

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



**Desarrollo de un Dispositivo Portátil de
Monitoreo de Saltos en Voleibol para la
Optimización de Entrenamientos en el equipo de
Voleibol del Tecnológico de Costa Rica**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de
Ingeniería en electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Marco Antonio Alfaro Bolaños

Carné: 2018165783

Profesora asesora:

Prof. Dr.-Ing. Paola Vega Castillo

I Semestre 2025

Declaratoria de autenticidad

Yo, Marco Antonio Alfaro Bolaños, con carné número 2018165783, declaro bajo juramento que el contenido de este documento es de mi autoría y refleja de manera íntegra y fiel mis ideas, investigaciones y trabajos. Me comprometo a que la totalidad de la información aquí presentada es producto de mi esfuerzo personal y académico. Afirmando que no he incurrido en ningún tipo de plagio y que todas las fuentes utilizadas han sido debidamente citadas y referenciadas según las normas académicas correspondientes. Asimismo, me comprometo a mantener la autenticidad de todas mis aportaciones a lo largo del desarrollo de este proyecto de graduación.

Marco Alfaro Bolaños
Cédula: 207890503
Cartago, Setiembre 2025

Abstract

This project was carried out with the aim of developing a portable and low-cost device for monitoring jumps in the volleyball team of the Costa Rica Institute of Technology (TEC). In university sports, where physical demands are high and technological resources are limited, there is a need for accessible tools that can objectively measure variables such as jump height, frequency, and count—key factors for optimizing training and preventing injuries. Currently, coaching decisions rely mainly on observation and empirical experience, while reference technologies such as force platforms are expensive and impractical for continuous use in this environment.

As a solution, a system was designed consisting of an MPU6050 inertial sensor and an ESP32 microcontroller with Bluetooth Low Energy connectivity, powered by a rechargeable battery with a TP4056 charging module and enclosed in a 3D-printed case. The device detects jumps, calculates height using flight time, and transmits real-time data to a Kotlin-based mobile application that enables immediate visualization and local storage.

Validation results compared to the ForceDecks system showed an overall accuracy above 95%, a root mean square error of approximately 2.2 cm, and a correlation of 0.89. Likewise, field tests recorded an average frequency of 4.33 jumps per minute and a maximum height of 57.18 cm, confirming its applicability in real training sessions.

This development represents a viable and scalable alternative to improve sports planning and strengthen injury prevention in university volleyball.

Keywords

Volleyball, jump monitoring, portable device, inertial sensors, ESP32, mobile application, injury prevention.

Resumen

El presente proyecto se realizó con el fin de desarrollar un dispositivo portátil y de bajo costo para el monitoreo de saltos en el equipo de voleibol del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). En el deporte universitario, donde las exigencias físicas son altas y los recursos tecnológicos limitados, existe la necesidad de contar con herramientas accesibles que midan de manera objetiva variables como la altura, frecuencia y cantidad de saltos, fundamentales para optimizar entrenamientos y prevenir lesiones. Actualmente, las decisiones del cuerpo técnico se basan en observación y experiencia empírica, mientras que las tecnologías de referencia, como las plataformas de fuerza, resultan costosas y poco prácticas para un uso continuo en este entorno.

Como solución se diseñó un sistema compuesto por un sensor inercial MPU6050 y un microcontrolador ESP32 con conectividad Bluetooth Low Energy, alimentado por una batería recargable con módulo de carga TP4056 y encapsulado en una carcasa impresa en 3D. El dispositivo detecta saltos, calcula la altura mediante tiempo de vuelo y transmite los datos en tiempo real a una aplicación móvil en Kotlin que permite visualización inmediata y almacenamiento local.

Los resultados de validación frente al sistema ForceDecks mostraron una exactitud global superior al 95 %, un error cuadrático medio cercano a 2,2 cm y una correlación de 0,89. Asimismo, en pruebas de campo se registró una frecuencia promedio de 4,33 saltos por minuto y una altura máxima de 57,18 cm, confirmando su aplicabilidad en entrenamientos reales.

Este desarrollo constituye una alternativa viable y escalable para optimizar la planificación deportiva y fortalecer la prevención de lesiones en el voleibol universitario.

Palabras Clave

Voleibol, monitoreo de saltos, dispositivo portátil, sensores inerciales, ESP32, aplicación móvil, prevención de lesiones.

A mis padres, Marcos y Nuria

*“ No juzgues cada día por la cosecha que recoges, sino
por las semillas que siembras”*

– Robert Louis Stevenson

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, Marcos y Nuria, por haberme acompañado durante todo este camino. Gracias por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles, por confiar en mí incluso cuando yo mismo dudaba, y por estar siempre presentes en cada paso de esta etapa. Este logro también es de ustedes.

A mis amigos de la universidad, en especial a Diego y Jesús, por su amistad sincera, por acompañarme durante largas jornadas de estudio, por las conversaciones que ayudaban a despejar la mente, por los proyectos compartidos y por estar siempre dispuestos a dar una mano cuando más lo necesitaba.

Agradezco de manera especial a la profesora Paola Vega Castillo, mi asesora, por su guía, paciencia, retroalimentación y apoyo durante el desarrollo de este trabajo final de graduación. Su acompañamiento fue clave para poder desarrollar este proyecto de manera exitosa.

A la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por brindarme la formación académica, los recursos y las oportunidades que hicieron posible mi crecimiento profesional. A todos los profesores que fueron parte de mi formación durante estos años, gracias por compartir sus conocimientos, por sus enseñanzas y por ser un pilar fundamental en mi formación. Finalmente, agradezco también al Instituto Tecnológico de Costa Rica como institución, por abrirme las puertas y permitirme formarme no solo como profesional, sino también como persona.

Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción.....	12
1.1 Contexto del voleibol universitario.....	12
1.2 Situación en el Tecnológico de Costa Rica.....	13
1.3 Problema identificado.....	15
1.4 Justificación del proyecto.....	17
1.5 Meta.....	19
1.6 Objetivo general.....	19
1.7 Objetivos específicos.....	20
Capítulo 2. Estado del arte.....	21
2.1 Tecnologías de medición de salto.....	21
2.2 Aplicabilidad en el contexto del TEC.....	23
Capítulo 3. Descripción de la solución propuesta.....	26
3.1 Generalidades de la solución.....	26
3.2 Requerimientos del sistema.....	27
3.3 Tecnologías seleccionadas.....	27
3.4 Metodología de trabajo.....	29
3.5 Fundamentos técnicos.....	31
3.6 Detalles técnicos y conexiones de hardware.....	33
3.6.1 Microcontrolador ESP32-WROOM-32.....	33
3.6.2 Sensor inercial MPU6050.....	35
3.6.3 Módulo de carga TP4056.....	37
3.6.4 Batería de Polímero de Litio 603050.....	39
3.7 Conexión del sensor, módulo de carga, microcontrolador y batería.....	40
3.8 Modelado e impresión 3D de la carcasa.....	42
3.9 Diseño y fabricación de la PCB.....	44
3.10 Desarrollo del firmware y de la aplicación móvil.....	46
3.10.1 Desarrollo del firmware.....	46
3.10.2 Desarrollo de la aplicación móvil.....	50
3.11 Sistema de sujeción al deportista.....	55
Capítulo 4. Validación experimental del monitor de saltos frente al dispositivo Vald ForceDecks.....	58
Capítulo 5. Estimación y análisis de costos.....	70
5.1 Costos de materiales.....	70
5.2 Costos de mano de obra.....	72

	10
5.3 Análisis de replicabilidad de costos	73
5.4 Resumen total de costos	74
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	75
6.1 Conclusiones	75
6.2 Recomendaciones	76
Bibliografía	77
Apéndices	80

Índice de Tablas

Tabla 1 Saltos fase 1.....	61
Tabla 2 Saltos fase 2 jugador 1	63
Tabla 3 Saltos fase 2 jugador 2.....	65
Tabla 4 Saltos fase 2 jugador 3.....	66
Tabla 5 Comparativa fase 1 versus fase 2	68
Tabla 6 Costos de materiales	71
Tabla 7 Costos de mano de obra	73
Tabla 8 Resumen total de costos.....	74

Índice de Figuras

Figura 1 Diagrama de Nivel 1 de la Solución.....	26
Figura 2 Diagrama de Nivel 2 del Dispositivo de Medición	29
Figura 3 Esquema de pines del ESP32 WROOM-32	35
Figura 4 Esquema de pines del MPU6050	37
Figura 5 Esquema de pines del módulo de carga TP4056.....	39
Figura 6 Esquema de conexiones del sistema	42
Figura 7 Diseño de la base de la carcasa en 3D	43
Figura 8 Diseño de la tapa de la carcasa en 3D	44
Figura 9 Diseño de la PCB en Eagle CAD	45
Figura 10 Resultado de la impresión de la PCB	46
Figura 11 Inicialización del MPU6050 en el firmware	47
Figura 12 Configuración del BLE en el firmware	47
Figura 13 Calibración del MPU6050 en el firmware.....	48
Figura 14 Calibración del MPU6050 en el firmware.....	48
Figura 15 Detección de saltos en el firmware.....	48
Figura 16 Transmisión de datos por BLE	48
Figura 17 Escaneo de dispositivos BLE	51
Figura 18 Validación del identificador por parte de la app.....	51
Figura 19 Deserialización de datos en la app.....	52
Figura 20 Ejemplo de envío de comandos	53
Figura 21 Acceso a base de datos en la app.....	54
Figura 22 Sistema de cierre de la banda	57
Figura 23 Sistema de regulación de la banda.....	57
Figura 24 Plataforma de fuerza ForceDecks.....	59
Figura 25 Altura vs número de saltos fase 1.....	62
Figura 26 Altura vs número de saltos fase 2 jugador 1	64
Figura 27 Altura vs número de saltos fase 2 jugador 2.....	66
Figura 28 Altura vs número de saltos fase 2 jugador 3.....	67
Figura 29 Altura vs número de salto.....	69

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto del voleibol universitario

El voleibol es una disciplina deportiva caracterizada por su dinamismo, velocidad de juego y requerimientos físicos intensos. Dentro de sus múltiples demandas, la capacidad de salto de los jugadores destaca como una de las habilidades más críticas para el desempeño efectivo en la cancha. Acciones técnicas como el remate, el bloqueo y el saque en suspensión dependen directamente del rendimiento del salto vertical, tanto en términos de potencia como de repetibilidad a lo largo del partido.

