figura 7.45: Clasificación de estados

4. **Cálculo de Fatiga Muscular:** El porcentaje de fatiga se calcula comparando la primera y última medición de ejercicio.

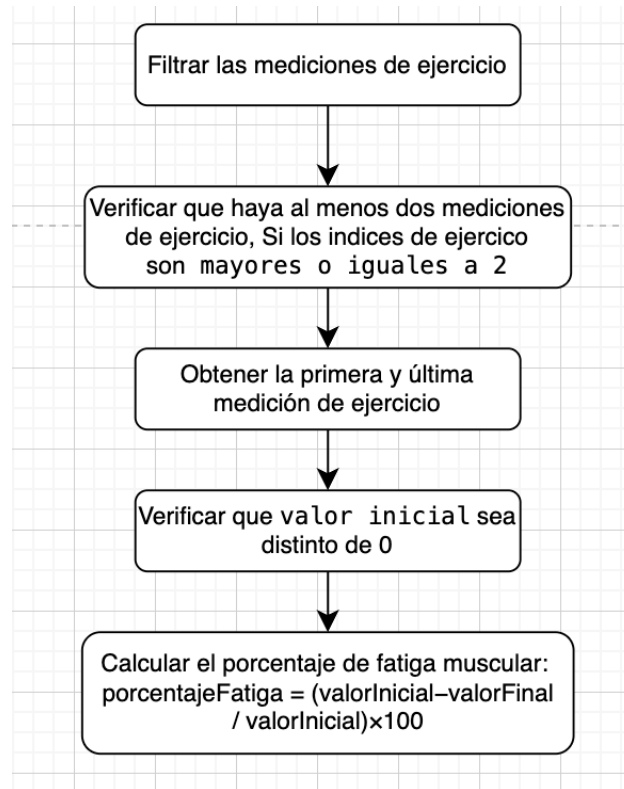


Figura 7.46: Diagrama de flujo del cálculo de fatiga muscular

```

final ejercicioIndices = mediciones.asMap().entries
    .where((entry) => _clasificaMedicion(mediciones, entry.key, umbralSuperiorReposo, umbralEjercicio) == "Ejercicio")
    .map((entry) => entry.key)
    .toList();

double porcentajeFatiga = 0;
if (ejercicioIndices.length >= 2) {
    final double valorInicial = mediciones[ejercicioIndices.first].promedio;
    final double valorFinal = mediciones[ejercicioIndices.last].promedio;
    if (valorInicial != 0) {
        porcentajeFatiga = ((valorInicial - valorFinal) / valorInicial) * 100;
    }
}
  
```

Figura 7.47: Cálculo de fatiga muscular

7.1.8.2. Procesamiento NIRS

1. **Extracción y Promedio de Señal:** El procesamiento es similar al EMG, pero se trabaja con valores de saturación de oxígeno.

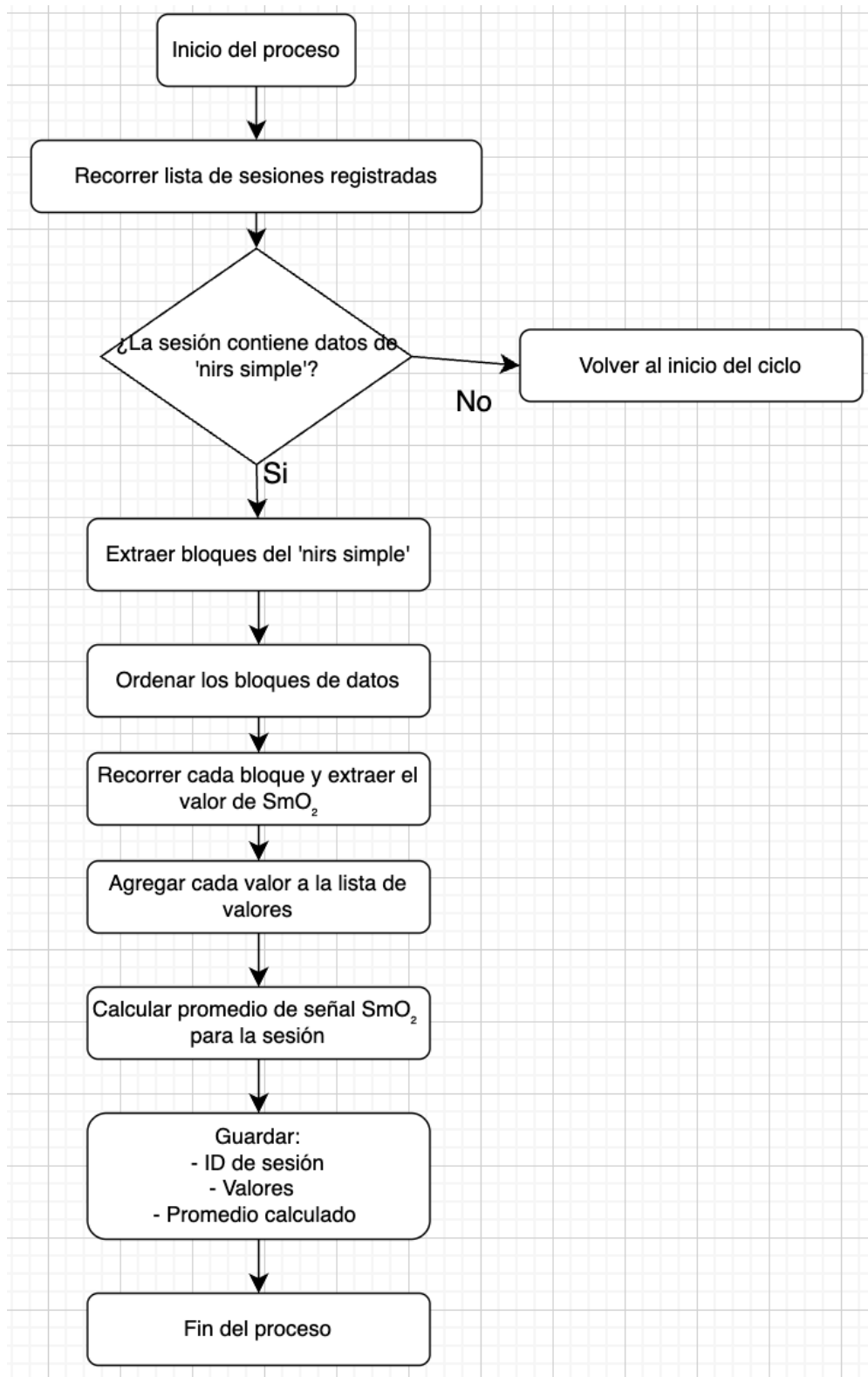


Figura 7.48: Diagrama de flujo de promedio de la señal NIRS

```
List<_MedicionNirs> mediciones = [];
for (final sesion in sesionesList) {
    final sesionData = sesion.value as Map<dynamic, dynamic>;
    if (sesionData.containsKey('nirs_simple')) {
        final bloques = sesionData['nirs_simple'];
        List<MapEntry> bloquesList = ... // ordenar bloques
        List<double> valores = [];
        for (final bloque in bloquesList) {
            final b = bloque.value as Map<dynamic, dynamic>;
            final valor = (b['valor'] as num?)?.toDouble() ?? 0;
            valores.add(valor);
        }
        double promedioMedicion = valores.isNotEmpty
            ? valores.reduce((a, b) => a + b) / valores.length
            : 0;
        mediciones.add(_MedicionNirs(
            sesionId: sesion.key.toString(),
            valores: valores,
            promedio: promedioMedicion,
        ));
    }
}
```

Figura 7.49: Promedio de la señal

2. **Normalización respecto al Reposo:** Los valores de NIRS se normalizan respecto al promedio de las dos primeras mediciones (referencia de reposo).

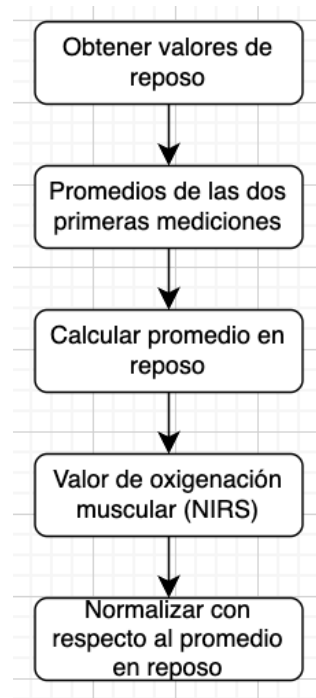


Figura 7.50: Diagrama de flujo de la normalización de los datos

```
final List<double> promediosReposo = mediciones.take(2).map((m) => m.promedio).toList();
final double promedioReposo = promediosReposo.isNotEmpty()
    ? promediosReposo.reduce((a, b) => a + b) / promediosReposo.length
    : 1; // Evita división por cero

double promedioNormalizado = promedio / promedioReposo;
```

Figura 7.51: Normalización de datos

3. **Clasificación de Estados:** Se clasifica cada medición según el valor normalizado.

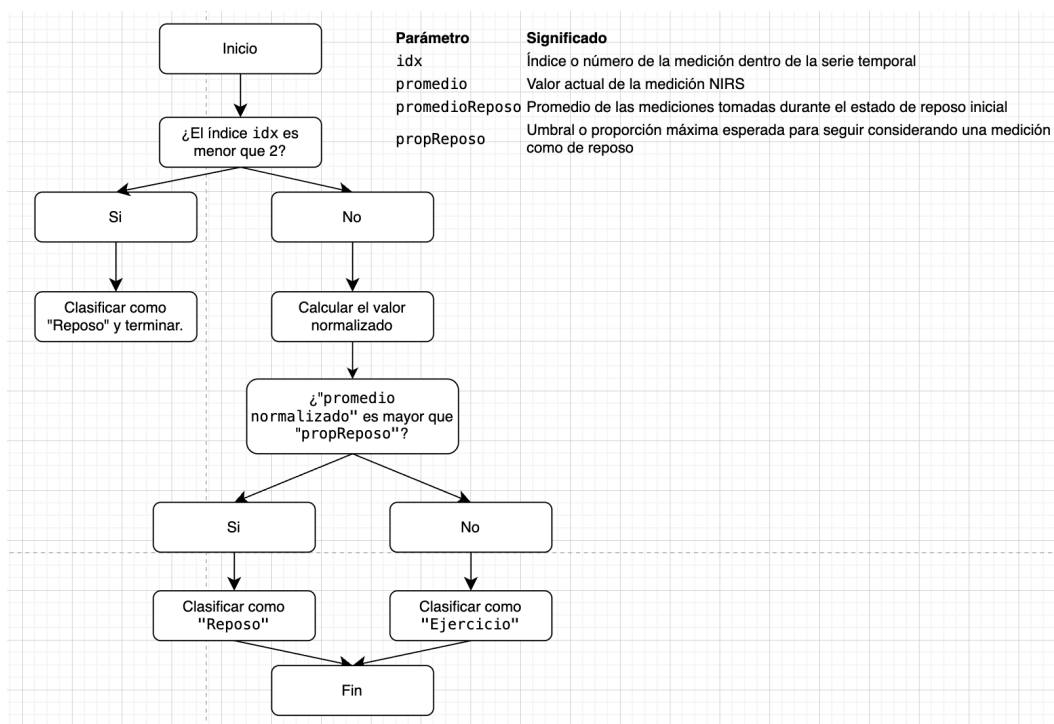


Figura 7.52: Diagrama de flujo de clasificación de estados

```

String _clasificaMedicionNirs(double promedio, int idx, double promedioReposo, double propReposo) {
    if (idx < 2) {
        return "Reposo";
    }
    double promedioNormalizado = promedio / promedioReposo;
    if (promedioNormalizado > propReposo) {
        return "Reposo";
    } else {
        return "Ejercicio";
    }
}
  
```

Figura 7.53: Clasificación de estados

4. **Cálculo de Fatiga Muscular:** El porcentaje de fatiga se calcula comparando la primera y última medición de ejercicio.

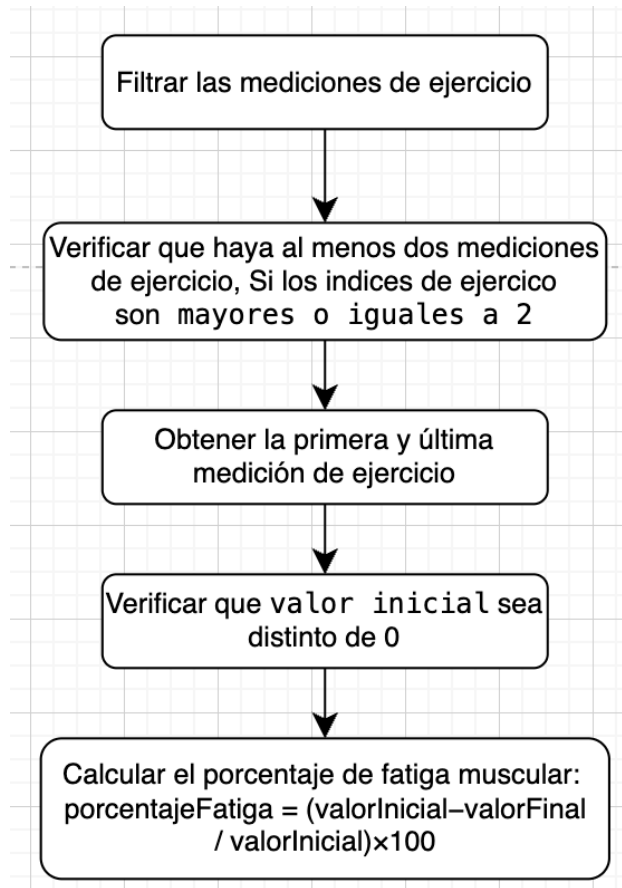


Figura 7.54: Diagrama de flujo del cálculo de fatiga muscular

```

final ejercicioIndices = mediciones.asMap().entries
  .where((entry) => _clasificaMedicion(mediciones, entry.key, umbralSuperiorReposo, umbralEjercicio) == "Ejercicio")
  .map((entry) => entry.key)
  .toList();

double porcentajeFatiga = 0;
if (ejercicioIndices.length >= 2) {
  final double valorInicial = mediciones[ejercicioIndices.first].promedio;
  final double valorFinal = mediciones[ejercicioIndices.last].promedio;
  if (valorInicial != 0) {
    porcentajeFatiga = ((valorInicial - valorFinal) / valorInicial) * 100;
  }
}
  
```

Figura 7.55: Cálculo de fatiga muscular

7.1.9. Resultados de la prueba

7.1.10. Saturación de Oxígeno

Durante las pruebas piloto se utilizó un módulo NIRS de tipo comercial para medir la saturación de oxígeno muscular (SmO_2) como variable indirecta asociada a la fatiga muscular. Las mediciones

se realizaron durante la ejecución controlada de tres repeticiones del ejercicio de sentadilla profunda, considerando tres fases específicas del protocolo. La disminución progresiva de los niveles de oxígeno en el tejido muscular observada a lo largo de las repeticiones se interpreta como un posible indicio de fatiga localizada.



Figura 7.56: Resultados generales de NIRS

La Figura 7.56 muestra la visualización general de las mediciones de saturación de oxígeno muscular (SmO_2) registradas a lo largo de varias mediciones experimentales con el sensor NIRS. Cada bloque corresponde a una medición distinta tomada durante la ejecución del protocolo en diferentes estados del deportista (reposo, ejercicio y recuperación). Si bien se pueden identificar ligeras disminuciones en los niveles de saturación durante ciertos momentos de esfuerzo, seguidas de una recuperación parcial, las variaciones no son significativamente amplias entre una sesión y otra.