En el contexto universitario, esta exigencia se ve acentuada por la necesidad de compatibilizar el entrenamiento deportivo con la carga académica del estudiantado. Los atletas universitarios suelen disponer de menos tiempo para entrenar en comparación con deportistas profesionales, lo que obliga a optimizar cada sesión de trabajo físico y técnico. Adicionalmente, la mayoría de las instituciones educativas superiores no cuentan con el mismo nivel de recursos que los clubes profesionales o federaciones deportivas, lo que se traduce en una menor disponibilidad de tecnologías especializadas para la medición y evaluación del rendimiento atlético.

Estudios recientes han revelado que un jugador universitario puede realizar entre 100 y 250 saltos durante una única sesión de entrenamiento, dependiendo de su posición, rol en el equipo y nivel competitivo (Lima, 2019). Esta elevada frecuencia de saltos genera una carga mecánica acumulada considerable sobre las estructuras del aparato locomotor, particularmente en las articulaciones de la rodilla y el tobillo. La exposición constante a este tipo de esfuerzo físico puede desencadenar lesiones por

sobreuso, como la tendinopatía rotuliana, comúnmente conocida como “rodilla de saltador” (de Leeuw, 2022).

Ante este panorama, se vuelve crucial monitorear de manera sistemática y objetiva la carga de salto durante los entrenamientos y competencias. En contextos profesionales, dicha tarea se realiza mediante plataformas de fuerza, cámaras de alta velocidad o sistemas de captura de movimiento tridimensional, tecnologías que, si bien ofrecen alta precisión, resultan económicamente inaccesibles y logísticamente complejas para muchas universidades. Esto obliga a recurrir a métodos subjetivos, como la observación del entrenador o el criterio técnico, los cuales, aunque valiosos, presentan limitaciones importantes para una toma de decisiones basada en datos cuantificables.

Por tanto, el voleibol universitario enfrenta el desafío de mantener altos estándares de rendimiento y prevención de lesiones, pero con recursos técnicos limitados. En este contexto, el desarrollo e implementación de soluciones portátiles, de bajo costo y basadas en sensores accesibles, se presenta como una alternativa viable y estratégica para democratizar el acceso a tecnologías de monitoreo deportivo, incrementando la calidad del entrenamiento sin comprometer la viabilidad institucional.

1.2 Situación en el Tecnológico de Costa Rica

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) es una universidad pública reconocida por su excelencia académica, con una marcada orientación hacia la ingeniería, la investigación aplicada y la formación integral del estudiantado. Dentro de esta visión, el deporte se considera una herramienta fundamental para el desarrollo

físico, emocional y social de los estudiantes. En consecuencia, el TEC promueve la práctica deportiva organizada mediante sus equipos representativos, que participan activamente en competencias nacionales como los Juegos Universitarios Costarricenses (JUNCOS) y torneos organizados por el Consejo Nacional de Rectores (CONARE), como la Liga Universitaria.

Particularmente, el equipo de voleibol del TEC tanto en su rama masculina como femenina representa una de las disciplinas más activas y consolidadas dentro del deporte universitario de la institución. La totalidad de atletas considerando ambas ramas que ronda los 40 estudiantes atletas, dirigidos por un cuerpo técnico capacitado encabezado por el entrenador Alberto Raimundo Travieso Rodríguez. A lo largo del año, estos equipos desarrollan ciclos intensivos de preparación física, técnica y táctica, con múltiples sesiones semanales, giras competitivas y participación en torneos de alto nivel.

A pesar de contar con espacios adecuados para la práctica deportiva como gimnasios reglamentarios y recursos humanos calificados, el equipo de voleibol del TEC carece de herramientas tecnológicas específicas para el monitoreo preciso del rendimiento físico de sus jugadores. Esta limitación impide realizar evaluaciones cuantitativas del progreso individual, dificulta la planificación adecuada de cargas de trabajo y restringe la posibilidad de implementar estrategias preventivas contra lesiones por sobreuso.

En la actualidad, las decisiones sobre la carga de entrenamiento o la condición física de los atletas se fundamentan principalmente en la observación directa del entrenador, la experiencia empírica y la percepción subjetiva del esfuerzo. Si bien estos métodos tienen valor, la ausencia de datos objetivos limita el alcance de la toma de

decisiones, tanto en términos de precisión como de seguimiento longitudinal. Esta carencia tecnológica se vuelve aún más crítica si se considera el volumen de saltos repetitivos a los que están expuestos los jugadores en cada sesión, lo que incrementa significativamente el riesgo de fatiga acumulada y lesiones musculoesqueléticas.

Ante este escenario, el desarrollo de un sistema de monitoreo accesible, preciso y específico para el entorno universitario del TEC se presenta como una oportunidad concreta de mejora. La institución posee una comunidad académica con conocimientos avanzados en electrónica, programación, análisis de datos y ciencias aplicadas al deporte, lo cual permite abordar el problema desde una perspectiva multidisciplinaria.

Esta sinergia entre capacidades técnicas y necesidades deportivas convierte al TEC en un entorno idóneo para implementar y validar tecnologías innovadoras orientadas al bienestar y rendimiento del estudiantado atleta.

1.3 Problema identificado

El entrenamiento en deportes de alta exigencia física, como el voleibol, requiere de una gestión cuidadosa de las cargas de trabajo impuestas sobre los atletas. En particular, el volumen y la intensidad de los saltos representan una carga biomecánica significativa que puede influir tanto en el rendimiento como en el riesgo de lesión. No obstante, en muchos entornos deportivos universitarios, como es el caso del equipo de voleibol del Tecnológico de Costa Rica, no existen mecanismos objetivos ni sistemáticos para cuantificar esta carga.

Actualmente, los entrenadores toman decisiones con base en su experiencia, observación directa y percepción subjetiva del esfuerzo. Aunque estas herramientas empíricas son útiles, carecen de precisión y reproducibilidad, especialmente cuando se desea comparar el rendimiento de un jugador a lo largo del tiempo, entre diferentes atletas o en respuesta a un plan de entrenamiento específico. Esta carencia impide identificar patrones de fatiga, caídas en el rendimiento o comportamientos compensatorios que podrían derivar en lesiones.

Además, sin datos objetivos sobre el comportamiento de los saltos, como su frecuencia, altura y variabilidad, se vuelve difícil justificar científicamente ajustes en la carga de trabajo, tomar decisiones informadas sobre la recuperación o diseñar entrenamientos personalizados. En consecuencia, el proceso de planificación física se vuelve menos eficiente y más propenso a errores, lo cual contradice los principios de individualización y evidencia que deben guiar el entrenamiento moderno.

El problema se agrava aún más al considerar que las tecnologías tradicionales para medir estas variables como las plataformas de fuerza o los sistemas de captura de movimiento son costosas, requieren condiciones de laboratorio y personal especializado. Por tanto, resultan inviables para su implementación continua en un contexto universitario. Esta brecha tecnológica deja a los entrenadores sin acceso a herramientas de medición precisas, y a los deportistas sin retroalimentación cuantificable sobre su rendimiento físico.

En síntesis, el problema central identificado en este trabajo es la ausencia de herramientas tecnológicas accesibles, portátiles y de bajo costo que permitan cuantificar con precisión y en tiempo real la carga de salto en el voleibol universitario. Esta limitación

compromete la capacidad de los entrenadores para planificar adecuadamente, monitorear el progreso y prevenir lesiones, afectando directamente la calidad del proceso de entrenamiento y el bienestar del estudiantado atleta.

1.4 Justificación del Proyecto

En el contexto del voleibol universitario, donde las exigencias físicas son altas y los recursos tecnológicos suelen ser limitados, contar con herramientas accesibles que permitan cuantificar el rendimiento físico se vuelve una necesidad. La capacidad de salto, en particular, representa una de las variables más críticas para el desempeño técnico y táctico del jugador. Sin embargo, su monitoreo objetivo sigue siendo una tarea difícil de implementar en ambientes fuera del laboratorio, especialmente cuando se busca realizarlo en tiempo real y de forma práctica durante las sesiones regulares de entrenamiento.

El desarrollo de un dispositivo portátil, económico y confiable para el monitoreo de saltos en el equipo de voleibol del Tecnológico de Costa Rica responde a esta necesidad concreta. Su implementación permitirá una evaluación sistemática de parámetros como la cantidad de saltos, la altura alcanzada y la frecuencia de ejecución, brindando datos objetivos que pueden ser utilizados por entrenadores y preparadores físicos para optimizar la planificación del entrenamiento. Esta optimización no solo incide directamente sobre el rendimiento deportivo, sino también sobre la prevención de lesiones, al permitir una mejor dosificación de las cargas y la identificación de signos tempranos de sobrecarga.