Esta tendencia sugiere que, aunque el sensor logra detectar caídas de oxígeno asociadas a la contracción muscular o al esfuerzo puntual, la diferencia entre las repeticiones no evidencia un patrón progresivo claro de fatiga acumulada. Es decir, si bien existen descensos en los picos de saturación, como se observa en Medición 1, 2, 4 y 6, estos no representan un deterioro constante o sostenido que indique un agotamiento fisiológico más allá de lo esperado en una rutina controlada.

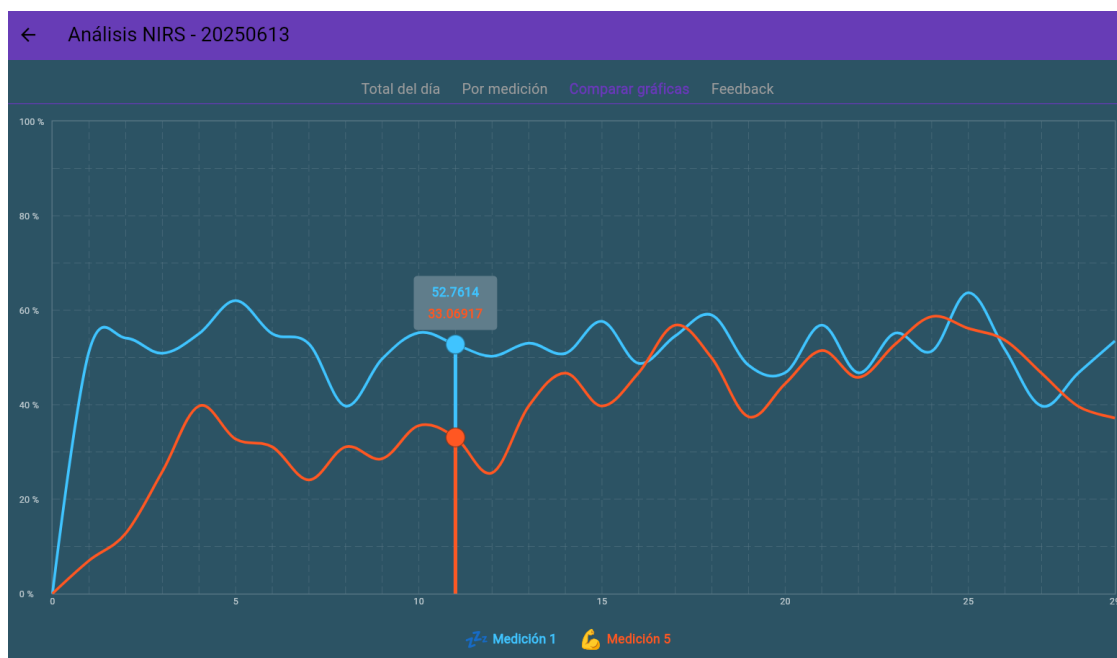


Figura 7.57: Comparación entre medición 1 y 5

La Figura 7.57 presenta una comparación entre la Medición 1 (en azul) y la Medición 5 (en naranja), correspondientes a lecturas de saturación de oxígeno muscular (SmO_2) obtenidas mediante el sensor NIRS. Esta comparación evidencia cambios importantes en la dinámica del músculo a lo largo del ciclo de entrenamiento.

En la Medición 1, el deportista se encontraba en estado de reposo, sin haber realizado actividad física previa. Como resultado, los niveles de oxigenación muscular son visiblemente más altos y estables, alcanzando valores cercanos al 60%, con una media aproximada de 52.8%. Se observa una curva con menor variabilidad, lo que indica una buena perfusión tisular y un músculo oxigenado en condiciones basales.

Por el contrario, en la Medición 5, correspondiente a una fase posterior del ciclo donde el músculo ya había sido sometido a carga repetitiva, se evidencian valores notablemente más bajos de saturación, con un promedio en torno al 33% y puntos mínimos cercanos al 20%. Esta disminución refleja el impacto fisiológico del ejercicio, con una mayor demanda de oxígeno y una menor disponibilidad relativa en el tejido muscular, lo cual sugiere un inicio de fatiga localizada.

← Análisis NIRS - 20250613

Total del día Por medición Comparar gráficas Feedback

Feedback del entrenamiento

¿Cómo te sentiste en el entrenamiento?
0 = Muy mal, 10 = Excelente

0 10

¿Cuánto cansancio sientes ahora?
0 = Nada cansado, 10 = Extremadamente cansado

0 10

¿Qué tan motivado(a) te sentiste hoy?
0 = Nada motivado, 10 = Muy motivado

0 10

¿Qué tan difícil fue el entrenamiento?
0 = Muy fácil, 10 = Muy difícil

0 10

▶ Enviar

Figura 7.58: FeedBack del deportista

La Figura 7.58 muestra el módulo de retroalimentación subjetiva del entrenamiento, implementado en la interfaz del sistema para complementar los datos fisiológicos con la percepción del propio deportista. Este módulo permite registrar respuestas rápidas a través de escalas tipo deslizador (0 a 10), facilitando la recolección de información cualitativa posterior a cada sesión.

En esta medición específica se observaron los siguientes valores:

¿Cómo te sentiste en el entrenamiento? El valor seleccionado fue 8, lo que indica una percepción positiva respecto a la experiencia durante la sesión. Este resultado sugiere que, en términos generales, el entrenamiento fue bien tolerado, con buena disposición física y mental por parte del usuario.

¿Cuánto cansancio sientes ahora? La respuesta fue 3, lo que refleja un nivel de fatiga bajo. Esto puede interpretarse como una recuperación rápida post-ejercicio o una carga que no superó los umbrales de exigencia subjetiva, a pesar de la activación muscular observada en las señales EMG y NIRS.

¿Qué tan motivado(a) te sentiste hoy? Se reportó un valor de 7, lo que indica un alto nivel de motivación durante la sesión. Este aspecto es clave para la adherencia al entrenamiento y está relacionado con el rendimiento general percibido.

¿Qué tan difícil fue el entrenamiento? El valor asignado fue 4, reflejando que el protocolo fue considerado como moderadamente fácil. Esta percepción de baja dificultad es coherente con los niveles reducidos de fatiga reportados y sugiere que aún existe margen para aumentar la intensidad del ejercicio en futuras sesiones.

En conjunto, estos resultados muestran que la deportista experimentó la sesión como efectiva pero no excesivamente demandante, manteniendo un buen estado anímico y fisiológico. Este tipo de retroalimentación subjetiva, integrada con los registros fisiológicos del sistema, permite una

evaluación más completa y centrada en el usuario.

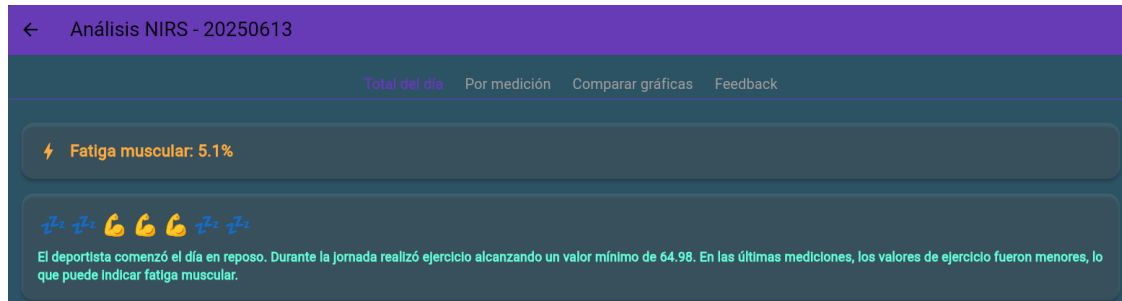


Figura 7.59: Niveles de fatiga muscular

La Figura 7.59 muestra el resumen del análisis automático del sistema en relación con la evolución de la saturación de oxígeno tisular (SmO_2) a lo largo del día. El sistema estima un nivel de fatiga muscular de 5.1 %, valor calculado a partir de la variación registrada entre las fases de reposo inicial y las fases posteriores de esfuerzo.

El análisis indica que el deportista comenzó la jornada en estado de reposo, con niveles basales elevados de oxigenación muscular. Posteriormente, durante la realización de ejercicios, se alcanzó un valor mínimo de saturación de 64.98 %, reflejando una disminución respecto al estado inicial. En las últimas mediciones, se observó que los niveles de saturación no lograron recuperarse por completo, lo que sugiere una acumulación leve de fatiga muscular.

A pesar de que el valor total estimado de fatiga es bajo (5.1 %), este tipo de retroalimentación cuantitativa permite visualizar la carga fisiológica del entrenamiento de manera objetiva. Además, el sistema interpreta automáticamente esta evolución mediante un mensaje descriptivo integrado en la interfaz, reforzando el análisis para el usuario sin necesidad de interpretación técnica adicional.

Esta funcionalidad no solo facilita la lectura e interpretación de los datos, sino que también representa un avance hacia una evaluación automatizada de la condición fisiológica del deportista.

7.1.11. Resultados obtenidos con EMG

En primera instancia, se desarrolló un módulo EMG desde cero, utilizando una placa diseñada manualmente y herramientas de adquisición propias. Posteriormente, para mejorar la portabilidad del sistema, se implementó un módulo EMG comercial. Las mediciones se centraron en el voltaje de la señal electromiográfica, representando la capacidad eléctrica del músculo en contracción. Se evaluaron también durante tres fases: reposo, ejercicio (sentadillas profundas) y recuperación.



Figura 7.60: Resultados generales de la prueba

La Figura 7.60 muestra los resultados generales obtenidos a partir de las mediciones de electromiografía de superficie (EMG), correspondientes al registro de la actividad eléctrica del músculo vasto lateral durante el protocolo experimental. En el eje horizontal se observan las diferentes sesiones de medición (Medición 1 a Medición 7), mientras que el eje vertical representa la amplitud de la señal EMG expresada en voltios, con un rango que oscila entre 0 V y 3.3 V.

Los datos evidencian una clara diferenciación entre las tres fases establecidas en el protocolo: reposo, contracción y recuperación. En la Medición 1, correspondiente al estado inicial de reposo del sujeto, se registran niveles basales de actividad eléctrica muscular, con una señal muy estable y de baja amplitud, en torno a los 0.1 V –0.3 V, lo cual concuerda con un estado sin activación muscular significativa.

A partir de la Medición 3 y especialmente en las Mediciones 5 y 7, se observan aumentos sustanciales en la amplitud y frecuencia de la señal, alcanzando picos cercanos a 2.5 V –3 V. Estos incrementos reflejan la ejecución del ejercicio (sentadillas profundas), donde se produce una activación repetitiva y de alta intensidad del músculo evaluado. La señal presenta gran variabilidad, característica de la contracción dinámica y continua del músculo durante el esfuerzo.

Finalmente, en las Mediciones 4 y 6, se aprecia una reducción progresiva de la amplitud de la señal EMG, lo cual sugiere una fase de recuperación activa o disminución de la carga muscular. Aunque la señal no retorna completamente a los niveles de reposo inicial, se muestra una disminución en los picos de activación, indicativa de la relajación parcial del músculo y de una menor demanda neuromuscular.

Este comportamiento secuencial demuestra que el sistema es capaz de registrar y diferenciar de manera efectiva las fases de reposo, esfuerzo y recuperación, validando la funcionalidad del módulo

EMG y su utilidad para estudios de monitoreo fisiológico en tiempo real. Asimismo, estas variaciones permiten correlacionar visualmente la actividad muscular con la ejecución de tareas físicas, lo que sienta las bases para futuras aplicaciones en evaluación de rendimiento y detección temprana de fatiga.

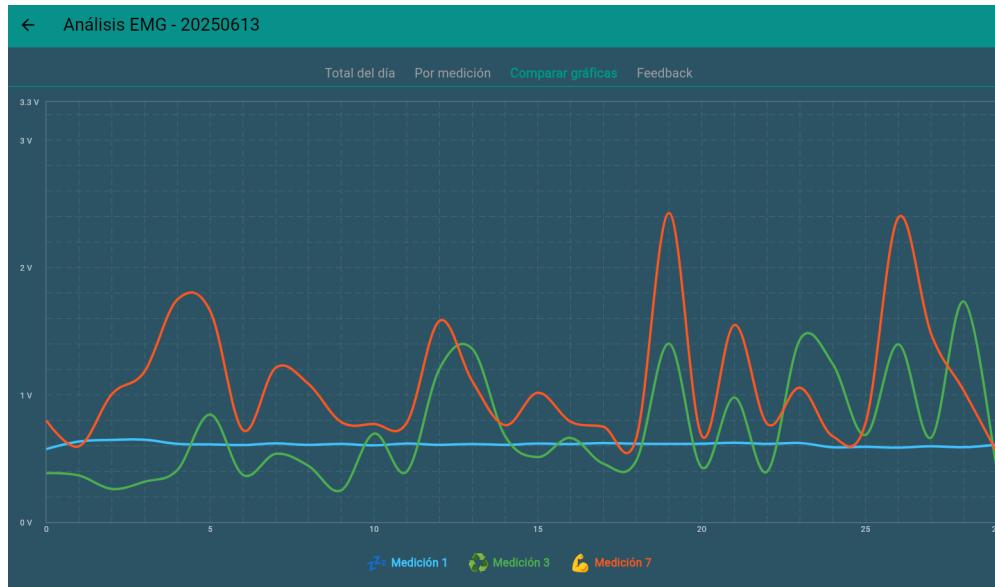


Figura 7.61: Comparación entre las mediciones 1, 3 y 7

La Figura 7.61 muestra la comparación de la señal electromiográfica (EMG) registrada durante tres momentos clave del protocolo experimental: la Medición 1 (color azul), correspondiente al estado de reposo; la Medición 3 (color verde), representando una fase de activación moderada; y la Medición 7 (color rojo), asociada a una etapa avanzada del esfuerzo.

En la Medición 1, la curva EMG se mantiene prácticamente constante, con una amplitud media inferior a 0.5 V. Esta señal plana y sin picos relevantes refleja la ausencia de contracción muscular activa, lo cual confirma que la medición fue realizada en condiciones de reposo absoluto.

En contraste, la Medición 3 presenta incrementos evidentes en la actividad eléctrica muscular, con amplitudes que superan 1 V en varios puntos. La señal muestra picos regulares y cierta variabilidad, lo que indica que el músculo estaba siendo activado de forma sostenida pero aún controlada, probablemente durante una serie inicial de repeticiones del ejercicio de sentadilla profunda.

Finalmente, en la Medición 7 se observa un comportamiento claramente más agresivo y marcado: la curva alcanza picos que superan los 2.5 V, con mayor densidad de señales y amplitudes más altas. Este patrón es característico de un músculo sometido a un esfuerzo repetitivo acumulado, con mayor reclutamiento de unidades motoras. La elevada actividad en esta fase final sugiere una respuesta adaptativa del sistema neuromuscular para compensar el inicio de fatiga, intentando mantener la ejecución del ejercicio a pesar del agotamiento progresivo.