Además, la solución propuesta se fundamenta en la integración de tecnologías abiertas y de bajo costo, como sensores inerciales (IMU) y microcontroladores con conectividad inalámbrica, lo cual permite su replicabilidad y escalabilidad a otros contextos educativos y deportivos. La utilización de herramientas de código abierto y componentes electrónicos comerciales no solo reduce la barrera económica de acceso, sino que también facilita el desarrollo de capacidades técnicas locales, promoviendo el aprendizaje, la innovación y la transferencia de conocimiento dentro de la comunidad universitaria.

Otro aspecto relevante es el valor académico y social del proyecto. Desde una perspectiva formativa, la propuesta permite aplicar conocimientos de ingeniería electrónica, programación, análisis de datos y diseño de sistemas embebidos en una problemática real. Esto convierte el proyecto en una experiencia integradora de múltiples competencias profesionales. Desde un punto de vista institucional, el desarrollo de este dispositivo posiciona al TEC como una universidad comprometida con la innovación, el deporte y el bienestar estudiantil, al tiempo que promueve soluciones tecnológicas aplicadas con impacto directo en la calidad de vida de su población.

Por último, al tratarse de un proyecto orientado al desarrollo humano, la justificación también se sustenta en su potencial para generar beneficios a mediano y largo plazo. La herramienta desarrollada no solo contribuirá al rendimiento deportivo de los atletas actuales, sino que dejará una base tecnológica para futuras generaciones, permitiendo la continuidad de procesos de medición, seguimiento e investigación aplicada en el ámbito del entrenamiento deportivo universitario.

1.5 Meta

Contribuir a la mejora integral de los procesos de entrenamiento en el voleibol universitario del Tecnológico de Costa Rica mediante la implementación de una solución tecnológica portátil y accesible que permita el monitoreo en tiempo real de variables críticas asociadas al rendimiento de salto. Esta meta se vincula directamente con la necesidad de modernizar las estrategias de planificación deportiva, incorporar tecnologías de medición objetiva en contextos no profesionales, y favorecer la toma de decisiones basadas en evidencia. A largo plazo, se espera que esta contribución incida positivamente en el rendimiento físico de los jugadores, en la prevención de lesiones por sobrecarga y en la eficiencia del trabajo técnico aplicado durante la temporada competitiva.

1.5 Objetivo general

Desarrollar un dispositivo portátil de bajo costo que permita medir, registrar y visualizar en tiempo real la cantidad, frecuencia y altura de los saltos realizados por los jugadores de voleibol del Instituto Tecnológico de Costa Rica, con el fin de brindar a entrenadores y personal técnico herramientas objetivas y cuantificables para la planificación del entrenamiento, el control de carga y el seguimiento del rendimiento deportivo.

1.7 Objetivos específicos

- Implementar un sistema de medición de frecuencia de salto, altura y cantidad de saltos basado en sensores inerciales (acelerómetros y giroscopios), con procesamiento en tiempo real, a bajo costo y bajo consumo de potencia.
- Desarrollar una interfaz de usuario sencilla para el usuario en una aplicación móvil que permita visualizar los datos de salto en tiempo real y almacenarlos en la nube para análisis a largo plazo.
- Evaluar la precisión y rendimiento del dispositivo mediante pruebas de campo y validar su fiabilidad en el entorno de entrenamiento deportivo.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 Tecnologías de medición de salto

La medición del salto vertical ha sido durante décadas un pilar en la evaluación del rendimiento físico en disciplinas que requieren acciones explosivas, como el voleibol, el baloncesto y el atletismo. Esta métrica permite estimar la potencia del tren inferior, la eficiencia neuromuscular y el estado de fatiga de un deportista (Bosco, 1983).

Entre las tecnologías clásicas utilizadas, destacan las plataformas de fuerza, las cuales permiten medir con gran precisión las fuerzas de reacción del suelo durante el despegue y el aterrizaje, proporcionando datos fiables sobre el tiempo de vuelo y la altura del salto (Baca, 1999). Los cálculos realizados mediante estas plataformas se centran en la diferencia de tiempo entre el despegue y la caída del cuerpo. Sin embargo, presentan una limitación fundamental: se trata de dispositivos fijos, de alto costo, y su uso requiere condiciones controladas. Por estas razones, han sido reemplazadas en muchos contextos de campo por soluciones más portátiles como lo es el dispositivo VERT, el cual ha sido validado como un estándar para la medición de saltos verticales debido a su exactitud.

Otra tecnología utilizada es la captura de movimiento 3D mediante sistemas de análisis de video, comúnmente denominados Mo-Cap. Estos permiten registrar el movimiento tridimensional de atletas con gran precisión, pero su implementación en campo se ve limitada por el costo y la complejidad de operación. Se estima que la instalación de estos sistemas puede costar entre 75.000 y 200.000 dólares, y su uso por

entrenadores individuales alcanza hasta 3.000 dólares por hora. Pese a su alta exactitud, estos sistemas resultan prohibitivos para la mayoría de las instituciones educativas (MyVERT, 2019).

Estudios de validación realizados desde 2014 han demostrado que el dispositivo VERT muestra un desempeño favorable en comparación con sistemas 3D como Kintrak, registrando un error medio de apenas 2.4005 centímetros, en saltos de tipo bloqueo entre 50 y 60 centímetros, e incluso superando en precisión a algunos sistemas de captura de movimiento en pruebas de campo específicas.

En el ámbito deportivo universitario, la adopción de tecnologías de monitoreo del salto vertical ha crecido en los últimos años, especialmente en equipos con acceso a recursos técnicos y económicos. Uno de los dispositivos más referenciados es el VERT, un sensor inercial de uso corporal diseñado para registrar la cantidad de saltos, la altura alcanzada y la carga acumulada durante una sesión. Su formato compacto, la sincronización con aplicaciones móviles y la entrega inmediata de datos lo han convertido en una solución atractiva para entrenadores y atletas.

En estudios de validación de dispositivos portátiles para la medición de saltos, se considera que un error medio dentro del rango de ± 2 a ± 3 cm resulta aceptable, ya que diferencias de esta magnitud no afectan de manera significativa la interpretación práctica en el ámbito deportivo (Skazalski, 2018). En el caso específico del VERT, la validación realizada frente al sistema de captura de movimiento 3D Kintrak reportó un error medio de 2,4 cm, valor que se encuentra dentro de los límites comúnmente aceptados (MyVert, 2009). Asimismo, comparaciones adicionales frente a métodos de referencia como el Vertec han mostrado discrepancias cercanas a los 4–5 cm, las cuales, aunque superiores

al umbral ideal, siguen considerándose tolerables para aplicaciones de campo, dado que la variabilidad intraindividual en el salto suele ser mayor que dicho margen (Borges, 2017).

Pese a su validación técnica y su adopción en entornos profesionales, el acceso al VERT en contextos universitarios como el del Tecnológico de Costa Rica se ve limitado por varios factores: su costo, la dependencia de licencias propietarias y la falta de acceso a sus algoritmos internos. Esto impide su personalización, integración con otras plataformas o modificación para fines académicos o de investigación.

En este panorama, diversos desarrolladores independientes y comunidades académicas han optado por construir alternativas abiertas basadas en sensores inerciales como el MPU6050 y microcontroladores como el ESP32. Estas soluciones permiten un control total sobre el procesamiento de datos, algoritmos de cálculo y visualización, además de reducir considerablemente los costos.

La implementación de este tipo de soluciones en universidades no solo atiende una necesidad funcional, sino que además potencia procesos formativos e investigativos. En lugar de adquirir un sistema cerrado, se construye un sistema personalizable, alineado con las capacidades técnicas locales y adaptable a diversos objetivos deportivos o académicos.

Por estas razones, el desarrollo de una solución propia, portable, y basada en tecnologías abiertas como la que se propone en este trabajo, se posiciona como una respuesta sostenible y replicable para enfrentar los retos del monitoreo deportivo en el contexto del TEC.

2.2 Aplicabilidad en el contexto del TEC

La implementación de un sistema de medición de saltos portátil y accesible en el equipo de voleibol del Tecnológico de Costa Rica representa una respuesta directa a las limitaciones detectadas en el entorno universitario nacional. A pesar de contar con entrenadores capacitados, instalaciones adecuadas y una cultura deportiva consolidada, el TEC no dispone de herramientas tecnológicas que permitan cuantificar con precisión variables biomecánicas críticas como la altura, frecuencia y volumen de los saltos realizados por sus atletas.

La falta de estos datos impide una planificación individualizada de las cargas de trabajo, así como la detección temprana de signos de sobrecarga, fatiga o desequilibrios físicos. En consecuencia, se compromete tanto el rendimiento como la prevención de lesiones. La solución propuesta en este trabajo busca suplir esta carencia mediante una herramienta desarrollada localmente, adaptada a las condiciones reales de entrenamiento del equipo y alineada con los recursos técnicos disponibles en la institución.

El desarrollo de este sistema permitirá al cuerpo técnico del equipo tomar decisiones objetivas sobre la intensidad y duración de los entrenamientos, ajustar las cargas según el historial de cada jugador y diseñar estrategias de recuperación más precisas. Por otra parte, la retroalimentación inmediata que ofrecerá el dispositivo a través de su aplicación móvil facilitará la motivación y la conciencia corporal en los jugadores, generando una cultura de monitoreo constante basada en datos.

Además de su impacto directo sobre el voleibol, este proyecto sienta las bases para una posible expansión hacia otras disciplinas deportivas practicadas en el TEC. Deportes como el baloncesto, el atletismo o el fútbol sala también requieren monitoreo del salto, y podrían beneficiarse del desarrollo de una solución replicable y escalable. Asimismo, el carácter interdisciplinario del proyecto fortalece las sinergias entre las áreas de ingeniería electrónica, ciencias del deporte y tecnología aplicada.

Por último, al tratarse de un sistema construido con componentes de bajo costo y tecnologías de código abierto, su mantenimiento y actualización pueden ser asumidos por estudiantes y profesores, integrándolo en actividades de docencia, investigación y extensión. Esta visión de apropiación tecnológica no solo aporta sostenibilidad al proyecto, sino que consolida el compromiso institucional con la innovación centrada en el bienestar del estudiantado.

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

3.1 Generalidades de la solución

El sistema propuesto tiene como propósito dar respuesta a la necesidad concreta de monitorear de forma objetiva la carga de salto de los jugadores del equipo de voleibol del Tecnológico de Costa Rica. Para ello, se desarrolla un dispositivo portátil, de bajo costo y fácil uso, capaz de detectar, registrar y transmitir información sobre la cantidad, frecuencia y altura de los saltos durante los entrenamientos.

El núcleo del sistema es un sensor inercial (IMU) que detecta los eventos de salto a través de la aceleración y velocidad angular del cuerpo. Estos datos son procesados por un microcontrolador programable (Figura 1) con capacidad de comunicación inalámbrica, el cual calcula las métricas deseadas y las envía a una aplicación móvil desarrollada específicamente para visualizar los resultados en tiempo real.

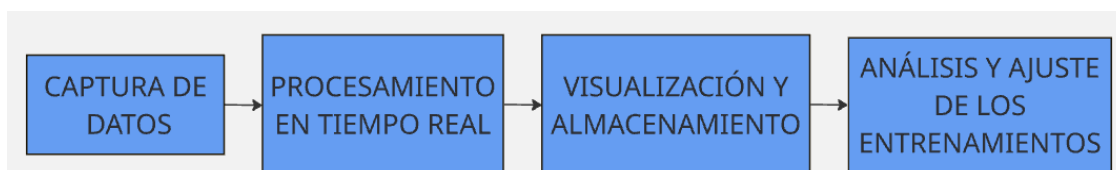


Fig 1. Diagrama de Nivel 1 de la Solución

El diseño modular y autónomo del sistema permite su implementación directa sobre el cuerpo del jugador, sin cables ni dependencias externas. Este enfoque facilita su integración durante la práctica deportiva, sin interferir con la dinámica del entrenamiento. Asimismo, la interfaz de usuario resulta simple y accesible, con

funcionalidades que permiten almacenar datos, revisar históricos y generar reportes para facilitar la interpretación técnica por parte del entrenador.

A diferencia de los sistemas comerciales existentes, esta propuesta prioriza la apertura tecnológica, la posibilidad de personalización y la adaptabilidad al entorno universitario. Su desarrollo representa no solo una solución práctica inmediata, sino también una plataforma sobre la cual se pueden realizar futuras investigaciones y mejoras desde el ámbito académico.

3.2 Requerimientos del Sistema

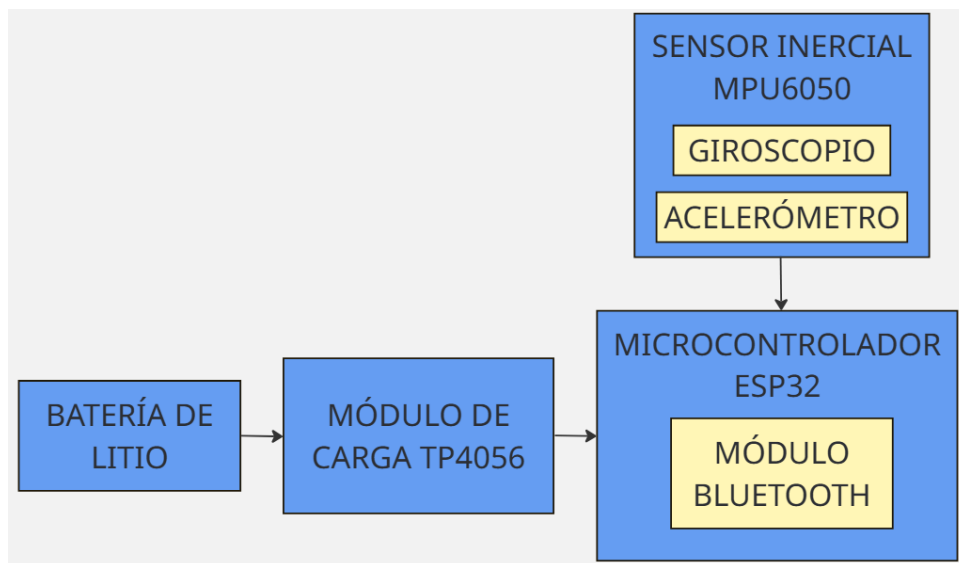
Para cumplir con los objetivos propuestos, el sistema satisface los siguientes requerimientos:

- 1 Medición automática de saltos verticales mediante sensor inercial (acelerómetro y giroscopio).
- 2 Estimación de altura mediante cálculo por tiempo de vuelo.
- 3 Registro de frecuencia y cantidad de saltos por sesión.
- 4 Transmisión inalámbrica de datos vía Bluetooth Low Energy (BLE).
- 5 Interfaz de usuario móvil para visualización de datos y almacenamiento local.
- 6 Autonomía de operación de al menos 3 horas con batería recargable.
- 7 Construcción compacta y ergonómica que no interfiera con la actividad deportiva.

3.3 Tecnologías seleccionadas

El sistema está construido a partir de componentes electrónicos de bajo costo, ampliamente documentados y compatibles entre sí, tal y como se muestra en la Figura 2. La selección de estas tecnologías responde a criterios de eficiencia energética, tamaño reducido, facilidad de integración y disponibilidad en el mercado.

- Microcontrolador ESP32-WROOM-32 encargado del procesamiento de datos, la adquisición de señales del sensor inercial y la transmisión inalámbrica vía Bluetooth Low Energy (BLE). Este cuenta con un doble núcleo permite manejar tareas en paralelo y ofrece un consumo energético optimizado.
- Sensor inercial MPU6050, se trata de un módulo que combina un acelerómetro y un giroscopio triaxial, permitiendo obtener datos precisos sobre la aceleración lineal y la velocidad angular del cuerpo del jugador. A partir de esta información, se detectan los eventos de salto y se calcula el tiempo de vuelo.
- Módulo de carga TP4056, este permite recargar la batería de forma segura y eficiente, protegiéndola de sobrecargas y sobredescargas. Este módulo también facilita la operación autónoma del dispositivo sin necesidad de intervención externa durante el uso.
- Batería de polímero de litio (Li-Po) 603050 la cual alimenta el sistema con una tensión nominal de 3.7 V y una capacidad de 1000 mAh, garantizando una operación continua por varias horas.



- Fig 2. Diagrama de Nivel 2 del Dispositivo de Medición

La integración de estos elementos da lugar a un sistema robusto, portátil y adaptable a las condiciones reales del entrenamiento deportivo universitario. Todos los componentes utilizados han sido probados en otros desarrollos y ofrecen estabilidad operativa comprobada.

3.4 Metodología de trabajo

El desarrollo del sistema se organizó en fases que permitieron una evolución progresiva desde la concepción inicial hasta la validación final. Estas etapas se estructuraron de forma iterativa, incorporando ciclos de prueba y mejora continua con base en los resultados obtenidos y la retroalimentación del entorno de aplicación.

La primera fase correspondió a la investigación y análisis técnico, en la cual se identificaron las necesidades funcionales del sistema, se evaluaron distintas tecnologías

disponibles y se seleccionaron los componentes más adecuados. A partir de esta base, se procedió al diseño del hardware, considerando aspectos como el consumo energético, la disposición de los pines, las dimensiones físicas y la facilidad de ensamblaje.

En paralelo, se realizó el desarrollo del software embebido, encargado de adquirir y procesar las señales del sensor inercial, detectar eventos de salto y calcular las métricas asociadas. Este software fue implementado en el microcontrolador ESP32 utilizando el lenguaje C++ bajo el entorno de Arduino IDE.

Una vez definidos el hardware y el firmware, se pasó a la etapa de integración del sistema, en la que se ensamblaron todos los componentes y se realizó la comunicación entre el dispositivo y la aplicación móvil. Esta última fue desarrollada en Android Studio utilizando Kotlin, e incluyó funciones de conexión BLE, visualización en tiempo real, almacenamiento local y generación de reportes.

Adicionalmente, durante la fase de construcción se diseñó una placa de circuito impreso (PCB) que permitió organizar y fijar los componentes electrónicos de forma eficiente, asegurando conexiones eléctricas confiables y una estructura compacta. La PCB fue diseñada utilizando el software Eagle CAD, y posteriormente fabricada para su ensamblaje manual mediante soldadura.

Para proteger y asegurar el dispositivo en condiciones reales de uso, se diseñó también una carcasa personalizada utilizando el software de modelado 3D SolidWorks. Esta carcasa fue impresa mediante tecnología FDM con filamento PLA, y su diseño consideró aspectos como la ventilación, accesibilidad a los puertos, sujeción al cuerpo del jugador y protección contra impactos menores. El uso de impresión 3D permitió

realizar iteraciones rápidas sobre el diseño físico hasta lograr una solución ergonómica y funcional.

La fase final correspondió a la validación del sistema, que incluyó ensayos en campo con el equipo de voleibol del TEC, donde cada uno de jugadores evaluados firmó un consentimiento informado sobre el uso de los datos recopilados para este proyecto, haciendo la salvedad de que ninguno de sus datos personales sería publicado. Durante estas pruebas se evaluó la exactitud de los datos recolectados, además se observó la estabilidad de la conexión inalámbrica, la autonomía del sistema y la experiencia de uso.