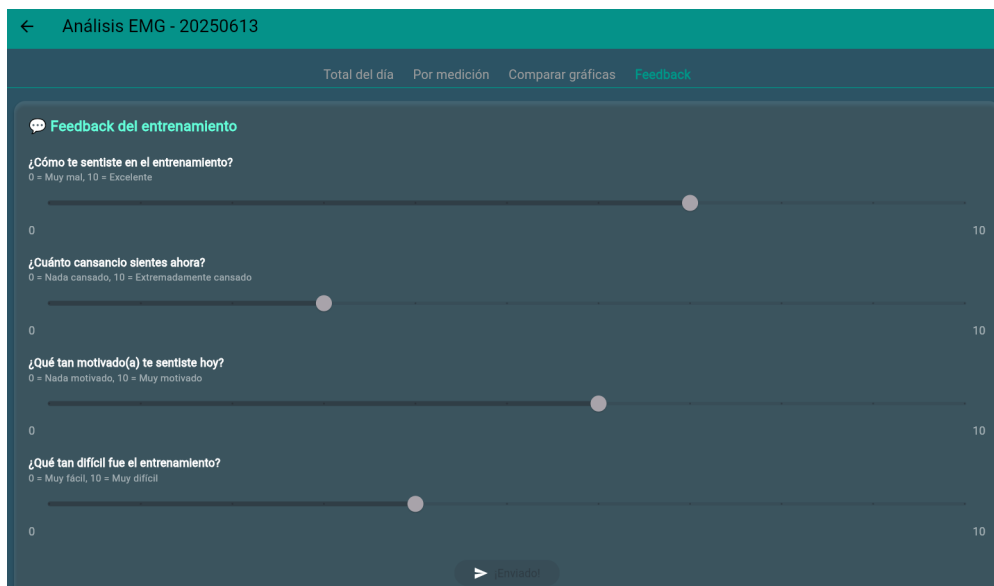


Figura 7.62: Feedback de la deportista

La Figura 7.62 muestra el módulo de retroalimentación del entrenamiento desde el entorno de análisis EMG. En esta instancia, la deportista reportó nuevamente los valores 8 para percepción general del entrenamiento, 3 para nivel de cansancio, 7 en motivación y 4 en dificultad percibida.

Dado que estos valores son exactamente los mismos que los registrados en el módulo de retroalimentación anterior 7.58, no se realiza un análisis adicional. Esta entrada representa la misma percepción subjetiva global de la sesión, registrada desde un punto distinto de la aplicación.

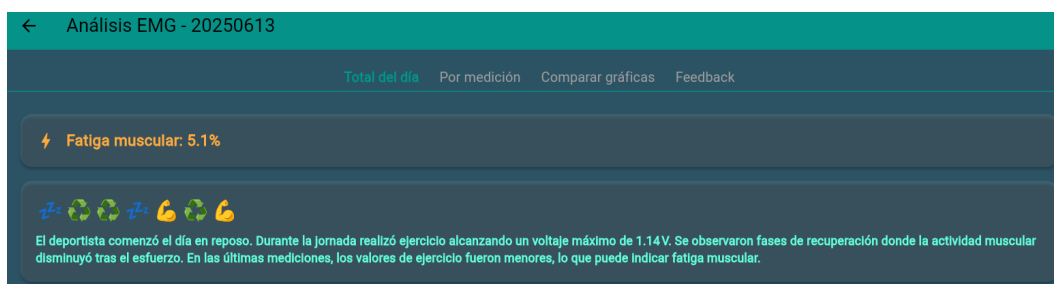


Figura 7.63: Nivel de fatiga muscular

La Figura 7.63 presenta el resultado del análisis automático del sistema basado en los datos de electromiografía (EMG), con una estimación de fatiga muscular de 5.1%. Esta estimación se realiza a partir de la evolución de la actividad eléctrica registrada durante las distintas fases del protocolo experimental.

Según el informe mostrado en la interfaz, la deportista inició la jornada en estado de reposo, y durante la ejecución del ejercicio alcanzó un valor máximo de activación de 1.14V. Posteriormente,

se identificaron fases de recuperación caracterizadas por una disminución progresiva en los niveles de señal, lo que evidencia la transición desde el esfuerzo hacia la relajación muscular.

En las últimas mediciones, los valores de activación fueron menores en comparación con los picos registrados durante la fase de ejercicio activo. Esta disminución es interpretada por el sistema como una posible manifestación de fatiga muscular localizada, debido a la reducción en la eficiencia contráctil del músculo vasto lateral tras repetidas contracciones.

Si bien el porcentaje estimado de fatiga (5.1 %) no es elevado, el sistema logra reflejar una variación fisiológica coherente con lo observado visualmente en las curvas EMG, y se complementa con la percepción subjetiva reportada por la usuaria. Esta funcionalidad automatizada permite ofrecer una lectura directa y simplificada del estado muscular, lo cual facilita la toma de decisiones sobre carga, descanso y progresión del entrenamiento.

7.1.12. Correlación entre variables y análisis integrado

Los valores decrecientes de saturación de oxígeno obtenidos con el sensor NIRS, junto con el incremento en la amplitud de señal EMG, permiten establecer una correlación fisiológica con la presencia de fatiga muscular. La disminución en SmO_2 refleja una menor disponibilidad de oxígeno para el metabolismo muscular, mientras que el aumento en RMS sugiere mayor esfuerzo para mantener la contracción.

Estas variables, consideradas indirectas pero fisiológicamente válidas, pueden ser utilizadas como predictores del estado de fatiga cuando se integran con medidas subjetivas. Pues, si la saturación cae por debajo de un umbral crítico mientras el voltaje medido por el EMG sigue incrementándose, es razonable inferir que el músculo se aproxima a un estado de agotamiento funcional.

El enfoque mixto empleado en esta tesis, fortalece la comprensión y abre posibilidades para generar alertas personalizadas y decisiones preventivas durante el entrenamiento deportivo.

7.1.13. Discusión

El análisis de los resultados obtenidos en las pruebas piloto permitió identificar patrones fisiológicos coherentes con el desarrollo progresivo de fatiga muscular durante el ejercicio. Las mediciones de saturación de oxígeno tisular (SmO_2), registradas mediante el sensor NIRS, mostraron una disminución moderada a lo largo de las repeticiones, con una recuperación parcial en las fases posteriores. Esta tendencia sugiere una reducción en la disponibilidad de oxígeno en el tejido muscular, posiblemente asociada al aumento en la demanda metabólica durante la contracción sostenida. No obstante, las diferencias entre mediciones consecutivas no fueron lo suficientemente marcadas como para evidenciar un patrón acumulativo robusto de fatiga, lo cual puede atribuirse a factores como la sensibilidad limitada del sensor, la variabilidad individual en la perfusión muscular o la intensidad moderada del protocolo aplicado.

En contraste, la señal electromiográfica (EMG) mostró una respuesta mucho más notoria ante las diferentes fases del protocolo. Se observaron incrementos claros en la amplitud de la señal durante la ejecución del ejercicio, con picos cercanos a 2.5 V en las mediciones posteriores al esfuerzo inicial.

Además, el sistema logró distinguir adecuadamente entre estados de reposo, contracción y recuperación, lo que demuestra una alta sensibilidad del módulo EMG frente a cambios en la activación neuromuscular. Este comportamiento permite inferir una mayor carga fisiológica conforme avanzó la sesión, reflejando la necesidad de un mayor reclutamiento de unidades motoras para mantener la fuerza de contracción, característica típica del desarrollo de fatiga muscular.

La relación entre ambas señales refuerza su valor como indicadores indirectos de fatiga: mientras que el descenso en SmO_2 refleja una disminución en la capacidad metabólica del músculo, el incremento en la amplitud de la señal del EMG indica una mayor exigencia neuromuscular. En conjunto, esta correlación sugiere que cuando la oxigenación disminuye, el sistema neuromuscular compensa mediante una mayor activación, lo que podría conducir a una sobrecarga si el esfuerzo se prolonga. Esta complementariedad entre señales refuerza la utilidad del enfoque multimodal propuesto para la estimación del estado fisiológico del músculo.

Sin embargo, es importante señalar que la señal EMG mostró una mayor capacidad discriminativa para identificar las distintas fases del protocolo. La señal NIRS, aunque útil, presentó limitaciones en su variabilidad entre sesiones, lo que reduce su precisión como indicador único. Este hallazgo destaca que, si bien ambas variables aportan valor, el módulo EMG se posiciona como una herramienta más sensible y precisa en el contexto de sesiones de corta duración o esfuerzos localizados.

Finalmente, la integración de estas mediciones con la percepción subjetiva del usuario (a través del feedback digital) permitió contrastar la experiencia interna del deportista con sus respuestas fisiológicas. Aunque los niveles de fatiga estimados fueron bajos en términos absolutos, el sistema logró reflejar de forma coherente las fases del ejercicio y el nivel de exigencia percibido. Este tipo de integración sienta las bases para el desarrollo de sistemas inteligentes de monitoreo, capaces de combinar datos objetivos y subjetivos para optimizar el rendimiento y prevenir sobrecargas en el entrenamiento deportivo.

Conclusiones

En este capítulo se presentan los aprendizajes más relevantes del estudio y se analiza cómo los resultados obtenidos dan respuesta al planteamiento del problema, validan las hipótesis formuladas y permiten alcanzar tanto el objetivo general como los objetivos específicos propuestos al inicio del trabajo. La selección de los sensores EMG y NIRS se fundamentó en un análisis comparativo riguroso mediante una tabla de selección de sensores, en la que ambos dispositivos obtuvieron un puntaje del 91 %, evidenciando su idoneidad técnica y funcional para el monitoreo de variables indirectas asociadas a la fatiga muscular.

El desarrollo del sistema portátil de monitoreo de fatiga muscular confirma la viabilidad de un enfoque multimodal que combina electromiografía (EMG) y espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS), junto con una aplicación en Flutter para la visualización en tiempo real. Esta solución demostró, en las pruebas con sentadillas profundas, su capacidad para registrar y representar de forma fiable las variaciones fisiológicas relacionadas con la fatiga, cumpliendo así con la hipótesis principal de que un dispositivo integrado permitiría un seguimiento continuo y preciso del estado muscular.

La calidad y consistencia de las señales recogidas avala la selección de sensores realizada. El módulo EMG registró picos cercanos a 2.5 V durante la fase de contracción y distinguió claramente los periodos de reposo, esfuerzo y recuperación, corroborando la hipótesis de sensibilidad diferencial de la señal eléctrica muscular. De forma paralela, la medición de SmO₂ replicó la tendencia inversa esperada, disminuyendo progresivamente conforme aumentaba la amplitud de la EMG, lo que valida la hipótesis secundaria sobre la correlación entre ambos parámetros como indicadores complementarios de fatiga.

Sin embargo, se observó que las variaciones en las mediciones del sensor NIRS entre las fases de descanso, ejercicio y recuperación fueron considerablemente más sutiles que las registradas por el EMG. Esta baja variabilidad puede generar ambigüedad en la interpretación de los datos, especialmente en análisis automáticos o en contextos donde se requiere una detección clara de la fatiga muscular. Por tanto, se concluye que, para los fines del presente sistema portátil, la señal EMG ofrece una mayor capacidad indicativa de fatiga, siendo más precisa y confiable. No obstante, se reconoce el potencial del NIRS como herramienta complementaria, especialmente si se considera en futuras iteraciones un sensor más robusto y sensible que permita obtener mediciones más diferenciadas y consistentes en distintos estados fisiológicos.

Por otro lado, la transmisión inalámbrica y el almacenamiento de los datos en Firebase Realtime Database mostraron un rendimiento estable y seguro, sin pérdidas apreciables de información y con sincronización inmediata de cada bloque de 30 mediciones y los datos fueron enviados a la nube

mediante conexión Wi-Fi o, en su defecto, a través de datos móviles, lo que garantiza flexibilidad operativa en distintos entornos de entrenamiento.

Además, la interfaz web multiplataforma desarrollada en Flutter ofrece una experiencia de usuario intuitiva, accesible tanto en Android como en iOS, y no requiere de conocimientos técnicos avanzados para su operación.

Finalmente, los resultados obtenidos a partir del sistema de monitoreo permitieron comparar de manera efectiva el comportamiento fisiológico medido —como la señal EMG y la saturación de oxígeno muscular (S_{mO_2})— con las tendencias reportadas en la literatura científica. Se observaron patrones esperados, como el incremento de la actividad electromiográfica durante el esfuerzo físico y su posterior disminución en la fase de recuperación, así como una disminución en los niveles de oxigenación muscular durante el ejercicio. Estas observaciones coinciden con estudios previos y respaldan la validez del sistema desarrollado.

Trabajos futuros

9.1. Trabajos Futuros

Como proyección futura de este trabajo, se propone aplicar el sistema desarrollado en contextos de entrenamiento más prolongados y estructurados. En esta fase inicial, las pruebas se realizaron sobre un ejercicio específico orientado a la activación del músculo vasto lateral (la sentadilla profunda). No obstante, una siguiente etapa podría consistir en evaluar el comportamiento de las variables fisiológicas a lo largo de sesiones completas de entrenamiento. Esto permitiría analizar la evolución de la fatiga muscular en escenarios más representativos y cercanos a la práctica deportiva real, así como observar variaciones interindividuales según el nivel de condición física o el tipo de actividad.

Por otra parte, se contempla el perfeccionamiento del diseño físico del dispositivo. Aunque el prototipo actual cumple adecuadamente su función, resulta necesario avanzar hacia una presentación más refinada y profesional, superando el enfoque meramente experimental. Para ello, se plantea rediseñar la placa de circuito impreso (PCB), optimizar la carcasa mediante impresión 3D y mejorar la interfaz gráfica, con el fin de ofrecer una experiencia más intuitiva, robusta y estéticamente agradable para el usuario final. El objetivo es aproximarse a una versión comercializable, ergonómica y adecuada para el uso continuo por parte de deportistas.

En cuanto al procesamiento y transmisión de señales, se pretende implementar una arquitectura más eficiente que permita una sincronización precisa entre los distintos sensores. De igual manera, se proyecta una integración más sólida entre la plataforma electrónica y la aplicación móvil, a fin de mejorar tanto la funcionalidad general del sistema como la experiencia de uso. Esto incluiría optimizaciones en el manejo de datos, velocidad de respuesta y confiabilidad en entornos exigentes.

Adicionalmente, se prevé extender el sistema hacia la detección de fatiga en el miembro inferior mediante la integración de sensores FSR (Force Sensitive Resistor). Específicamente, se plantea el uso del sensor FSR 406 embebido en una plantilla plantar, con el propósito de monitorear variaciones en la fuerza de reacción durante ejercicios repetitivos, como el pedaleo. A través de este enfoque, se espera correlacionar la reducción progresiva de los picos de fuerza y los cambios en el patrón temporal de aplicación de presión con indicadores de fatiga del vasto lateral. No obstante, se reconoce que una de las principales limitaciones de este tipo de sensores es la no linealidad en la relación entre fuerza y resistencia, lo cual puede dificultar el procesamiento de señales. Este desafío técnico deberá ser abordado cuidadosamente en futuras fases de desarrollo.

Finalmente, se aspira a validar la utilidad del sistema en entornos reales de entrenamiento, incorporar funciones predictivas que permitan gestionar de forma proactiva la carga física, y continuar con la optimización integral del diseño industrial, la arquitectura de adquisición y la visualización de los datos recogidos en la interfaz de usuario. Estos avances serán claves para el desarrollo de una

herramienta integral de monitoreo fisiológico, orientada tanto al rendimiento deportivo como a la prevención de lesiones por sobreuso.

Además, esta plataforma sienta las bases para futuras funcionalidades avanzadas, tales como el análisis predictivo automatizado, la emisión de alertas tempranas y el seguimiento longitudinal del estado fisiológico de cada deportista.

CAPÍTULO 10

Anexos

Anexo 1 – Manual de Usuario

Ensamblaje componentes mecánicos

El sistema cuenta con dos módulos principales: el módulo del sensor NIRS y el módulo del circuito general, que integra tanto el circuito electrónico como el módulo EMG.

En primer lugar, se debe insertar cuidadosamente el sensor NIRS dentro de su carcasa correspondiente. Luego, se coloca la tapa protectora y se asegura su fijación. Este módulo debe posicionarse sobre el músculo a evaluar (por ejemplo, el vasto lateral), alineado con las fibras musculares y sujeto mediante una banda con velcro, garantizando una correcta lectura óptica.

En el segundo módulo, se introduce el circuito principal en su respectiva carcasa. A continuación, se insertan las baterías en el compartimiento asignado, se cierra la tapa y se activa el interruptor de encendido. Ambos módulos deben ser fijados al deportista mediante una banda elástica y un sistema de resorte con velcro, asegurando estabilidad, firmeza y comodidad durante el uso continuo.

Calibración del hardware

La calibración de hardware se aplica únicamente al módulo NIRS. Antes de iniciar la medición, se debe realizar una lectura de referencia con el sensor orientado al aire (sin contacto con la piel), lo que permite establecer un punto base de comparación. Posteriormente, se coloca el sensor en contacto directo con la piel para iniciar la medición real.

El módulo EMG no requiere calibración previa; su funcionamiento se activa automáticamente al encender el sistema, capturando las señales eléctricas de forma inmediata a través de los electrodos.

Configuración del software

Para la correcta configuración del sistema, se debe ejecutar inicialmente el código cargado en el microcontrolador ESP32 mediante el entorno Arduino IDE. Una vez encendido el hardware, se accede a la aplicación desde cualquier navegador web compatible.

Dentro de la aplicación, se debe hacer clic en el botón "Iniciar medición". Esta acción establece la conexión con el sistema físico y activa la transmisión de datos, permitiendo recibir las señales en tiempo real desde los sensores NIRS y EMG.

Operación

Una vez instalado correctamente el sistema en el usuario, se deben verificar las conexiones y encender el interruptor de alimentación. Esto habilita la comunicación entre el microcontrolador y la aplicación.

Al confirmar que los módulos están fijados correctamente y que el sistema está encendido, se procede a iniciar la medición desde la interfaz gráfica. En este punto, el sistema comenzará a adquirir, enviar y visualizar los datos fisiológicos.

Solución de Problemas

En caso de que el sistema no funcione correctamente, se recomienda realizar las siguientes verificaciones:

- Asegurar que todos los sensores estén correctamente integrados y conectados al circuito.

- Confirmar que el dispositivo ESP32 esté conectado a una red Wi-Fi estable o, si es necesario, utilizar datos móviles como alternativa.

- Verificar el estado de las baterías y reemplazarlas si presentan bajo voltaje.

- Comprobar que el sensor NIRS esté bien posicionado y no se haya desplazado.

- Asegurarse de haber presionado el botón Iniciar medición.^{en} la aplicación para habilitar la comunicación con los sensores.

Si después de estas acciones el problema persiste, se recomienda reiniciar el sistema, revisar las conexiones físicas, y asegurarse de que el firmware esté correctamente cargado en el microcontrolador.

Anexo 2 – Manual de Usuario de la Aplicación *Fit Monitor*

Bienvenido al manual de usuario de la aplicación *Fit Monitor*. Este documento está organizado en secciones que cubren desde el registro hasta la comparación de mediciones.

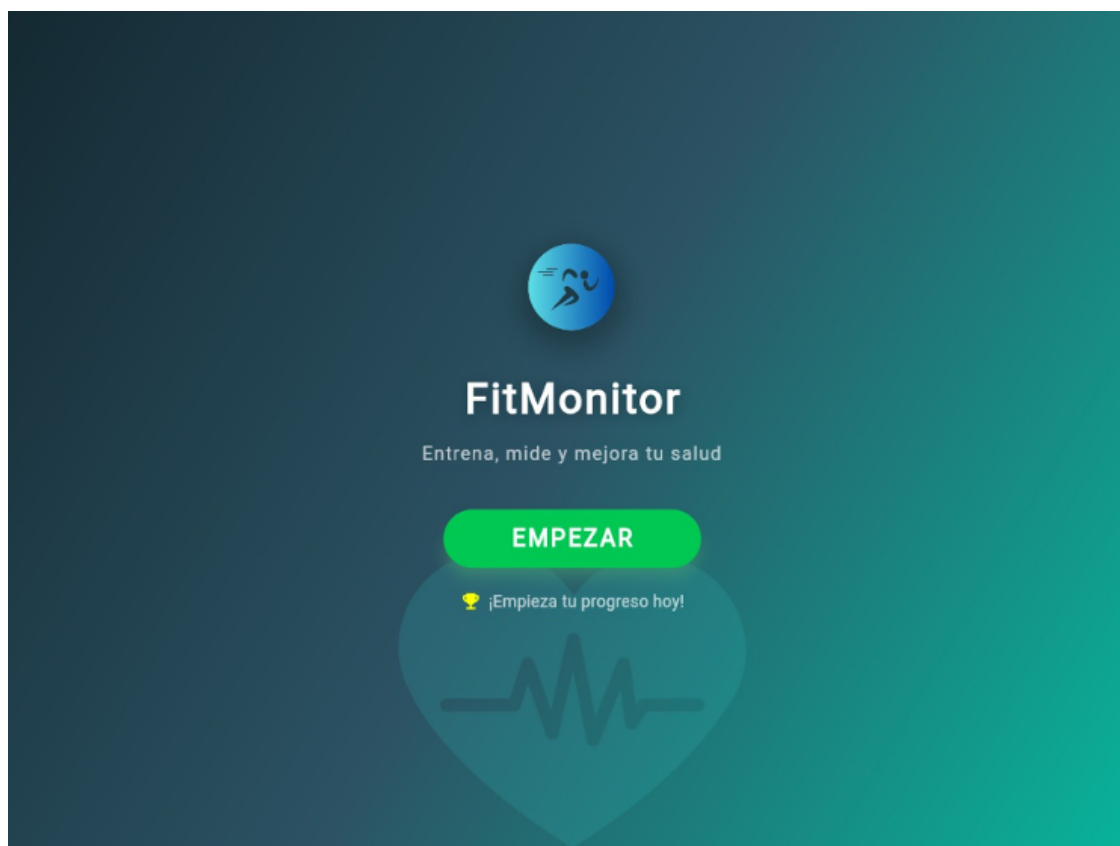


Figura 10.1: Pantalla de bienvenida

Inicio

Al ingresar a la aplicación, se presenta una pantalla de bienvenida (Figura 10.1) con un botón que conduce al inicio de sesión (Figura 10.2).

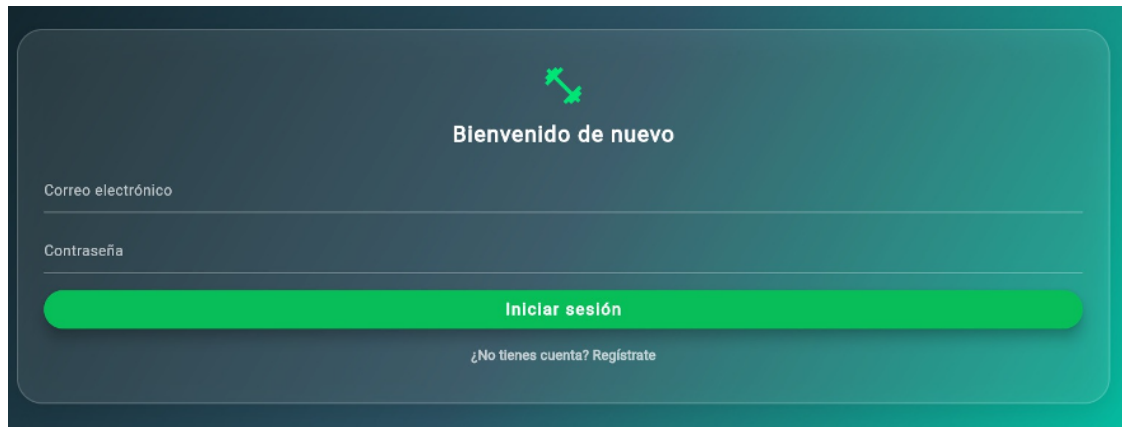


Figura 10.2: Pantalla de inicio de sesión

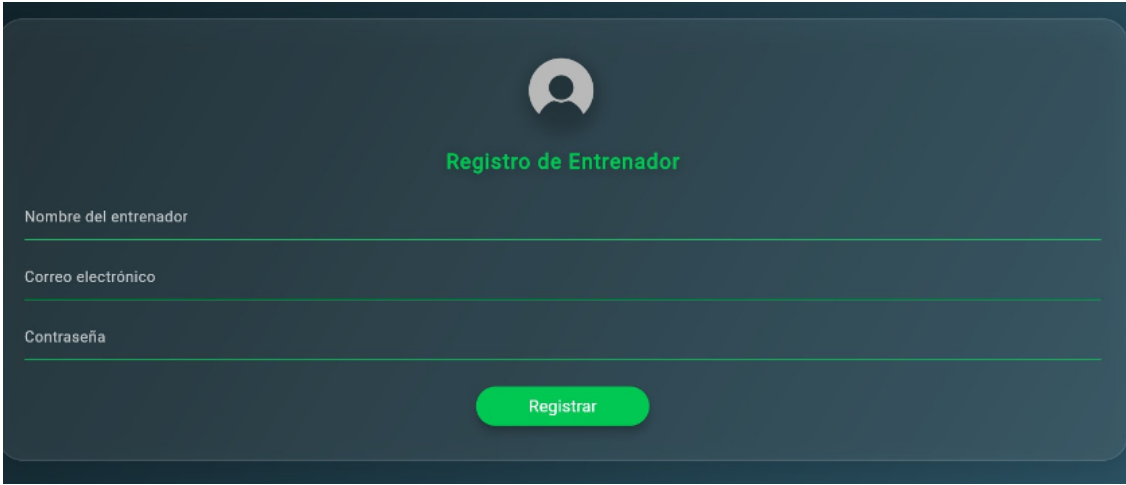
Inicio de Sesión

En esta pantalla, el usuario debe ingresar su correo electrónico y contraseña para acceder a su cuenta. En caso de no estar registrado, puede seleccionar la opción “Registrarse” para crear una nueva (Figura 10.3).

Registro de Entrenador

Para registrarse como nuevo usuario:

1. Pulsar el botón “Registrarse”.
2. Completar los campos requeridos (nombre, correo electrónico, contraseña).
3. Una vez registrado, podrá iniciar sesión con sus credenciales.



Registro de Entrenador

Nombre del entrenador

Correo electrónico

Contraseña

Registrar

Figura 10.3: Pantalla de registro para entrenadores

Menú Principal

Una vez iniciada la sesión, se accede al menú principal, desde donde es posible:

- Agregar deportistas.
- Consultar la lista de deportistas registrados.
- Acceder al perfil del usuario y a las configuraciones generales.



Figura 10.4: Menú principal

Gestión de Deportistas

Agregar Deportista:

1. Pulsar el botón “Agregar deportista”.
2. Completar los datos solicitados.
3. Guardar la información.

Editar o Eliminar Deportista:

1. Seleccionar al deportista desde la lista.
2. Pulsar “Editar” para modificar sus datos o “Eliminar” para borrar el perfil.

Gestión del Entrenador

Editar Perfil del Entrenador:

1. Acceder al ícono en la parte superior derecha.
2. Modificar los datos básicos.
3. Cambiar la foto de perfil si se desea.

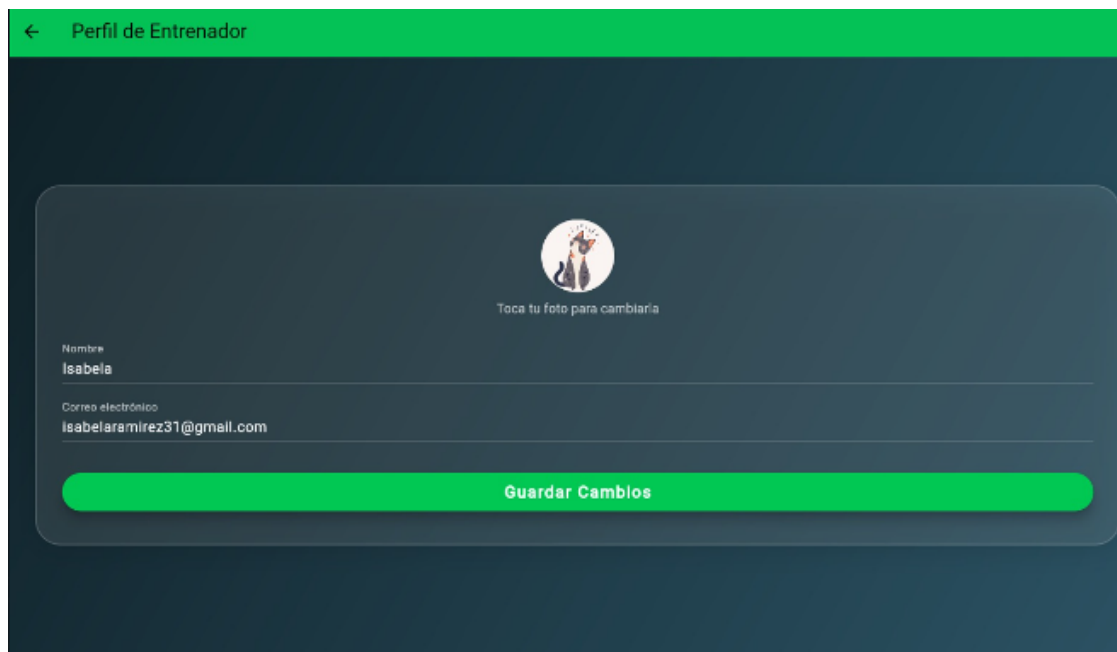


Figura 10.5: Perfil del entrenador

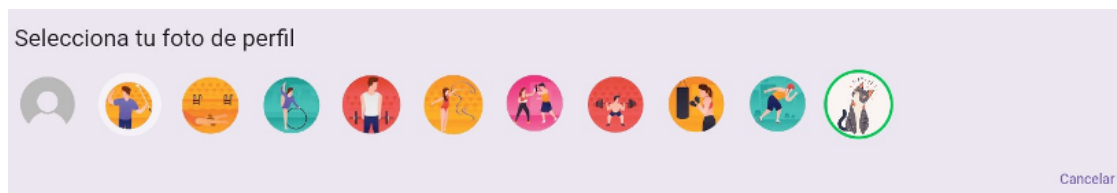


Figura 10.6: Cambio de foto de perfil del entrenador

Perfil del Deportista

Al seleccionar un deportista, se accede a su perfil. Desde allí es posible:

- Iniciar una nueva sesión de medición.
- Visualizar datos en tiempo real de sensores NIRS y EMG.

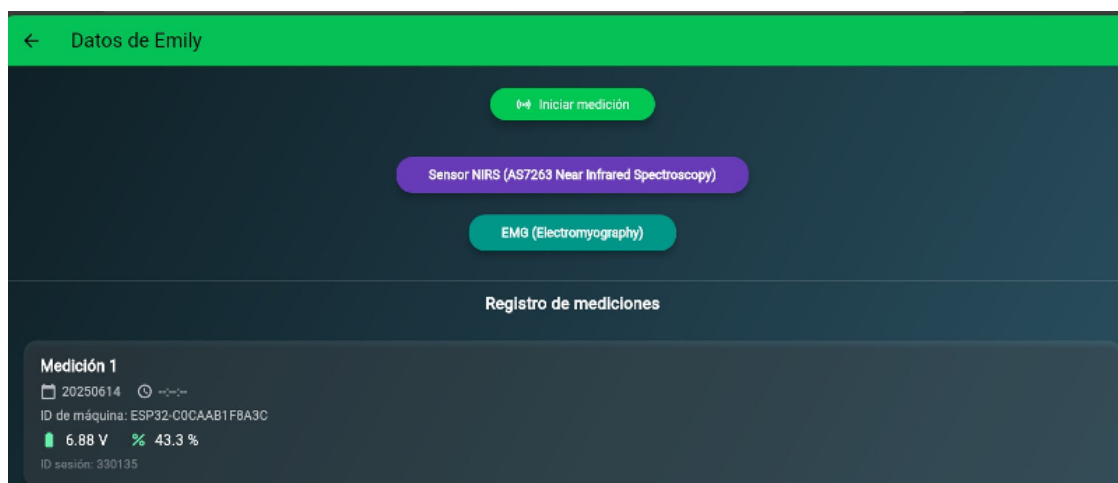


Figura 10.7: Perfil del deportista

Mediciones y Sensores

- **Iniciar medición:** Comienza una nueva sesión.
- **Visualización NIRS/EMG:** Permite analizar en tiempo real las señales adquiridas mediante gráficos y estadísticas.