3.5 Fundamentos técnicos

El funcionamiento del sistema desarrollado se fundamenta en principios del sensor inercial, procesamiento embebido y comunicación inalámbrica de bajo consumo. Cada componente cumple un rol específico dentro de la arquitectura general, y su integración garantiza el cumplimiento de los objetivos funcionales del dispositivo.

El sensor inercial MPU6050, compuesto por un acelerómetro y un giroscopio triaxial, permite capturar con alta frecuencia los datos de aceleración y velocidad angular del cuerpo del jugador. La detección de un salto se basa en el análisis de la aceleración vertical y en el patrón característico que se presenta durante el despegue y el aterrizaje. A partir de estas señales, el sistema calcula el tiempo de vuelo, variable que se utiliza para estimar la altura alcanzada mediante la ecuación:

$$h = \frac{g (t_{vuelo})^2}{8}$$

donde h es la altura del salto, g es la aceleración gravitacional y t_{vuelo} es el tiempo total en el aire. Este método, validado en la literatura (Bosco, 1983), permite obtener estimaciones suficientemente precisas para aplicaciones de monitoreo deportivo.

El ESP32-WROOM-32 se encarga de adquirir los datos del sensor mediante comunicación I2C, aplicar los filtros y algoritmos necesarios para procesarlos y transmitir los resultados vía Bluetooth Low Energy (BLE) a la aplicación móvil. El procesamiento se realiza en tiempo real, y se incorporan rutinas de control de errores, compensación de ruido y gestión de energía.

La aplicación móvil, desarrollada en Kotlin mediante Android Studio, recibe los datos enviados por el microcontrolador y los presenta al usuario a través de una interfaz gráfica simple e intuitiva. Esta interfaz permite visualizar la cantidad de saltos, la altura promedio, la frecuencia de salto y otros parámetros estadísticos relevantes. Los datos se almacenan localmente y pueden ser exportados para su análisis posterior.

A nivel eléctrico, el sistema opera con una batería de polímero de litio de 3.7 V, la cual es recargada mediante un módulo TP4056, que incluye protección contra sobrecarga y descarga. La regulación de voltaje y la eficiencia del diseño permiten alcanzar una autonomía de varias horas de operación continua.

Finalmente, tanto la PCB como la carcasa fueron diseñadas para asegurar la funcionalidad, la durabilidad y la comodidad del dispositivo durante su uso en entrenamientos reales, sin afectar el rendimiento ni la movilidad del jugador.

3.6 Detalles técnicos y conexiones de hardware

A continuación, se describen con mayor profundidad los componentes principales del sistema, sus características técnicas y su conexión dentro del diseño general del dispositivo.

3.6.1 Microcontrolador ESP-WROOM-32

El microcontrolador ESP-WROOM-32 es un módulo de desarrollo ampliamente utilizado en sistemas embebidos e Internet de las Cosas (IoT), gracias a su alto nivel de integración, bajo consumo energético y capacidad de procesamiento. Incorpora un procesador Xtensa de 32 bits de doble núcleo con frecuencia de hasta 240 MHz, además de conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth v4.2 (BLE + BR/EDR), lo que lo hace adecuado para aplicaciones inalámbricas y portátiles.

Este módulo se implementa comúnmente en placas de desarrollo como el ESP32 DevKit V1, que facilita la conexión de sensores, actuadores y dispositivos externos. A continuación, se describen sus principales características y tipos de pines:

- El microcontrolador ESP32-WROOM-32 es un módulo de desarrollo ampliamente utilizado en sistemas embebidos e Internet de las Cosas por su alto nivel de integración, bajo consumo y capacidad de procesamiento. Incorpora un procesador Xtensa de 32 bits de doble núcleo que alcanza hasta

240 MHz, además de conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth v4.2, lo que lo hace ideal para aplicaciones inalámbricas y portátiles.

- Como muestra la Figura 3, dispone de hasta 34 pines de propósito general (GPIO) que se pueden configurar como entradas o salidas digitales, algunos con funciones especiales como PWM, UART, SPI, I²C, ADC y DAC.
- Ofrece dos conversores analógico-digitales (ADC1 y ADC2) con hasta 18 canales disponibles, además de dos salidas digitales a analógicas (DAC) en los pines GPIO25 y GPIO26.
- Permite implementar comunicación I²C en cualquier par de GPIO configurables por software, aunque se usan con frecuencia GPIO21 como SDA y GPIO22 como SCL.
- Incluye compatibilidad con múltiples interfaces SPI y hasta tres UART, de las cuales la UART0 se destina normalmente a programación y depuración mediante el puerto USB.
- Proporciona pines de alimentación de 3.3 V y tierra (GND), además de pines específicos como EN para reinicio y BOOT para ingreso al modo de programación.
- Integra un modo de suspensión profunda (deep sleep) que reduce el consumo a menos de 10 μ A, lo que resulta ventajoso en dispositivos portátiles alimentados con batería. Conexión de batería: Algunas placas que integran el ESP-WROOM-32 permiten la conexión de baterías recargables de litio a través de un conector JST, incluyendo un circuito de carga automática mediante el puerto USB.

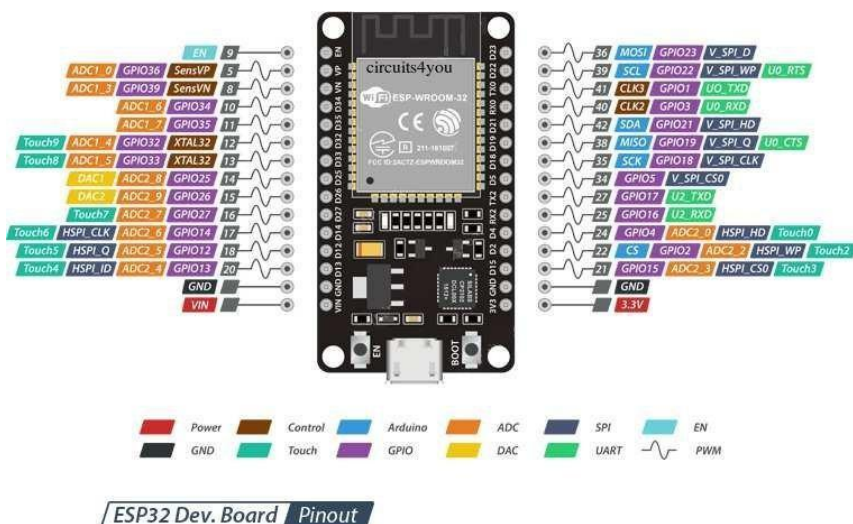


Fig 3. Esquema de pines del ESP32 Wroom32 DevKit (Espressif Systems, 2020)

3.6.2 Sensor Inercial MPU6050

El MPU6050 (Figura 4) es un sensor inercial de seis grados de libertad, que combina en un solo chip un acelerómetro y un giróscopo triaxiales. Este sensor es ampliamente utilizado en aplicaciones de monitoreo de movimiento, navegación, robótica y sistemas portátiles debido a su precisión, bajo consumo energético y facilidad de integración con microcontroladores.

El sensor comunica sus datos mediante la interfaz I2C, lo que permite una conexión sencilla y eficiente con plataformas como el ESP32. Su capacidad de medición simultánea de aceleración y velocidad angular lo hace ideal para estimar desplazamientos verticales como los saltos en actividades deportivas. A continuación, se detallan sus principales características técnicas y funcionales:

- El acelerómetro triaxial permite medir la aceleración en los ejes X, Y y Z, con un rango configurable en $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ o $\pm 16g$, lo cual facilita ajustar la sensibilidad del sensor según la aplicación específica.

- El giroscopio triaxial mide la velocidad angular en los tres ejes y ofrece la posibilidad de configurar el rango de medición entre ± 250 °/s, ± 500 °/s, ± 1000 °/s y ± 2000 °/s, brindando información clave sobre la orientación y el movimiento rotacional.

- La interfaz de comunicación del sensor se basa en I²C con una dirección configurable (0x68 o 0x69), lo que simplifica su integración con microcontroladores modernos sin necesidad de múltiples líneas de datos.

- El dispositivo incluye un sensor de temperatura interno que permite monitorear la temperatura del chip, lo cual resulta útil para realizar compensaciones térmicas en aplicaciones que demandan mayor precisión.

- El procesador digital de movimiento (DMP) integrado en el MPU6050 funciona como un coprocesador interno capaz de ejecutar cálculos de fusión de sensores y filtrado, disminuyendo la carga de procesamiento en el microcontrolador principal.

- La frecuencia de muestreo puede configurarse para alcanzar tasas de hasta 1 kHz, lo que lo hace adecuado para registrar eventos de corta duración, como los picos de aceleración presentes durante un salto.

- La alimentación del sensor se sitúa entre 3.3 V y 5 V, con un consumo típico en operación continua cercano a los 3.9 mA, lo que lo convierte en un componente eficiente y apropiado para sistemas portátiles.

Gracias a estas características, el MPU6050 es una opción altamente confiable para la estimación de altura basada en el tiempo de vuelo, en aplicaciones como el monitoreo de saltos en voleibol. Su combinación de precisión, bajo costo y compatibilidad con plataformas embebidas lo convierten en una pieza clave dentro del sistema de captura de datos del presente proyecto.