Figura 10.8: Visualización del sensor EMG



Figura 10.9: Visualización del sensor NIRS

Historial y Análisis

- **Calendario:** Consultar registros anteriores.
- **Mediciones del día:** Visualizar los resultados diarios.
- **Medición #:** Acceder a gráficos detallados de una medición específica.

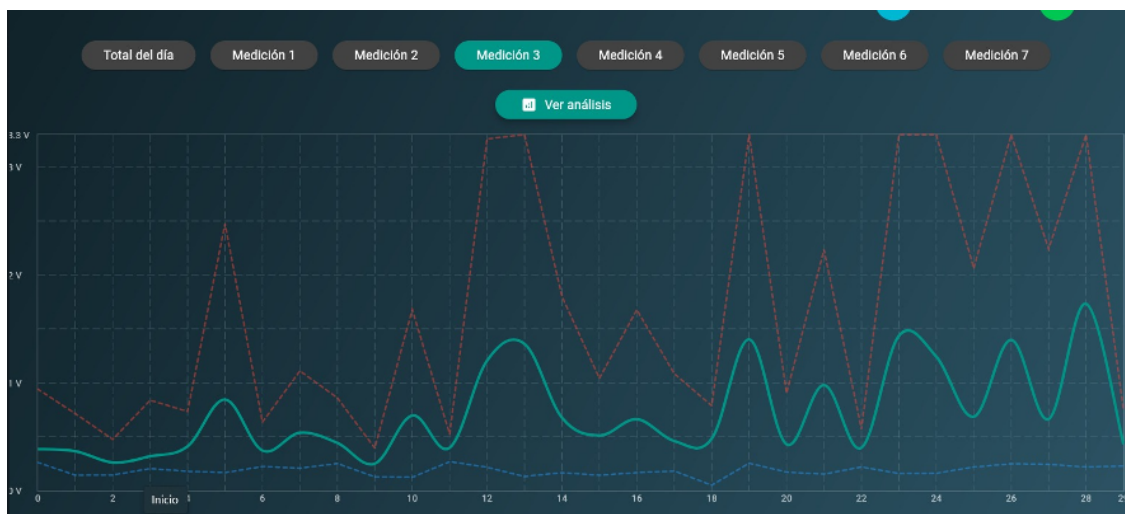


Figura 10.10: EMG - Medición 3



Figura 10.11: NIRS - Medición 1

Ver Análisis: Muestra información técnica y resumida de las mediciones realizadas.

Análisis

- **Total del día:** Resume la jornada de entrenamiento, proporcionando un panorama general de las actividades realizadas.

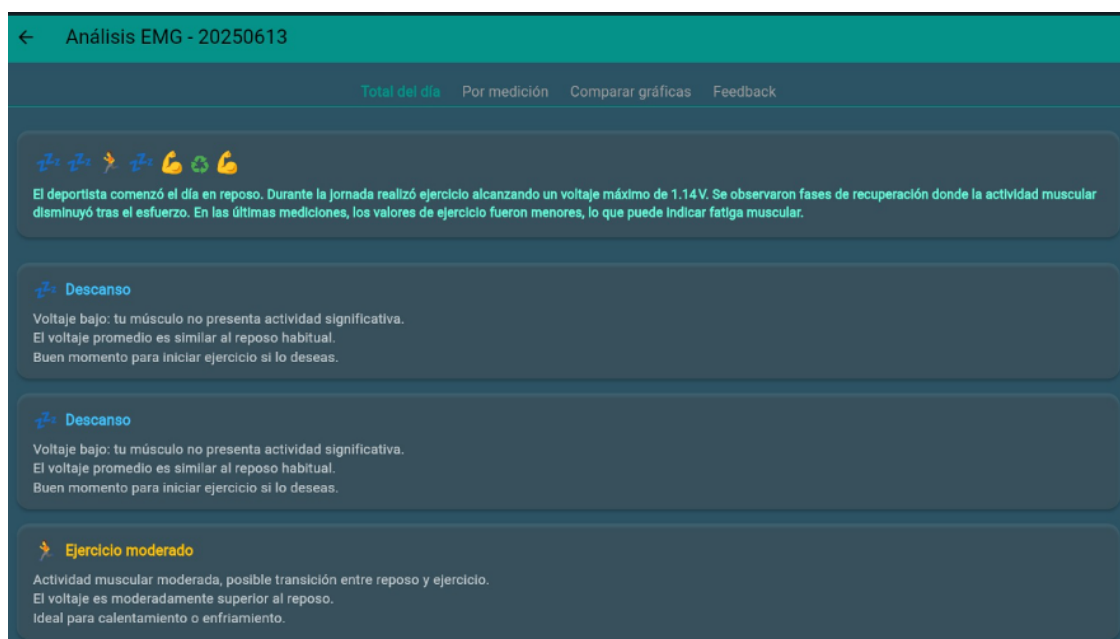


Figura 10.12: Análisis general - EMG

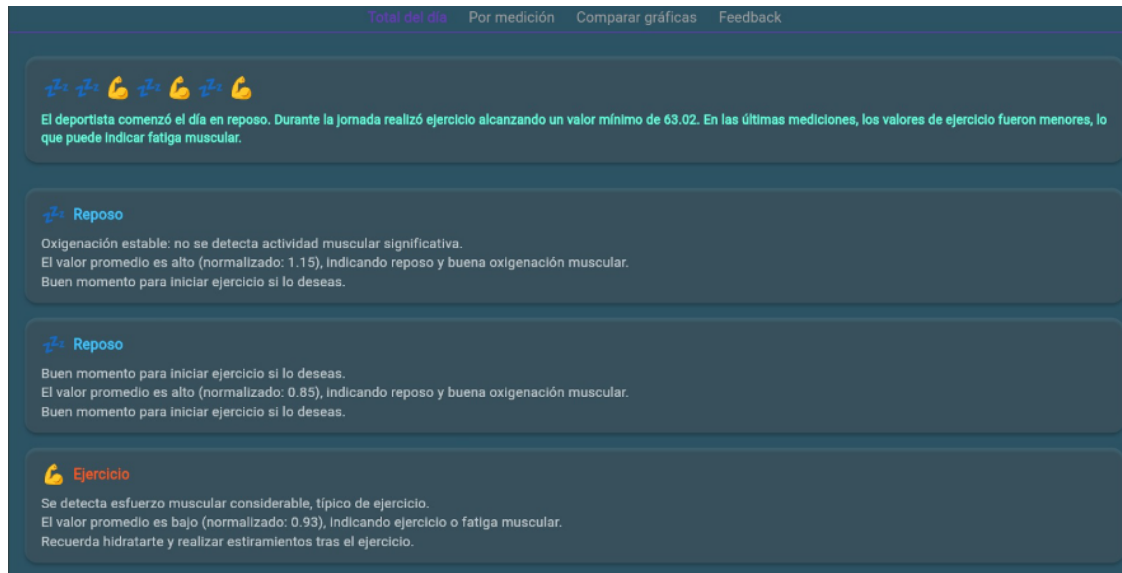


Figura 10.13: Análisis general - NIRS

- **Por medición:** Describe cada sesión en detalle, incluyendo parámetros técnicos.

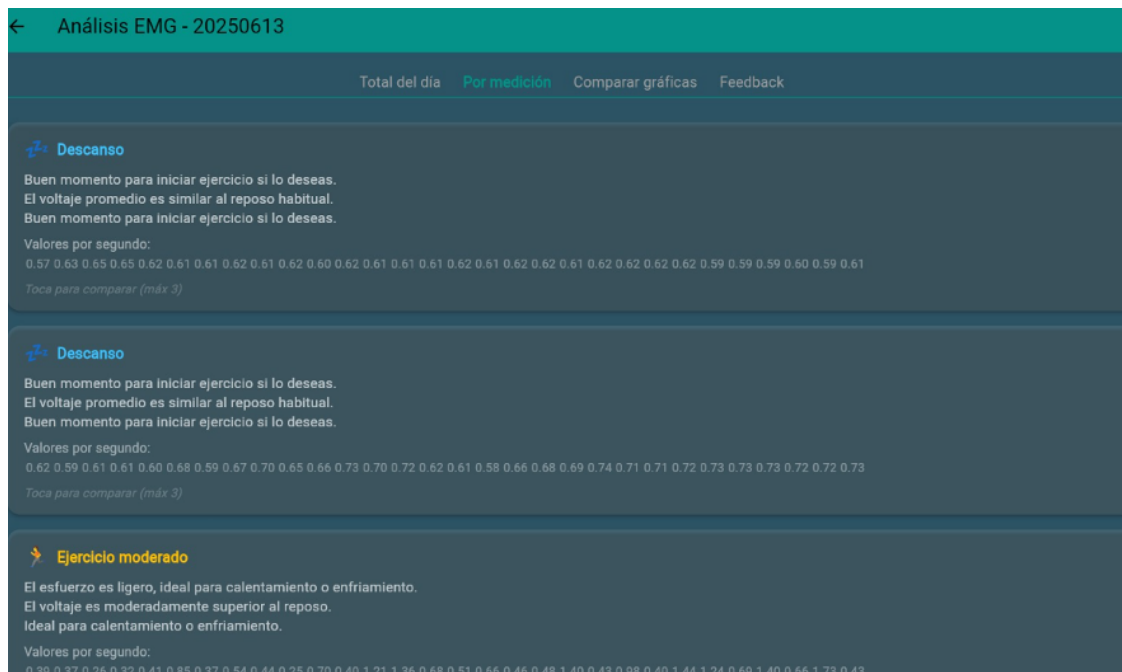


Figura 10.14: Análisis por medición - EMG

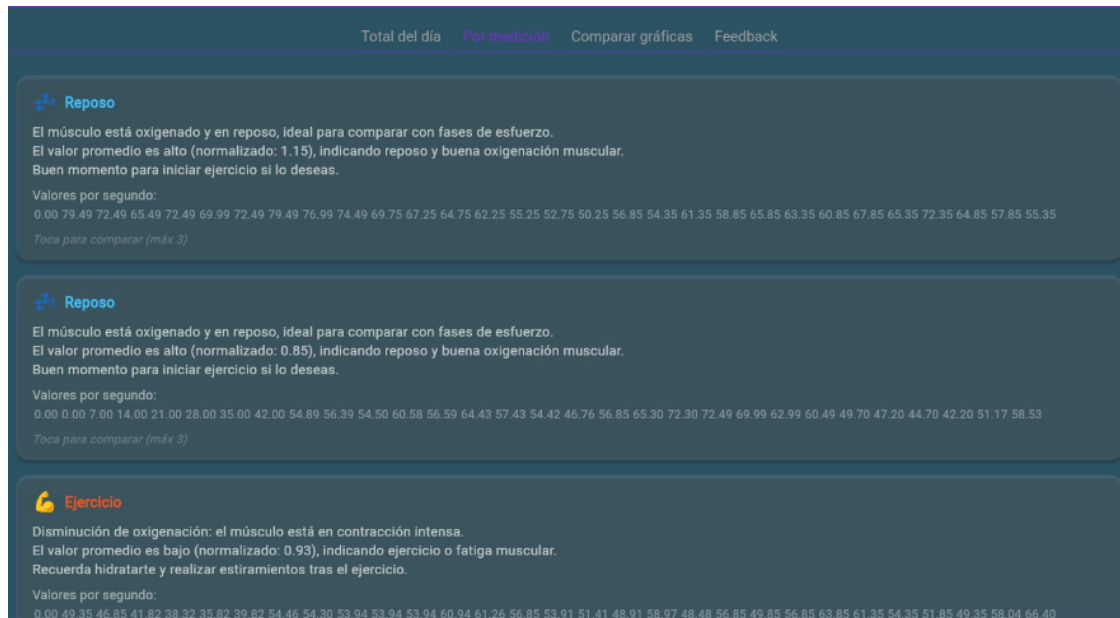


Figura 10.15: Análisis por medición - NIRS

Comparación y Retroalimentación

- **Comparar gráficas:** Permite seleccionar hasta tres gráficas distintas para una comparación visual detallada.

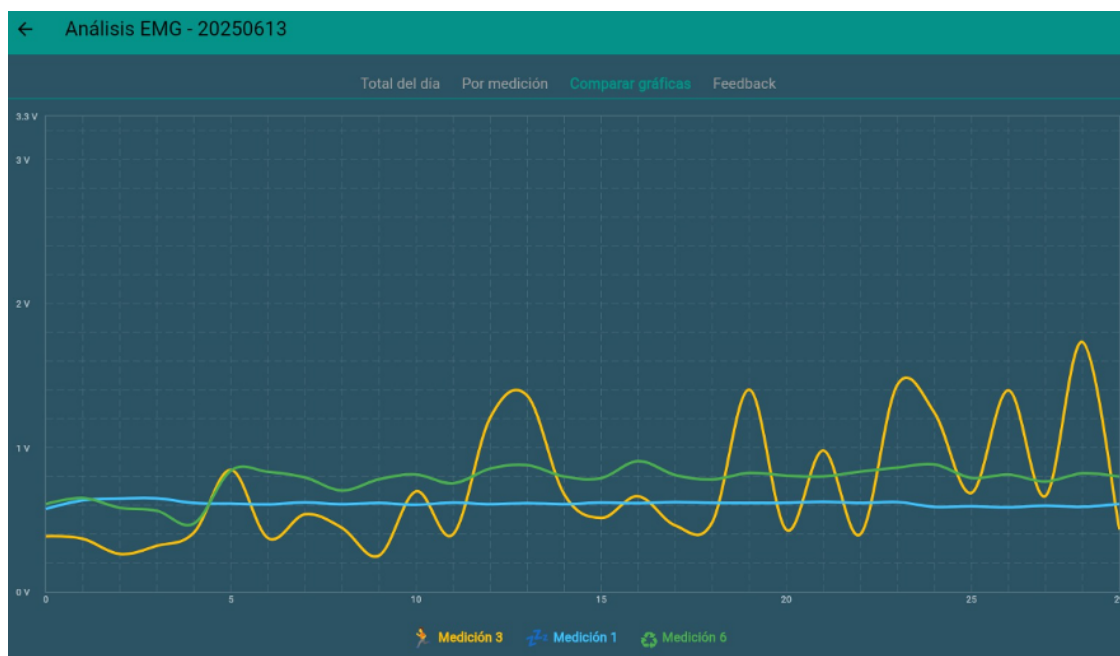


Figura 10.16: Comparación de gráficas - EMG

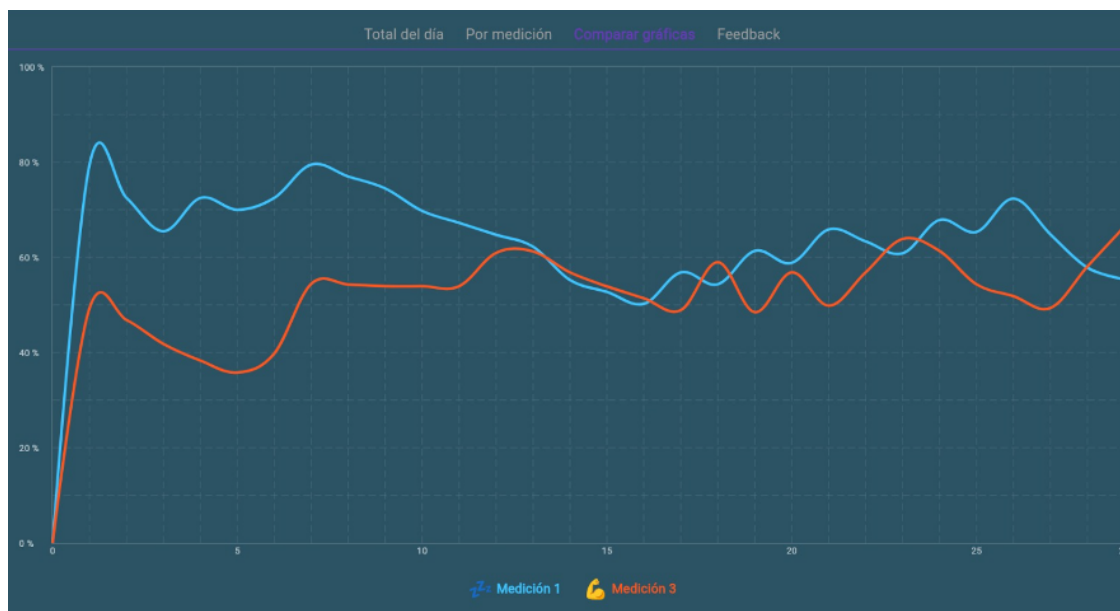


Figura 10.17: Comparación de gráficas - NIRS

- **Feedback:** Permite registrar cómo se sintió el deportista tras cada sesión.

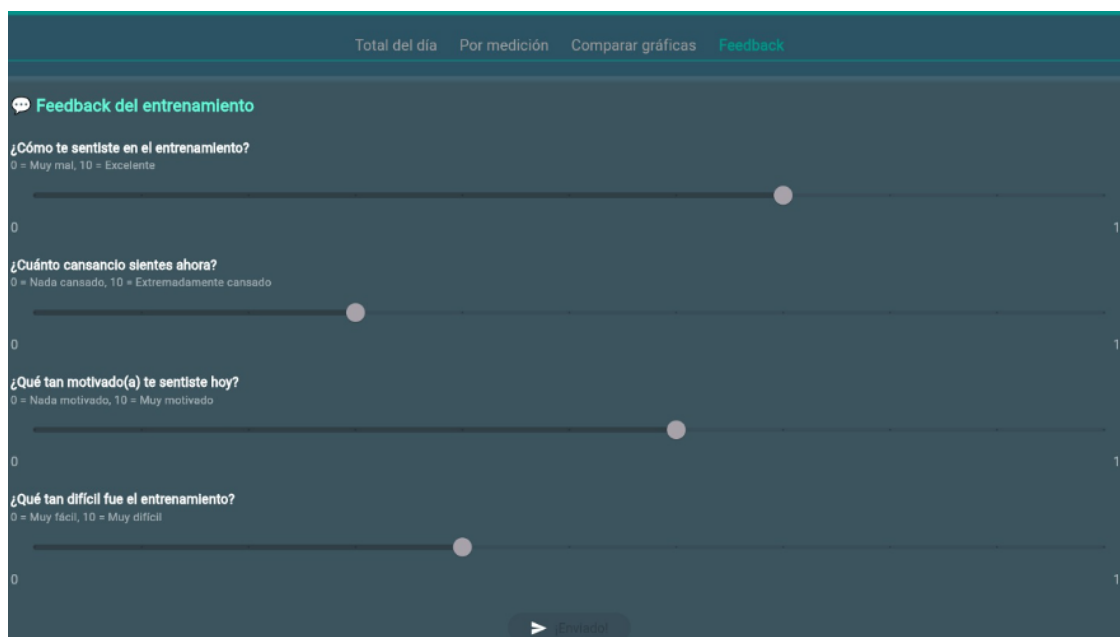


Figura 10.18: Pantalla de retroalimentación del deportista

Anexo 3 – Consentimiento informado entrenadores

FORMATO CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA LA PARTICIPACIÓN EN ENCUESTAS SOBRE PERCEPCIONES SUBJETIVAS DE FATIGA MUSCULAR

Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento para mejorar el plan de entreno en deportistas de alto rendimiento.

Nosotras, Isabela Ramírez Agredo y Mariana Nieto Ángel, estudiantes del programa de Ingeniería Biomédica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, bajo la dirección del profesor PhD. Luis Eduardo Tobón Llano y la codirección de la profesora Luisa Fernanda García Ramírez, estamos desarrollando una investigación con fines académicos avalada por el programa de Ingeniería Biomédica de nuestra universidad.

El presente estudio tiene como objetivo diseñar un sistema portátil de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular en deportistas de alto rendimiento mediante el uso de sensores. Esto con el fin de proporcionar herramientas que permitan a los entrenadores ajustar los planes de entrenamiento de manera más precisa y eficiente. Para lograrlo, invitamos a los entrenadores de diferentes clubes a participar en una encuesta diseñada para recopilar información sobre la percepción subjetiva de la fatiga muscular y las estrategias actualmente utilizadas para su gestión.

La encuesta se realizará de manera virtual a través de la plataforma Google Forms, con una duración aproximada de cinco minutos. Esta podrá ser respondida desde cualquier dispositivo con conexión a Internet. Los entrenadores responderán preguntas relacionadas con los métodos empleados para evaluar la fatiga, los criterios utilizados para modificar la intensidad del entrenamiento y las herramientas de monitoreo implementadas.

La participación en el estudio es completamente voluntaria, no implicará ningún tipo de remuneración económica ni generará costos para los participantes. Además, los participantes podrán retirarse en cualquier momento sin necesidad de justificar su decisión ni enfrentar repercusiones.

Este estudio se clasifica como de riesgo mínimo según la Resolución 008430 de 1993 del Ministerio de Salud y Protección Social, por lo que no se espera que los participantes experimenten efectos adversos. Sin embargo, en caso de presentar incomodidad al responder alguna pregunta, podrá omitirla o abandonar la encuesta.

Los resultados obtenidos serán utilizados únicamente con fines académicos y de investigación, sin ser socializados con los participantes ni divulgados de manera pública. Esta información será almacenada de manera segura en servidores protegidos, a los cuales solo tendrá acceso el equipo investigador, y será conservada durante un período de cinco años, tras el cual será eliminada de forma segura.

En caso de dudas o inquietudes, los participantes podrán comunicarse con las investigadoras a través de los correos isaramirez31@javerianacali.edu.co y

mariananieto2003@javerianacali.edu.co o con los docentes responsables. Si desea presentar una queja o realizar una consulta sobre sus derechos como participante, podrá contactar al Comité de Ética de Investigación de la Pontificia Universidad Javeriana Cali mediante el correo etica.investigacion@javerianacali.edu.co.

Declaro que soy mayor de edad, me encuentro en pleno uso de mis facultades mentales y acepto participar en este estudio de manera voluntaria tras haber comprendido su objetivo, procedimientos, riesgos y beneficios.

Nombre del Participante: _____

Firma del Participante: _____

Cédula: _____

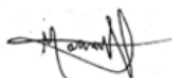
Teléfono: _____

Fecha: _____

Los investigadores responsables certificamos que hemos informado al participante sobre el propósito y naturaleza de la investigación, así como sobre los posibles riesgos y el uso de los resultados del estudio.

Datos del Investigador 1:

Firma:



Cédula: 1.007.519.659

Fecha: 10/06/2025

Datos del Investigador 2:

Firma:



Cédula: 1.059.234.112

Fecha: 10/06/2025

Figura 10.20: Consentimiento informado entrenadores

Anexo 4 – Consentimiento informado deportistas para participación en encuestas

FORMATO ASENTIMIENTO INFORMADO PARA LA PARTICIPACIÓN EN ENCUESTAS SOBRE PERCEPCIONES SUBJETIVAS DE FATIGA MUSCULAR

Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento para mejorar el plan de entreno en deportistas de alto nivel

Nosotras, Isabela Ramírez Agredo y Mariana Nieto Ángel, estudiantes del programa de Ingeniería Biomédica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, bajo la dirección del profesor PhD. Luis Eduardo Tobón Llano y la codirección de la profesora Luisa Fernanda García Ramírez, estamos desarrollando una investigación con fines académicos avalada por el programa de Ingeniería Biomédica de nuestra universidad.

El presente estudio tiene como objetivo diseñar un sistema portátil de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular en deportistas de alto rendimiento mediante el uso de sensores. Esto con el fin de proporcionar herramientas que permitan a los entrenadores ajustar los planes de entrenamiento de manera más precisa y eficiente. Para lograrlo, invitamos a los deportistas del Club de Patinaje Huellas a participar en una encuesta diseñada para recopilar información sobre la percepción subjetiva de la fatiga muscular y las estrategias actualmente utilizadas para su gestión.

La encuesta se realizará de manera virtual a través de la plataforma Google Forms, con una duración aproximada de cinco minutos. Esta podrá ser respondida desde cualquier dispositivo con conexión a Internet. Los deportistas proporcionarán información sobre su experiencia con la fatiga muscular, la frecuencia con la que la experimentan, los síntomas percibidos y los métodos de recuperación empleados. Además, se explorará su interés en la utilización de un dispositivo portátil para el monitoreo de la fatiga muscular y su percepción sobre la utilidad de esta herramienta para optimizar el desempeño deportivo.

La participación en el estudio es completamente voluntaria, no implicará ningún tipo de remuneración económica ni generará costos para los participantes. Además, los participantes podrán retirarse en cualquier momento sin necesidad de justificar su decisión ni enfrentar repercusiones.

Este estudio se clasifica como de riesgo mínimo según la Resolución 008430 de 1993 del Ministerio de Salud y Protección Social, por lo que no se espera que los participantes experimenten efectos adversos. Sin embargo, en caso de presentar incomodidad al responder alguna pregunta, podrá omitirla o abandonar la encuesta.

Los resultados obtenidos serán utilizados únicamente con fines académicos y de investigación, sin ser socializados con los participantes ni divulgados de manera pública. Esta información será almacenada de manera segura en servidores protegidos, a los cuales solo tendrá acceso el equipo investigador, y será conservada durante un período de cinco años, tras el cual será eliminada de forma segura.

En caso de dudas o inquietudes, los participantes podrán comunicarse con las investigadoras a través de los correos isaramirez31@javerianacali.edu.co y mariananieto2003@javerianacali.edu.co o con los docentes responsables. Si desea presentar una queja o realizar una consulta sobre sus derechos como participante, podrá contactar al Comité de Ética de Investigación de la Pontificia Universidad Javeriana Cali mediante el correo etica.investigacion@javerianacali.edu.co

Yo, _____, menor de edad, declaro que he recibido explicaciones claras y comprensibles sobre el estudio, incluyendo su objetivo, procedimientos, riesgos y beneficios. Entiendo que mi participación es voluntaria y que puedo retirarme en cualquier momento sin ninguna consecuencia.

Nombre del Menor: _____

Firma del Menor: _____

Tarjeta de Identidad: _____

Teléfono: _____

Fecha: _____

Yo, _____, en calidad de padre, madre o acudiente legal del menor _____, declaro que he recibido explicaciones claras y comprensibles sobre el estudio, incluyendo su objetivo, procedimientos, posibles riesgos y beneficios. Entiendo que la participación del menor en esta investigación es completamente voluntaria y que puede retirarse en cualquier momento sin ninguna consecuencia. Asimismo, autorizo su participación en el estudio y firmo este consentimiento como manifestación de mi aprobación.

Nombre del Padre, Madre o Acudiente: _____

Firma del Padre, Madre o Acudiente: _____

Cédula: _____

Teléfono: _____

Fecha: _____

Los investigadores responsables certificamos que hemos informado al participante, en este caso, menor de edad, sobre el propósito y naturaleza de la investigación, así como sobre los posibles riesgos y el uso de los resultados del estudio.

Datos del Investigador 1:**Firma:****Cédula:** 1.007.619.659**Fecha:** 9/06/2025**Datos del Investigador 2:****Firma:****Cédula:** 1.059.234.112**Fecha:** 9/06/2025**FORMATO AUTORIZACIÓN DE CONTROL PARENTAL PARA LA PARTICIPACIÓN EN ENCUESTAS SOBRE PERCEPCIONES SUBJETIVAS DE FATIGA MUSCULAR****Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento para mejorar el plan de entreno en deportistas de alto nivel**

Nosotras, Isabela Ramírez Agredo y Mariana Nieto Ángel, estudiantes del programa de Ingeniería Biomédica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, bajo la dirección del profesor PhD. Luis Eduardo Tobón Llano y la codirección de la profesora Luisa Fernanda García Ramírez, estamos desarrollando una investigación con fines académicos avalada por el programa de Ingeniería Biomédica de nuestra universidad.

El presente estudio tiene como objetivo diseñar un sistema portátil de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular en deportistas de alto rendimiento mediante el uso de sensores. Esto con el fin de proporcionar herramientas que permitan a los entrenadores ajustar los planes de entrenamiento de manera más precisa y eficiente. Para lograrlo, invitamos a los deportistas del Club de Patinaje Huellas a participar en una encuesta diseñada para recopilar información sobre la percepción subjetiva de la fatiga muscular y las estrategias actualmente utilizadas para su gestión.

La encuesta se realizará de manera virtual a través de la plataforma Google Forms, con una duración aproximada de cinco minutos. Esta podrá ser respondida desde cualquier dispositivo con conexión a Internet. Los deportistas proporcionarán información sobre su experiencia con la fatiga muscular, la frecuencia con la que la experimentan, los síntomas percibidos y los métodos de recuperación empleados. Además, se explorará su interés en la utilización de

un dispositivo portátil para el monitoreo de la fatiga muscular y su percepción sobre la utilidad de esta herramienta para optimizar el desempeño deportivo.

La participación en el estudio es completamente voluntaria, no implicará ningún tipo de remuneración económica ni generará costos para los participantes. Además, los participantes podrán retirarse en cualquier momento sin necesidad de justificar su decisión ni enfrentar repercusiones.

Este estudio se clasifica como de riesgo mínimo según la Resolución 008430 de 1993 del Ministerio de Salud y Protección Social, por lo que no se espera que los participantes experimenten efectos adversos. Sin embargo, en caso de presentar incomodidad al responder alguna pregunta, podrá omitirla o abandonar la encuesta.

Los resultados obtenidos serán utilizados únicamente con fines académicos y de investigación, sin ser socializados con los participantes ni divulgados de manera pública. Esta información será almacenada de manera segura en servidores protegidos, a los cuales solo tendrá acceso el equipo investigador, y será conservada durante un período de cinco años, tras el cual será eliminada de forma segura.

En caso de dudas o inquietudes, los participantes podrán comunicarse con las investigadoras a través de los correos isaramirez31@javerianacali.edu.co y mariananieto2003@javerianacali.edu.co o con los docentes responsables. Si desea presentar una queja o realizar una consulta sobre sus derechos como participante, podrá contactar al Comité de Ética de Investigación de la Pontificia Universidad Javeriana Cali mediante el correo etica.investigacion@javerianacali.edu.co.

Yo, _____, en calidad de padre, madre o acudiente legal del menor _____, declaro que he sido informado/a sobre el estudio, sus objetivos, procedimientos, riesgos y beneficios. Autorizo la participación de mi hijo/a en la investigación, entendiendo que su participación es voluntaria y que puede retirarse en cualquier momento sin consecuencias.

Nombre del Padre, Madre o Acudiente: _____

Firma del Padre, Madre o Acudiente: _____


Cédula: _____

Teléfono: _____

Fecha: _____

Los investigadores responsables certificamos que hemos informado al participante y a su acudiente sobre el propósito y naturaleza de la investigación, así como sobre los posibles riesgos y el uso de los resultados del estudio.