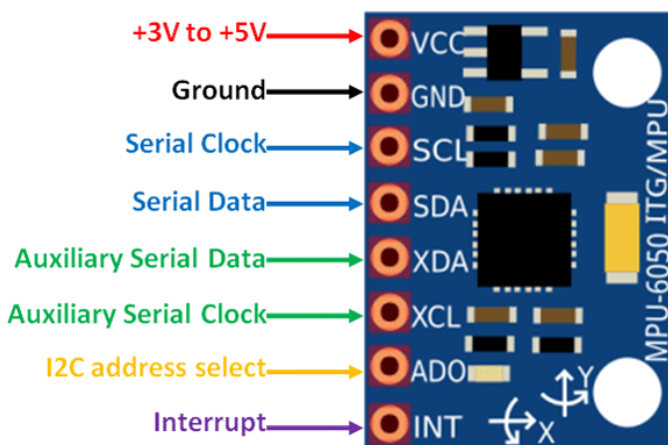


Fig 4. Esquema de pines del MPU 6050 (InvenSense Inc., 2013)

3.6.3 Módulo de Carga TP4056

El TP4056, mostrado en la Figura 5, es un módulo de carga lineal basado en un circuito integrado controlador de carga para baterías de ion-litio de una sola celda. Se utiliza ampliamente en proyectos electrónicos portátiles gracias a su

simplicidad de integración, bajo costo y funcionalidad completa para la gestión de carga mediante puerto USB. Permite cargar baterías de 3.7 V tipo Li-Ion o Li-Poly mediante micro-USB, USB-C o directamente desde una fuente de alimentación de 5 V.

- Funciona con una entrada de voltaje de entre 4.5 V y 5.5 V, suministrada generalmente por un puerto micro-USB o pines VCC y GND.
- La corriente de carga predeterminada es de 1 A, aunque puede ajustarse cambiando la resistencia de programación conectada entre los pines PROG y GND.
- Incluye indicadores LED que muestran el estado de la carga, con un color rojo mientras la batería se está cargando y azul o verde cuando el proceso ha finalizado.
- En muchas versiones incorpora protección contra sobrecarga, descarga profunda y cortocircuitos mediante la inclusión de chips como el DW01 y el doble MOSFET FS8205A.
- El proceso de carga se interrumpe cuando la batería alcanza los 4.2 V y la corriente desciende por debajo de un umbral mínimo, garantizando así un ciclo de carga seguro.
- Su diseño compacto facilita la integración en proyectos electrónicos portátiles, y la conexión a la batería se realiza directamente mediante los pines BAT+ y BAT-.

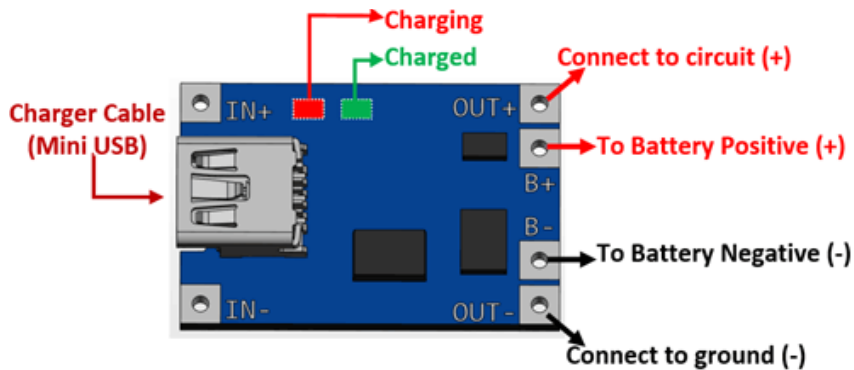


Fig 5. Esquema de pines del módulo de carga TP4056 (NanJing Top Power ASIC Corp., 2002)

3.6.4 Batería de Polímero de Litio 603050

La batería 603050 es una celda recargable de polímero de litio (Li-Po) diseñada para aplicaciones electrónicas portátiles que requieren un suministro energético compacto, liviano y de alta densidad. Su nomenclatura proviene de sus dimensiones aproximadas de 6.0 mm de grosor, 30 mm de ancho y 50 mm de largo, lo que facilita su integración en espacios reducidos como dispositivos de monitoreo personal. Este tipo de batería resulta especialmente adecuada para sistemas embebidos y de bajo consumo como el desarrollado en este proyecto, ya que proporciona suficiente autonomía para una jornada de entrenamiento sin comprometer tamaño ni peso.

- Ofrece una capacidad nominal de aproximadamente 1000 mAh y una tensión nominal de 3.7 V, con un voltaje máximo de carga de 4.2 V y mínimo de corte de 3.0 V.

- Habitualmente incorpora un conector JST 2.0 PH que permite su conexión directa a módulos de carga como el TP4056.
- Está diseñada para soportar entre 300 y 500 ciclos de carga-descarga, dependiendo de las condiciones de uso y la profundidad de descarga.
- Integra un circuito de protección (PCM) que previene daños por sobrecarga, sobredescarga o cortocircuitos.
- Su peso, inferior a 25 g en la mayoría de los casos, la convierte en una opción ideal para sistemas portátiles donde la ergonomía y el bajo peso son factores críticos.

3.7 Conexión del sensor, módulo de carga, microcontrolador y batería

La conexión entre los distintos componentes del sistema fue diseñada para garantizar tanto la estabilidad eléctrica como la integridad de la comunicación digital. El sensor inercial MPU6050 se alimentó directamente desde uno de los pines de 3.3 V del microcontrolador ESP32-WROOM-32, mientras que su línea de tierra fue conectada al pin GND del mismo. Para la transmisión de datos, se utilizaron los pines SDA (GPIO21) y SCL (GPIO22) del ESP32, configurados para operar bajo el protocolo de comunicación I²C. Esta configuración aseguró una transferencia de datos estable entre el microcontrolador y el sensor inercial, permitiendo la captura precisa de la aceleración y la velocidad angular durante la ejecución de los saltos.

La batería de polímero de litio modelo 603050, con una tensión nominal de 3.7 V, se conectó directamente al módulo de carga TP4056 a través de los terminales BAT+ y BAT-. La salida del TP4056 (OUT+ y OUT-) fue conectada a la línea de alimentación del ESP32 y del resto del sistema. Esta topología permitió recargar la batería mediante una entrada USB conectada a los terminales IN+ e IN- del módulo, sin necesidad de desconectar ningún componente.

Para garantizar una buena distribución del voltaje y facilitar el ensamblaje compacto del sistema, se diseñó una placa de circuito impreso (PCB) en Eagle CAD que integró todos los componentes principales. Las pistas fueron trazadas considerando distancias cortas entre el sensor MPU6050 y el ESP32 para reducir interferencias en la línea I²C.

La conexión eléctrica total (Figura 6) fue diseñada para minimizar el consumo energético y maximizar la confiabilidad durante su uso en condiciones dinámicas. La disposición física de los componentes en la PCB también contempló la orientación de montaje dentro de la carcasa impresa, facilitando tanto la ventilación como la sujeción segura al cuerpo del jugador.

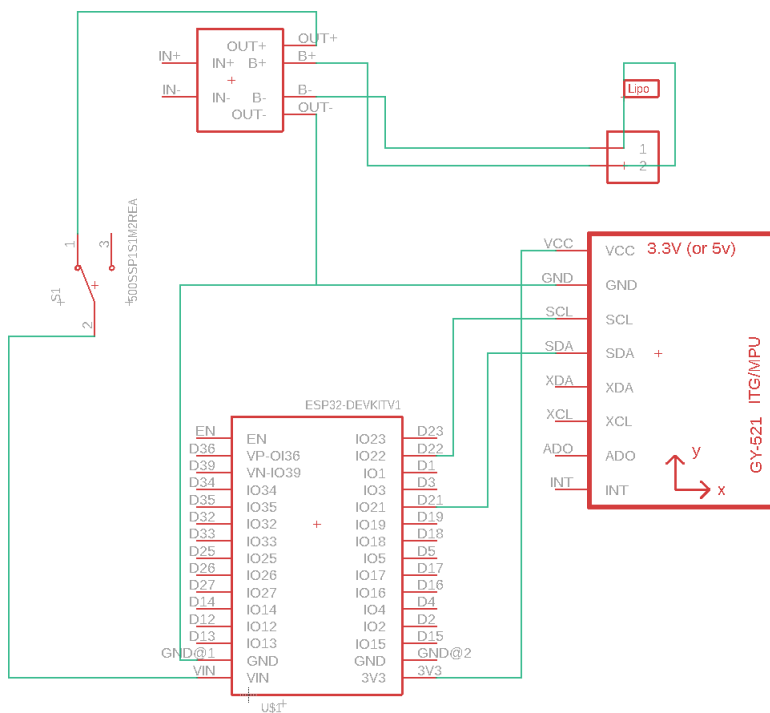


Fig 6. Esquema de conexiones del Sensor MPU6050, módulo de cara y batería al microcontrolador ESP32

3.8 Modelado e impresión 3D de la carcasa

El diseño de la carcasa del dispositivo (Figura 7 y Figura 8) fue realizado en el software de modelado paramétrico SolidWorks. Se elaboró un modelo tridimensional que contempló la ubicación precisa del microcontrolador, el sensor MPU6050, el módulo TP4056 y la batería, así como los accesos para el puerto de carga, ranuras de ventilación y soportes internos para fijación.

Se definieron parámetros como el espesor de pared de 2 mm, holguras de 0.3 mm para los alojamientos, y espacio adicional para el paso de cableado interno y la expansión térmica del sistema durante su operación. La carcasa fue diseñada en dos partes una

taba y una base unidas por salientes en la tapa, correspondientes con agujeros en la base, facilitando su apertura para mantenimiento o inspección.

Una vez completado el diseño, se exportó a formato STL y se imprimió utilizando tecnología de deposición de material fundido (FDM) con filamento PLA. La impresión se realizó utilizando las impresoras 3D disponibles en la oficina de corte láser del Laboratorio de Automatización e Instrumentación (LAIMI) del Tecnológico de Costa Rica. Esta colaboración permitió asegurar la calidad dimensional y la precisión del ajuste entre los componentes.