Datos del Investigador 1:

Firma: 

Cédula: 1.007.619.659

Fecha: 9/06/2025

Datos del Investigador 2:

Firma: *Isabela R.*

Cédula: 1.059.234.112

Fecha: 9/06/2025

Anexo 5 – Consentimiento informado deportista para participación en prueba piloto

FORMATO CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA LA PARTICIPACIÓN EN PRUEBAS PILOTO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LA FATIGA MUSCULAR

Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento para mejorar el plan de entreno en deportistas de alto nivel

Se invita a los deportistas y entrenadores del Club de Patinaje Huellas a participar en una investigación liderada por las estudiantes Isabela Ramírez Agredo y Mariana Nieto Ángel de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, bajo la dirección del profesor PhD. Luis Eduardo Tobón Llano y la codirección de la profesora Luisa Fernanda García Ramírez. Este estudio es parte del proyecto de pregrado titulado "**Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento para mejorar el plan de entreno en deportistas de alto nivel**", requisito para optar por el título de Ingeniero Biomédico. El proyecto es estrictamente académico y cuenta con el aval del programa de Ingeniería Biomédica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

El propósito de este estudio es desarrollar un sistema de monitoreo portátil de variables indirectas de fatiga muscular mediante sensores integrados, con el fin de que los entrenadores puedan ajustar sus programas de entrenamiento para deportistas de alto rendimiento. La participación en las pruebas piloto incluirá un entrenador como observador y entre uno y dos deportistas, quienes serán sometidos a un plan de entrenamiento diseñado específicamente por el entrenador. La prueba tendrá una duración aproximada de seis horas, durante las cuales se colocará el prototipo en la pierna de los participantes, ya que es el área donde se desea captar la señal muscular. Durante la realización del entrenamiento, el dispositivo registrará los datos musculares, que posteriormente serán analizados para evaluar el nivel de fatiga muscular. Los resultados obtenidos podrán ser visualizados por el entrenador a través de una aplicación móvil, permitiéndole ajustar los planes de entrenamiento de acuerdo con los niveles de fatiga registrados.

El participante se compromete a seguir los parámetros establecidos para la realización de las pruebas, los cuales incluyen garantizar un descanso previo, asegurando un mínimo de ocho horas de sueño recomendadas. Asimismo, se compromete a evitar el consumo de bebidas alcohólicas, sustancias psicoactivas o suplementos que puedan influir en los resultados de las pruebas.

La participación es completamente voluntaria y no implicará ningún costo para los participantes. No se otorgará compensación económica, pero su colaboración contribuirá significativamente a la validación del sistema y a la optimización de su diseño, permitiendo el desarrollo de una herramienta útil para el monitoreo y la gestión de la fatiga muscular en deportistas. Este estudio se clasifica como de riesgo mínimo según la Resolución 008430 de 1993 del Ministerio de Salud y Protección Social. Aunque no se prevén efectos adversos, en

caso de molestias o incomodidades durante el uso del dispositivo, se recomienda detener la actividad y comunicarse con los investigadores para evaluar la situación.

Toda la información recopilada será estrictamente confidencial y utilizada únicamente con fines de investigación. Los datos serán almacenados de manera segura y solo el equipo de investigación tendrá acceso a ellos. La custodia de la información estará a cargo del equipo investigador y se mantendrá por un periodo determinado conforme a las normativas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, tras el cual será eliminada de manera segura. La protección de los participantes y el uso responsable de los datos están garantizados bajo las normativas éticas vigentes. En caso de dudas o inquietudes sobre los procedimientos o sus derechos como participante, se podrá contactar al Comité de Ética de la Pontificia Universidad Javeriana Cali a través del correo etica.investigacion@javerianacali.edu.co, así como a las investigadoras a través de mariananieto2003@javerianacali.edu.co o isaramirez31@javerianacali.edu.co.

El participante tiene derecho a retirarse del estudio en cualquier momento sin necesidad de justificación ni repercusiones.

Declaro que soy mayor de edad, estoy en pleno uso de mis facultades mentales y mi participación en este estudio es voluntaria. Se me ha explicado el propósito y naturaleza de la investigación y entiendo que ha sido aprobada por el Comité de Ética. He leído y comprendido este consentimiento informado y acepto participar en el estudio como prueba de ello, firmo a continuación:

Nombre del Participante: _____

Firma del Participante: _____


Cédula: _____

Teléfono: _____

Fecha: _____

Hemos informado al participante sobre el propósito y naturaleza del procedimiento descrito anteriormente, así como sobre los posibles riesgos y el uso de los resultados del estudio.

Datos del Investigador1:

Firma: 

Cédula: 1.007.619.659

Fecha: 9/06/2025

Datos del Investigador2:Firma: *Isabela R.*

Cédula: 1.059.234.112

Fecha: 9/06/2025

FORMATO AUTORIZACIÓN DE CONTROL PARENTAL PARA LA PARTICIPACIÓN EN PRUEBAS PILOTO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LA FATIGA MUSCULAR**Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento para mejorar el plan de entreno en deportistas de alto nivel**

Se invita a los deportistas y entrenadores del Club de Patinaje Huellas a participar en una investigación liderada por las estudiantes Isabela Ramírez Agredo y Mariana Nieto Ángel de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, bajo la dirección del profesor PhD. Luis Eduardo Tobón Llano y la codirección de la profesora Luisa Fernanda García Ramírez. Este estudio es parte del proyecto de pregrado titulado "**Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento para mejorar el plan de entreno en deportistas de alto nivel**", requisito para optar por el título de Ingeniero Biomédico. El proyecto es estrictamente académico y cuenta con el aval del programa de Ingeniería Biomédica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

El propósito de este estudio es desarrollar un sistema de monitoreo portátil de variables indirectas de fatiga muscular mediante sensores integrados, con el fin de que los entrenadores puedan ajustar sus programas de entrenamiento para deportistas de alto rendimiento. La participación en las pruebas piloto incluirá un entrenador como observador y entre uno y dos deportistas, quienes serán sometidos a un plan de entrenamiento diseñado específicamente por el entrenador. La prueba tendrá una duración aproximada de dos horas, durante las cuales se colocará el prototipo en la pierna de los participantes, ya que es el área donde se desea captar la señal muscular. Durante la realización del entrenamiento, el dispositivo registrará los datos musculares, que posteriormente serán analizados para evaluar el nivel de fatiga muscular. Los resultados obtenidos podrán ser visualizados por el entrenador a través de una aplicación móvil, permitiéndole ajustar los planes de entrenamiento de acuerdo con los niveles de fatiga registrados.

El participante se compromete a seguir los parámetros establecidos para la realización de las pruebas, los cuales incluyen garantizar un descanso previo, asegurando un mínimo de ocho horas de sueño recomendadas. Asimismo, se compromete a evitar el consumo de bebidas alcohólicas, sustancias psicoactivas o suplementos que puedan influir en los resultados de las pruebas.

La participación es completamente voluntaria y no implicará ningún costo para los participantes. No se otorgará compensación económica, pero su colaboración contribuirá significativamente a la validación del sistema y a la optimización de su diseño, permitiendo el desarrollo de una herramienta útil para el monitoreo y la gestión de la fatiga muscular en deportistas. Este estudio se clasifica como de riesgo mínimo según la Resolución 008430 de 1993 del Ministerio de Salud y Protección Social. Aunque no se prevén efectos adversos, en caso de molestias o incomodidades durante el uso del dispositivo, se recomienda detener la actividad y comunicarse con los investigadores para evaluar la situación.

Toda la información recopilada será estrictamente confidencial y utilizada únicamente con fines de investigación. Los datos serán almacenados de manera segura y solo el equipo de investigación tendrá acceso a ellos. La custodia de la información estará a cargo del equipo investigador y se mantendrá por un periodo determinado conforme a las normativas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, tras el cual será eliminada de manera segura. La protección de los participantes y el uso responsable de los datos están garantizados bajo las normativas éticas vigentes. En caso de dudas o inquietudes sobre los procedimientos o sus derechos como participante, se podrá contactar al Comité de Ética de la Pontificia Universidad Javeriana Cali a través del correo etica.investigacion@javerianacali.edu.co, así como a las investigadoras a través de mariananieto2003@javerianacali.edu.co o isaramirez31@javerianacali.edu.co.

El participante tiene derecho a retirarse del estudio en cualquier momento sin necesidad de justificación ni repercusiones.

En caso de que el participante sea menor de edad, el padre, madre o acudiente legal deberá otorgar su consentimiento, declarando que entiende el propósito del estudio y que autoriza la participación del menor en la investigación. Como prueba de ello, firmará a continuación:

Nombre del Padre, Madre o Acudiente: _____

Firma del Padre, Madre o Acudiente: _____

Cédula: _____

Teléfono: _____

Nombre del Menor: _____

Fecha: _____

Hemos informado al participante sobre el propósito y naturaleza del procedimiento descrito anteriormente, así como sobre los posibles riesgos y el uso de los resultados del estudio.

Datos del Investigador1:

Firma: 

Cédula: 1.007.619.659

Fecha: 9/06/2025

Datos del Investigador2:Firma: *Isabela R.*

Cédula: 1.059.234.112

Fecha: 9/06/2025

FORMATO ASENTIMIENTO INFORMADO PARA LA PARTICIPACIÓN EN PRUEBAS PILOTO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LA FATIGA MUSCULAR**Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento para mejorar el plan de entreno en deportistas de alto nivel**

Se invita a los deportistas y entrenadores del Club de Patinaje Huellas a participar en una investigación liderada por las estudiantes Isabela Ramírez Agredo y Mariana Nieto Ángel de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, bajo la dirección del profesor PhD. Luis Eduardo Tobón Llano y la codirección de la profesora Luisa Fernanda García Ramírez. Este estudio es parte del proyecto de pregrado titulado "**Diseño de un sistema de monitoreo de variables indirectas de la fatiga muscular durante el entrenamiento para mejorar el plan de entreno en deportistas de alto nivel**", requisito para optar por el título de Ingeniero Biomédico. El proyecto es estrictamente académico y cuenta con el aval del programa de Ingeniería Biomédica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

El propósito de este estudio es desarrollar un sistema de monitoreo portátil de variables indirectas de fatiga muscular mediante sensores integrados, con el fin de que los entrenadores puedan ajustar sus programas de entrenamiento para deportistas de alto rendimiento. La participación en las pruebas piloto incluirá un entrenador como observador y entre uno y dos deportistas, quienes serán sometidos a un plan de entrenamiento diseñado específicamente por el entrenador. La prueba tendrá una duración aproximada de seis horas, durante las cuales se colocará el prototipo en la pierna de los participantes, ya que es el área donde se desea captar la señal muscular. Durante la realización del entrenamiento, el dispositivo registrará los datos musculares, que posteriormente serán analizados para evaluar el nivel de fatiga muscular. Los resultados obtenidos podrán ser visualizados por el entrenador a través de una aplicación móvil, permitiéndole ajustar los planes de entrenamiento de acuerdo con los niveles de fatiga registrados.

El participante se compromete a seguir los parámetros establecidos para la realización de las pruebas, los cuales incluyen garantizar un descanso previo, asegurando un mínimo de ocho horas de sueño recomendadas. Asimismo, se compromete a evitar el consumo de bebidas

alcohólicas, sustancias psicoactivas o suplementos que puedan influir en los resultados de las pruebas.

La participación es completamente voluntaria y no implicará ningún costo para los participantes. No se otorgará compensación económica, pero su colaboración contribuirá significativamente a la validación del sistema y a la optimización de su diseño, permitiendo el desarrollo de una herramienta útil para el monitoreo y la gestión de la fatiga muscular en deportistas. Este estudio se clasifica como de riesgo mínimo según la Resolución 008430 de 1993 del Ministerio de Salud y Protección Social. Aunque no se prevén efectos adversos, en caso de molestias o incomodidades durante el uso del dispositivo, se recomienda detener la actividad y comunicarse con los investigadores para evaluar la situación.

Toda la información recopilada será estrictamente confidencial y utilizada únicamente con fines de investigación. Los datos serán almacenados de manera segura y solo el equipo de investigación tendrá acceso a ellos. La custodia de la información estará a cargo del equipo investigador y se mantendrá por un periodo determinado conforme a las normativas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, tras el cual será eliminada de manera segura. La protección de los participantes y el uso responsable de los datos están garantizados bajo las normativas éticas vigentes. En caso de dudas o inquietudes sobre los procedimientos o sus derechos como participante, se podrá contactar al Comité de Ética de la Pontificia Universidad Javeriana Cali a través del correo etica.investigacion@javerianacali.edu.co, así como a las investigadoras a través de mariananieto2003@javerianacali.edu.co o isaramirez31@javerianacali.edu.co.

El participante tiene derecho a retirarse del estudio en cualquier momento sin necesidad de justificación ni repercusiones.

Yo, _____, menor de edad, declaro que he recibido explicaciones claras y comprensibles sobre el estudio, incluyendo su objetivo, procedimientos, riesgos y beneficios. Entiendo que mi participación es voluntaria y que puedo retirarme en cualquier momento sin ninguna consecuencia.

Nombre del Menor: _____

Firma del Menor: _____


Tarjeta de Identidad: _____

Teléfono: _____

Fecha: _____

Los investigadores responsables certificamos que hemos informado al participante, en este caso, menor de edad, sobre el propósito y naturaleza de la investigación, así como sobre los posibles riesgos y el uso de los resultados del estudio.

Datos del Investigador1:

Firma: 

Cédula: 1.007.619.659

Fecha: 9/06/2025

Datos del Investigador2:

Firma: 

Cédula: 1.059.234.112

Fecha: 9/06/2025

Anexo 6 – Aval aprobado por el Comité de Ética

aval aprobado proyecto

Figura 10.21: Aval aprobado por el Comité de Ética

COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN - CEI
ACTA DE APROBACIÓN DE PROYECTOS
REGISTRO EN ACTA DE APROBACIÓN NO. 04 de ABRIL DE 2025 DEL CEI

1. El Presidente del Comité informa que este estudio pertenece a la categoría con riesgo Mínimo.
2. El Comité informa que el presente proyecto ha sido revisado en su totalidad quedando con AVAL APROBADO. (Se hacen recomendaciones respetuosas relacionadas con lenguaje coloquial y completo en los consentimientos informados, y las consideraciones éticas: precisar el riesgo y como mitigarlo, tener en cuenta al equipo interdisciplinario para el análisis de los datos)

Bibliografía

- [1] K. Federlova. (n.d.) Músculo vasto lateral - músculos anatomía aislados en blanco - ilustración 3d. 123RF. [Online]. Available: https://es.123rf.com/photo_58756555_m%C3%BAsculo-vasto-lateral-m%C3%BAsculos-anatom%C3%ADa-aislados-en-blanco-ilustraci%C3%B3n-3d.html
- [2] V. Rosso and A. Rainoldi, "Optimization of semg electrode positioning in vastus lateralis muscle during neuromuscular electrical stimulation," *Sport Sciences for Health*, vol. 10, pp. 253–260, 2014, disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11332-014-0202-0>. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11332-014-0202-0>
- [3] Y.-M. Wong and G. Y. F. Ng, "Surface electrode placement affects the emg recordings of the quadriceps muscles," *Physical Therapy in Sport*, vol. 7, no. 3, p. 122–127, 2006, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2006.03.006>. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2006.03.006>
- [4] Amazon.com, "Sparkfun sensor de espectroscopia de tríada - as7265x ruptura de inspección óptica combina led ir uv visibles con tres sensores espectrales vcc 3.3v qwiic i2c serial breadboard o no requiere soldadura: Industrial y científico," n.d. [Online]. Available: <https://surl.li/sghces>
- [5] "Examples of wearable soft sensor designs: a eGain strain sensor," n.d. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-wearable-soft-sensor-designs-a-eGaIn-strain-sensor-2019-IEEE-Reprintedfig4357028908>
- [6] Admin, "Bioimpedancia: consejos para que la medición sea más exacta," April 8 2022. [Online]. Available: <https://veronicanutricion.com/bioimpedancia-consejos/>
- [7] C. Dindorf, E. Bartaguiz, E. Janowicz, M. Fröhlich, and O. Ludwig, "Effects of unilateral muscle fatigue on thermographic skin surface temperature of back and abdominal muscles—a pilot study," *Sports*, vol. 10, no. 3, p. 41, 2022.
- [8] Mactronica, "MÓdulo adxl345 acelerÓmetro digital 3 ejes," n.d. [Online]. Available: <https://www.mactronica.acelerometro-digital-3-ejes>
- [9] "Figure 4: The humac norm is a universal solution for motion training," n.d. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/figure/The-HUMAC-NORM-is-a-universal-solution-for-motion-training-and-analysis-used-in-therapyfig4317717204>
- [10] "Dinamómetro digital medidor de fuerza de agarre en las manos color gris," n.d. [Online]. Available: <https://www.mercadolibre.com.co/dinamometro-digital-medidor-de-fuerza-de-agarre-en-las-manos-color-gris/p/MCO32411150>