El uso de impresión 3D facilitó la iteración rápida de prototipos, lo cual permitió ajustar el diseño físico del dispositivo de acuerdo con los requerimientos funcionales y ergonómicos observados durante las pruebas.

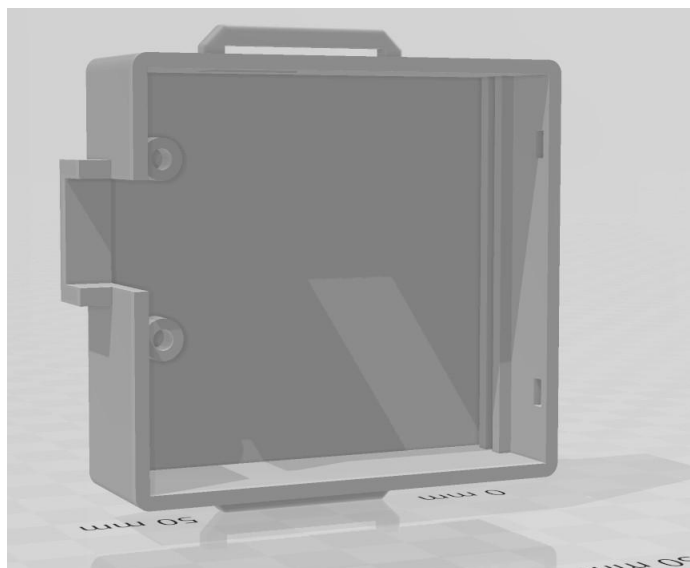


Fig 7. Diseño de la base de la carcasa en software de diseño 3D

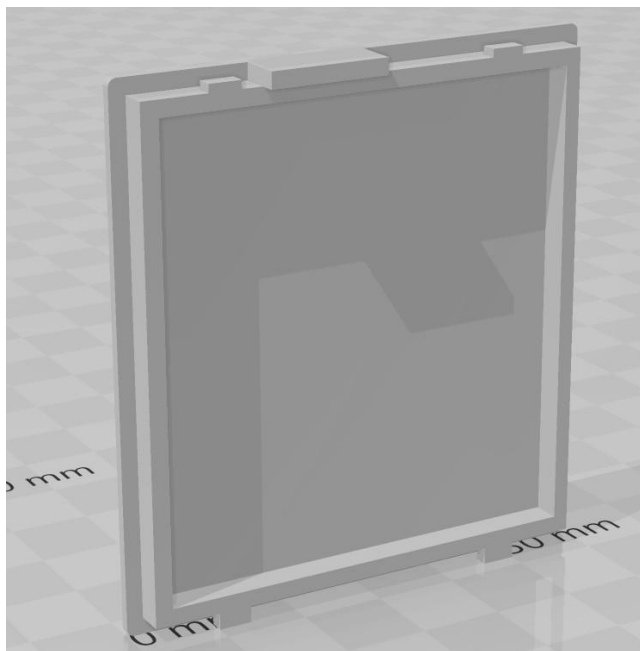


Fig 8. Diseño de la tapa de la carcasa en software de diseño 3

3.9 Diseño y fabricación de la PCB

La placa de circuito impreso (PCB) que conforma la base física del sistema fue diseñada utilizando el software Eagle CAD, ampliamente empleado en el ámbito académico para el desarrollo de circuitos electrónicos. El diseño incluyó las pistas necesarias para la conexión entre el microcontrolador ESP32-WROOM-32, el sensor MPU6050, el módulo de carga TP4056 y la batería Li-Po. Para la batería, se integró un bloque terminal de 2 polos con paso de 3.5 mm, al cual se conectó la batería. Esto permitió una conexión segura, desmontable y con mayor flexibilidad para pruebas y reemplazos.

Durante el proceso de diseño se ejecutó un análisis de reglas eléctricas DRC para asegurar la integridad del circuito antes de su fabricación. Este análisis permitió identificar y corregir errores críticos como superposiciones de pistas, los cuales pueden

generar cortocircuitos o fallas funcionales. Además, se utilizó una distancia de aislamiento de 0.6 mm entre pistas y áreas de cobre, como medida preventiva para garantizar márgenes de seguridad adecuados.

Una vez validado el diseño, se procedió a la fabricación de la PCB en el Laboratorio de Circuitos Impresos de la Escuela de Ingeniería Electrónica del Tecnológico de Costa Rica. La fabricación incluyó el grabado químico, perforado, serigrafía y recubrimiento de cobre necesarios para obtener una placa funcional.

La PCB fabricada, mostrada en la Figura 9 y Figura 10, permitió una integración compacta de todos los componentes, facilitando tanto el montaje del sistema como su posterior encapsulado dentro de la carcasa impresa en 3D. Su diseño contribuyó a la confiabilidad del sistema en pruebas reales, asegurando conexiones firmes y organizadas que soportaron el movimiento constante durante el uso en campo.

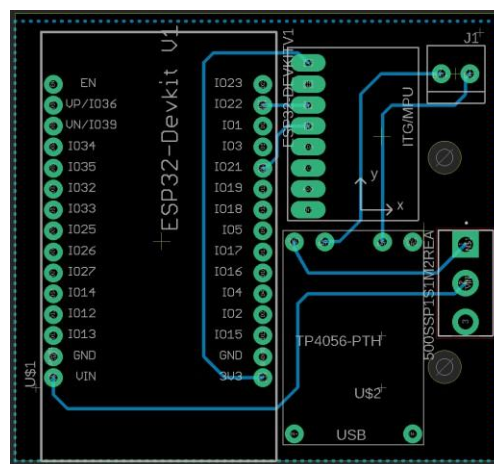


Fig 9. Diseño de la PCB en el software Eagle CAD

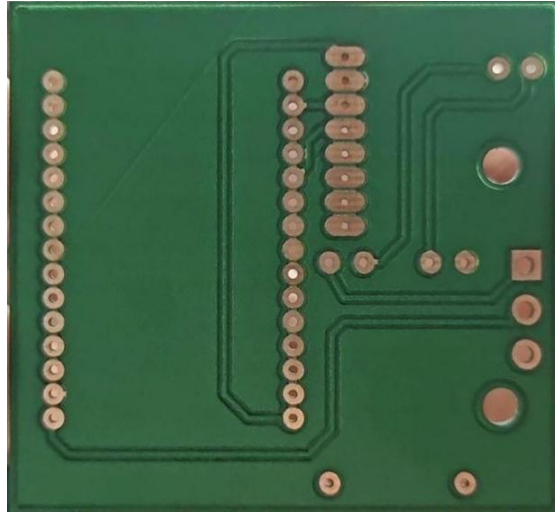


Fig 10. Resultado de la impresión de la PCB

3.10 Desarrollo del firmware y de la aplicación móvil

3.10.1 Desarrollo del firmware

El firmware del sistema fue programado para ejecutarse sobre el microcontrolador ESP32-WROOM-32, utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE y el lenguaje C++. El código embebido controla tanto la lectura de datos del sensor inercial como el procesamiento de señales y la transmisión inalámbrica hacia la aplicación móvil.

El firmware implementa las siguientes funciones principales:

- Inicialización de sensores y comunicaciones (Figura 11): En el arranque, el ESP32 inicia la comunicación I²C con el sensor MPU6050, configurando su rango de medición.

```
Wire.begin(21, 22);  
mpu.begin();  
mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_8_G);  
mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_500_DEG);
```

Fig 11. Inicialización del MPU6050 en el Firmware del microcontrolador

Paralelamente, el sistema configura la comunicación Bluetooth Low Energy (BLE), estableciendo los UUIDs correspondientes al servicio de datos y comandos (Figura 12).

```
#define SERVICE_UUID          "12345678-1234-5678-1234-56789abcdef0"  
#define CHARACTERISTIC_UUID  "12345678-1234-5678-1234-56789abcdef1"  
#define COMMAND_UUID         "12345678-1234-5678-1234-56789abcdef2"
```

Fig 12. Configuración del BLE en el firmware del controlador

Se crean dos características BLE: una para enviar los datos de salto a la aplicación móvil, y otra para recibir comandos desde la aplicación como inicio de calibración, reinicio de contador y finalización de sesión.

- Calibración automática de gravedad: Antes de iniciar el monitoreo de saltos, el sistema realiza una calibración automática para determinar la magnitud de aceleración base en reposo (baseAccMag). Se aplica un filtrado de valores válidos para evitar lecturas aberrantes (Figura 13)

```

if (accFilt > 7.0 && accFilt < 12.0) {
    calibrationSum += accFilt;
    calibrationCount++;
}

```

Fig 13. Calibración del MPU6050 en el Firmware del microcontrolador

Finalizada la calibración, el valor promedio de aceleración base es utilizado como referencia para la detección de eventos de salto.

- Procesamiento de detección de salto (Figura 14): La detección de salto se basa en el cálculo continuo de la magnitud vectorial de aceleración

```

float accMag = sqrt(a.acceleration.x * a.acceleration.x +
    a.acceleration.y * a.acceleration.y +
    a.acceleration.z * a.acceleration.z);

```

Fig 14. Calibración del MPU6050 en el Firmware del microcontrolador

Esta señal es suavizada mediante un filtro de media móvil de 8 muestras (MA_WINDOW). Un salto se detecta cuando la aceleración filtrada supera el umbral superior ($\text{baseAccMag} + \text{jumpThreshold}$), con una histéresis para evitar falsos positivos (Figura 14).

```

if (!inJump && accFilt > upper && (now - lastJumpTime > debounceMs)) {
    inJump = true;
    jumpCount++;
}

```

Fig 15. Detección de saltos en el el Firmware del microcontrolador

Una vez detectado un salto, se actualiza el contador total y se envía la información a la aplicación móvil por BLE.