- [11] CIRCUITSTATE Electronics, “Doit esp32 devkit v1 wi-fi development board - pinout diagram & arduino reference,” 2022, disponible en: <https://www.circuitstate.com/pinouts/doit-esp32-devkit-v1-wifi-development-board-pinout-diagram-and-reference/>. [Online]. Available: <https://www.circuitstate.com/pinouts/doit-esp32-devkit-v1-wifi-development-board-pinout-diagram-and-reference/>
- [12] D. Ospina and L. Mendoza, “Epidemiología de lesiones en patinaje de velocidad,” *Revista de Traumatología Deportiva*, vol. 18, no. 2, pp. 78–92, 2023.
- [13] Universidad Complutense de Madrid, “Fatiga laboral: conceptos y prevención,” 2013, disponible en: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/3-2013-02-18-1-FATIGA%20LABORAL.%20CONCEPTOS%20Y%20PREVENCION.C3%83%C5%92N.pdf>. [Online]. Available: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/3-2013-02-18-1-FATIGA%20LABORAL.%20CONCEPTOS%20Y%20PREVENCION.C3%83%C5%92N.pdf>
- [14] J. J. Wan, Z. Qin, and P. Y. W. et al., “Muscle fatigue: general understanding and treatment,” *Experimental & Molecular Medicine*, vol. 49, p. e384, 2017.
- [15] Mindeporte, “Deportista de alto rendimiento,” n.d., disponible en: <https://www.mindeporte.gov.co/atencion-servicio-ciudadania/ingrese-consulte-peticiones/glosario-tematico/centro-servicios-biomedicos/deportista-alto-rendimiento>. [Online]. Available: <https://www.mindeporte.gov.co/atencion-servicio-ciudadania/ingrese-consulte-peticiones/glosario-tematico/centro-servicios-biomedicos/deportista-alto-rendimiento>
- [16] J. E. M. Quinchangua, “La fatiga, tipos, causas y efectos,” *Revista Digital: Actividad Física y Deporte*, vol. 3, no. 2, 2018, disponible en: <https://revistas.udca.edu.co/index.php/rdafd/article/view/376/315>. [Online]. Available: <https://revistas.udca.edu.co/index.php/rdafd/article/view/376/315>
- [17] Altea Sport Clinic, “Sobrentrenamiento: cómo la fatiga puede llevar a un mayor riesgo de lesiones,” n.d., disponible en: <https://alteasportclinic.es/sobrentrenamiento-como-la-fatiga-puede-llevar-a-un-mayor-riesgo-de-lesiones>. [Online]. Available: <https://alteasportclinic.es/sobrentrenamiento-como-la-fatiga-puede-llevar-a-un-mayor-riesgo-de-lesiones>
- [18] C. D. Daetz, F. R. Toro, and V. T. Mendoza, “Lesiones deportivas en deportistas universitarios chilenos,” *Retos*, vol. 38, no. 38, pp. 490–496, 2020.
- [19] Sport Science & Medicine, “Librarian resources,” 2019, disponible en: <https://librarianresources.taylorandfrancis.com/collection/sports-science-medicine-subject-collection/>. [Online]. Available: <https://librarianresources.taylorandfrancis.com/collection/sports-science-medicine-subject-collection/>
- [20] Gatorade Sports Science Institute, “Monitorización de la fatiga y recuperación,” n.d., disponible en: <https://www.gssiweb.org/latam/sports-science-exchange/articulo/sse-135-mon>

- itorizacion-de-la-fatiga-y-recuperacion. [Online]. Available: <https://www.gssiweb.org/latam/sports-science-exchange/articulo/sse-135-monitorizacion-de-la-fatiga-y-recuperacion>
- [21] J. Álvarez Medina, “Evolución de la prevención de lesiones en el control del entrenamiento,” 2015, disponible en: https://zaguan.unizar.es/record/61521/files/texto_completo.pdf?version=1. [Online]. Available: https://zaguan.unizar.es/record/61521/files/texto_completo.pdf?version=1
- [22] MedlinePlus, “Fatiga: Medlineplus enciclopedia médica,” n.d., disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003088.htm>. [Online]. Available: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003088.htm>
- [23] M. C. J. Andrés, H. B. Manuela, and B. R. J. Mario, “Prevalencia de lesiones osteomusculares en deportistas de indeportes antioquia 2005 - 2015,” February 1 2018. [Online]. Available: <https://repository.ces.edu.co/items/4b3b638e-c265-404b-ba95-be2b719630e1>
- [24] Dialnet, “Efectos psicológicos de la lesión deportiva,” n.d. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2278506>
- [25] Mindeporte, “Control de rendimiento deportivo,” n.d. [Online]. Available: <https://www.mindeporte.gov.co/control-rendicion-cuentas/informacion-contable-financiera/presupuesto-1>
- [26] Webmaster, “Patinaje,” Apr. 2024, dipudeporte. [Online]. Available: <https://www.dipudeporte.es/patinaje/>
- [27] F. C. de Patinaje. (2023) Reporte anual de lesiones deportivas. [Online]. Available: <https://www.fecopatin.com.co/informes-medicos>
- [28] I. C. del Deporte, “Análisis biomecánico del patinaje de velocidad,” *Revista de Ciencias del Deporte*, vol. 20, no. 3, pp. 45–60, 2022.
- [29] J. Ramírez and M. Sánchez, “Análisis biomecánico de la fuerza propulsiva en patinaje de velocidad,” in *Congreso Internacional de Ciencias del Deporte*. Universidad del Valle, 2022, pp. 112–125.
- [30] A. Pérez and C. Díaz, “Parámetros fisiológicos en pruebas de 500m en patinaje,” *Journal of Sports Science*, vol. 41, no. 3, pp. 201–215, 2023.
- [31] E. Torres, “Análisis cinemático de la zancada en patinadores profesionales,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Colombia, 2021.
- [32] R. Gómez and L. Pérez, “Adaptaciones neuromusculares en patinadores de élite colombianos,” *Revista Colombiana de Medicina Deportiva*, vol. 15, no. 2, pp. 45–62, 2023.
- [33] J. Medina and P. Rojas, “Indicadores técnicos de fatiga en patinaje de velocidad,” *Revista Iberoamericana de Ciencias del Deporte*, vol. 11, no. 1, pp. 34–48, 2022.

- [34] M. Ruiz, “Monitoreo fisiológico en patinadores de alto rendimiento,” Instituto Colombiano del Deporte, Tech. Rep., 2023. [Online]. Available: <https://www.coldeportes.gov.co/investigacion>
- [35] F. C. de Patinaje, “Reporte anual del campeonato nacional juvenil 2023,” 2023. [Online]. Available: <https://www.fecopatin.org/informes>
- [36] C. Martínez, “Impacto de la fatiga muscular en el rendimiento competitivo,” in *Simposio Internacional de Alto Rendimiento*, Bogotá, Colombia, 2023.
- [37] F. García and M. López, “Tiempos de recuperación post-competición en patinaje,” *Journal of Sports Rehabilitation*, vol. 32, no. 4, pp. 456–468, 2023.
- [38] H. Gray, *Anatomy of the Human Body*. Lea & Febiger, 1918, consultado en abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.bartleby.com/107/>
- [39] C. Beardsley and B. Contreras, “The functional anatomy of the quadriceps femoris,” *Strength and Conditioning Journal*, vol. 36, no. 2, pp. 34–39, 2014.
- [40] S. Perrey and K. Ferrari, “Muscle oximetry in sports science: A systematic review,” *European Journal of Sport Science*, vol. 18, no. 2, pp. 158–173, 2018.
- [41] N. Tillin and J. M. Folland, “Electromyography of the vastus lateralis during fatiguing isometric muscle actions,” *Muscle & Nerve*, vol. 35, no. 5, pp. 600–609, 2007.
- [42] L. F. González and A. P. Martínez, “El deportista de alto rendimiento: características y consideraciones en su evaluación,” *Revista Internacional de Ciencias del Deporte*, vol. 16, no. 60, pp. 123–134, 2020.
- [43] World Health Organization, “Actividad física,” 2024, disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity> (consultado el 15 de junio de 2025). [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity>
- [44] Rediris, “Mecanismos de recuperación deportiva,” n.d. [Online]. Available: <http://cdeporte.rediris.es/revista/revista40/artmecanismo171.pdf>
- [45] T. Yoshida, “Fatigue and recovery in competitive sports,” *Sports Medicine*, vol. 48, no. 4, pp. 561–573, 2018.
- [46] H. T. Rojas, “Métodos experimentales para evaluar la fatiga muscular,” n.d. [Online]. Available: <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/4084ac83-eefd-41ca-90bb-55762cf18fd1/content>
- [47] A. F. Vanmeerhaeghe and D. R. Rodríguez, “Análisis de los factores de riesgo neuromusculares de las lesiones deportivas,” *Apunts Medicina del Esport*, vol. 48, no. 179, pp. 109–120, 2013.

- [48] W. Lei and Y. Ning, “Utilization of near infrared spectroscopy imaging at nanoscale for the identification of biomarkers in sports-induced muscle fatigue,” *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2023.
- [49] M. Ferrari, L. Mottola, and V. Quaresima, “Principles, techniques, and limitations of near infrared spectroscopy,” *Canadian Journal of Applied Physiology*, vol. 29, no. 4, pp. 463–487, 2004.
- [50] B. Grassi, S. Quaresima, R. Marconi, M. Ferrari, and P. Cerretelli, “Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise in humans,” *Journal of Applied Physiology*, vol. 103, no. 3, pp. 882–892, 2007.
- [51] C. J. D. Luca, “The use of surface electromyography in biomechanics,” *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 13, no. 2, pp. 135–163, 1997.
- [52] A. Devices, “Ad8226 datasheet,” <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ad8226%20datasheet>, 2020.
- [53] Tekscan, “How does a force sensing resistor (fsr) work?” n.d., accessed: April 2, 2025. [Online]. Available: <https://www.tekscan.com/blog/flexiforce/how-does-force-sensing-resistor-fsr-work>
- [54] I. Electronics, “Fsr 406 data sheet,” 2010, accessed: April 2, 2025. [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/assets/c/4/6/8/b/2010-10-26-DataSheet-FSR406-Layout2.pdf>
- [55] D. Lafrance, L. C. Lands, and D. H. Burns, “In vivo lactate measurement in human tissue by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy,” *Vibrational Spectroscopy*, vol. 35, no. 1, pp. 117–123, 2004. [Online]. Available: <https://typeset.io/papers>
- [56] M. Beato, K. L. D. Keijzer, B. Carty, and M. Connor, “Monitoring fatigue during intermittent exercise with accelerometer-derived metrics,” *Frontiers in Physiology*, vol. 10, 2019.
- [57] “Assessment of lower limb muscle strength and power using hand-held and fixed dynamometry: A reliability and validity study,” *PLOS ONE*, vol. 14, no. 5, pp. 1–15, 2023.
- [58] “Equipo de gimnasia dinamómetro isocinético para ensayos de resistencia y entrenamiento de atletas,” n.d. [Online]. Available: <https://es.made-in-china.com/coyikangshiye/productGymnastics-Equipment-Isokinetic-Dynamometer-for-Athlete-Strength-Testing-Traininguohrigouog.html>
- [59] M. Motosuke *et al.*, “Innovative wearable sweat sensor predicts muscle fatigue,” *ACS Sensors*, vol. 8, no. 3, pp. 1231–1243, 2023. [Online]. Available: <https://wearable-technologies.com>
- [60] “Métodos para evaluar la fatiga en deportistas,” n.d. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1LnukPd9SVw7G/view>

- [61] Universidad del Rosario, “Evaluación de métodos para monitoreo de fatiga,” n.d. [Online]. Available: <https://repository.urosario.edu.co/server/api/core/bitstreams/76942e04-21a2-4c2f-84bc-f03fef12373b/content>
- [62] ResearchGate, “Métodos para evaluar la fatiga en el deportista,” n.d. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/317615409_Metodos_para_evaluar_la_fatiga_en_el_deportista
- [63] M. Álvarez Álvarez and R. R. Álvarez, “Fatiga muscular: conceptos y herramientas de análisis,” *Revista de Ciencias del Deporte*, vol. 13, no. 2, pp. 123–135, 2019.
- [64] Asociación Médica Mundial, “Declaración de helsinki: Principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos,” 2013, consultado en abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.wma.net/es/polices-post/declaracion-de-helsinki-de-la-amm-principios-eticos-para-las-investigaciones-medicas-en-seres-humanos/>
- [65] Ministerio de Salud de Colombia, “Resolución 008430 de 1993, por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud,” 1993, consultado en abril de 2025. [Online]. Available: https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%2008430%20de%201993.pdf
- [66] Consejo de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas (CIOMS) and Organización Mundial de la Salud (OMS), “Pautas éticas internacionales para la investigación relacionada con la salud con seres humanos,” 2016, consultado en abril de 2025. [Online]. Available: <https://cioms.ch/publications/product/international-ethical-guidelines-for-health-related-research-involving-humans/>
- [67] J. García-Ramos, “Nuevas perspectivas en el monitoreo de la fatiga neuromuscular,” *Journal of Strength and Conditioning Research*, vol. 34, no. 2, pp. 325–336, 2020.
- [68] A. G. Ruiz, “Diseño de un sistema de monitoreo para deportistas de élite,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Madrid, 2021.
- [69] J. D. Robertson and P. J. Marino, “Athlete recovery: tools and techniques,” *International Journal of Sports Medicine*, vol. 36, no. 10, pp. 843–850, 2015.
- [70] R. Pastor and P. Delgado, “Análisis biomecánico en el control del entrenamiento deportivo,” *Biomechanics Journal*, vol. 28, no. 3, pp. 211–220, 2018.
- [71] R. J. Shephard, “Overtraining syndrome: clinical and biochemical evaluation,” *Sports Medicine*, vol. 46, no. 6, pp. 745–751, 2016.
- [72] A. Mendez and L. D. Franco, “Uso de emg en el monitoreo de la fatiga muscular,” *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 48, no. 4, pp. 129–139, 2020.

- [73] A. Karvonen and J. Vuorimaa, “Heart rate and exercise intensity during training,” *Sports Science Review*, vol. 22, no. 1, pp. 53–62, 2019.
- [74] S. Anderson and P. McCarthy, “Athlete monitoring technologies in elite sports,” *Current Sports Medicine Reports*, vol. 19, no. 4, pp. 141–147, 2020.
- [75] I. Mujika and S. Padilla, “Detraining: Loss of training-induced physiological and performance adaptations. part i: Short term insufficient training stimulus,” *Sports Medicine*, vol. 30, no. 2, pp. 79–87, 2000.
- [76] A. N. Turner, “Strength and conditioning for soccer players,” *Strength and Conditioning Journal*, vol. 36, no. 4, pp. 1–13, 2014.
- [77] R. M. Malina, C. Bouchard, and O. Bar-Or, *Growth, Maturation, and Physical Activity*. Human Kinetics, 2004.
- [78] World Medical Association, “Wma declaration of helsinki – ethical principles for medical research involving human subjects,” 2013. [Online]. Available: <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects/>
- [79] N. A. Ratamess, *ACSM’s Foundations of Strength Training and Conditioning*. Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
- [80] S. A. Julious, “Sample size of 12 per group rule of thumb for a pilot study,” *Pharmaceutical Statistics*, vol. 4, no. 4, pp. 287–291, 2005.
- [81] J. W. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications, 2009.