- Transmisión de datos BLE (Figura 15): Cada vez que se detecta un salto válido, el firmware transmite por BLE un paquete formateado en JSON simplificado, el cual incluye:
 1. Magnitud de aceleración.
 2. Número de salto.
 3. Tiempo transcurrido desde el inicio de la sesión.

```
snprintf(buffer, sizeof(buffer), "%.2f,%d,%.2f,%lu", accFilt, jumpCount, 0.0, now - StartTime);  
pCharacteristic->setValue(buffer);  
pCharacteristic->notify();
```

Fig 16. Transmisión de datos del microcontrolador a la aplicación móvil

- Recepción de comandos desde la aplicación móvil: El firmware también interpreta comandos recibidos desde la aplicación:
 1. "CALIBRAR": Inicia el proceso de calibración desde la app.
 2. "RESET_COUNTER": Reinicia el contador de saltos.
 3. "finalizar": Calcula y transmite un resumen de la sesión con datos como frecuencia promedio duración total y cantidad de saltos.

3.10.2 Desarrollo de la aplicación móvil

El desarrollo de la aplicación móvil se realizó en el entorno Android Studio, empleando el lenguaje Kotlin bajo una arquitectura modular, orientada a la separación de responsabilidades. La aplicación fue diseñada para ofrecer conectividad directa con el dispositivo de medición a través de Bluetooth Low Energy (BLE), permitiendo la captura, visualización y almacenamiento de los datos de salto en tiempo real.

3.10.2.1 Arquitectura general

La aplicación fue organizada en cinco capas funcionales principales:

1. Capa BLE (ble): Maneja todo el ciclo de vida de la comunicación Bluetooth Low Energy, desde el escaneo hasta la suscripción de notificaciones.
2. Capa de UI (ui): Controla las pantallas de conexión, sesión activa, selección de jugador, historial de sesiones y navegación general.
3. Capa de lógica central (viewmodel): Intermedia entre los datos recibidos por BLE, su procesamiento, persistencia y visualización.
4. Capa de persistencia (data): Gestiona la base de datos local Room para almacenar jugadores, sesiones y saltos.
5. Capa de navegación (MainActivity.kt): Administra el flujo entre las pantallas y la comunicación de eventos entre componentes.

Esta arquitectura permite escalabilidad, mantenibilidad y una separación clara entre el hardware, el protocolo BLE y la lógica de entrenamiento deportivo.

3.10.2.2 Escaneo y conexión Bluetooth Low Energy

La funcionalidad de escaneo se desarrolló utilizando el paquete `ble/BleManager.kt`. El escaneo de dispositivos inicia al activar el `BluetoothLeScanner`, como se observa a continuación en la Figura 16.

```
val scanner = bluetoothAdapter?.bluetoothLeScanner
val settings = ScanSettings.Builder().build()
```

Fig 17. Escaneo de dispositivos BLE en la aplicación móvil

Al detectar dispositivos cercanos, se verifica que el UUID de servicio coincida con el publicado por el firmware del ESP32 (Figura 17).

```
val SERVICE_UUID: UUID = UUID.fromString("12345678-1234-5678-1234-56789abcdef0")
```

Fig 18. Validación del identificador por parte de la aplicación móvil

Una vez conectado, se habilita la notificación automática de la característica de datos.

3.10.2.3 Recepción y deserialización de datos

Cada paquete recibido es capturado en el callback `onCharacteristicChanged` (Figura 18).

- Aceleración filtrada.

- Número de salto.
- Tiempo transcurrido desde el inicio de la sesión.
- Estos datos son desglosados por el ViewModel para actualizar las estadísticas de la sesión:

```
val parts = data.split(",")
val acceleration = parts[0].toFloat()
val jumpNumber = parts[1].toInt()
val elapsedTime = parts[3].toLong()
```

Fig 19. Deserialización de los datos recibidos en la aplicación móvil

3.10.2.4 Visualización gráfica en tiempo real

Gracias a Jetpack Compose, cada vez que se actualizan los datos en el ViewModel, la interfaz de usuario es reconstruida de forma reactiva. Durante la sesión activa, la app muestra:

- Conteo total de saltos.
- Aceleración instantánea.
- Tiempo transcurrido.
- Estado de conexión BLE.

Control remoto de la sesión desde la app

Mediante la segunda característica BLE de comandos (COMMAND_UUID), el usuario puede enviar instrucciones hacia el dispositivo (Figura 19).

```
commandCharacteristic.setValue("CALIBRAR".toByteArray())  
gatt.writeCharacteristic(commandCharacteristic)
```

Fig 20. Ejemplo de envío de un comando desde la aplicación móvil

Los comandos disponibles son:

- "CALIBRAR": Inicia la recalibración del sensor.
- "RESET_COUNTER": Reinicia el conteo de saltos.
- "finalizar": Solicita el resumen final de la sesión.

3.10.2.5 Persistencia local de datos deportivos

Para registrar el historial de sesiones, se utilizó Room Database, con entidades como:

- Player: identificación de los jugadores.
- Session: resumen de cada sesión de entrenamiento.
- Jump: registro individual de cada salto.

El acceso a la base de datos se realizó a través de los DAO (Figura 20).

```
@Dao
interface SessionDao {
    @Insert
    suspend fun insert(session: Session)
}
```

Fig 21. Acceso a base de datos desde la aplicación móvil

Esto permite almacenar, consultar y graficar el desempeño histórico de cada jugador en posteriores entrenamientos.

3.10.2.6 Respaldo en Google Drive

Para facilitar la generación de reportes y el análisis externo de los datos obtenidos durante las sesiones de salto, se implementó una funcionalidad de exportación en formato CSV (Comma Separated Values) desde la propia aplicación móvil.

El proceso de exportación se encuentra centralizado en la clase `CsvExporter` y es accesible desde la interfaz de historial de sesiones. Cuando el usuario selecciona una sesión específica y pulsa el botón "Exportar CSV", la aplicación realiza las siguientes acciones:

- Consulta la base de datos local Room para obtener el resumen estadístico de la sesión y el listado completo de los saltos individuales.
- Genera una estructura temporal en memoria con los datos relevantes, formateando los valores numéricos a dos decimales y asegurando el uso del punto como separador decimal, lo que garantiza la compatibilidad internacional del archivo exportado.

- Construye el contenido CSV en dos bloques: el primero contiene el resumen de la sesión con encabezados claros y unidades explícitas; el segundo, separado por una línea en blanco, detalla cada salto realizado en la sesión.

- Asigna un nombre de archivo descriptivo que incluye la fecha y el nombre del jugador, facilitando la organización de los reportes en Google Drive u otros sistemas de almacenamiento.

- Finalmente, utiliza los mecanismos estándar de Android para almacenar el archivo en el dispositivo o permitir su compartición directa con aplicaciones como Google Drive, correo electrónico o servicios de mensajería.

Esta solución permite que tanto entrenadores como jugadores puedan analizar el progreso de manera autónoma y flexible, integrando los datos registrados en plataformas externas como hojas de cálculo o sistemas de análisis avanzado, sin requerir conocimientos técnicos adicionales.

3.10.2.7 Integración total de entrenamiento autónomo

La aplicación, junto al dispositivo embebido, permite que el entrenador:

- Inicie sesiones con jugadores específicos.
- Obtenga estadísticas objetivas en tiempo real.
- Almacene automáticamente el historial de entrenamientos.
- Genere reportes de progreso sin intervención técnica adicional.

3.11 Sistema de sujeción al deportista

Para permitir la portabilidad y estabilidad del dispositivo durante los entrenamientos, se diseñó un sistema de sujeción ergonómico (Figura 21 y Figura 22), seguro y ajustable, que garantiza su correcta fijación al cuerpo del jugador durante los movimientos de salto, sin interferir en la ejecución técnica ni generar molestias al usuario.

El sistema de fijación está basado en el uso de:

- Hebillas plásticas de cierre lateral o broches de liberación rápida con un ancho de 1 pulgada, las cuales permiten colocar y retirar rápidamente el dispositivo.
- Hebilla plástica ajustable de longitud, que facilita modificar el perímetro del cinturón de forma sencilla, permitiendo su adaptación a las dimensiones físicas de diferentes deportistas.
- Banda elástica textil de alta resistencia, la cual actúa como el soporte principal, proporcionando flexibilidad y ajuste dinámico, permitiendo que el cinturón permanezca firme en su posición incluso durante movimientos explosivos como los saltos.



Fig 22. Sistema de cierre para la sujeción del dispositivo al deportista



Fig 23. Sistema de regulación de la banda que sujeta el dispositivo al deportista

Los extremos de la banda elástica fueron fijados a los salientes laterales incorporados en el diseño de la carcasa impresa en 3D, generando un sistema integrado de sujeción donde la electrónica queda completamente asegurada y protegida durante el uso.

Este diseño permite:

- Ajuste rápido e individualizado para cada jugador.

- Distribución homogénea de la presión en el cuerpo, evitando molestias o puntos de fricción.
- Absorción parcial de los movimientos abruptos, evitando desplazamientos indeseados del dispositivo durante el salto.

La implementación de este sistema de fijación optimizó la comodidad de uso durante las sesiones de entrenamiento, facilitando la adopción práctica del dispositivo en el entorno deportivo universitario.

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MONITOR DE SALTOS FRENTE AL DISPOSITIVO VALD FORCEDECKS

Este capítulo presenta la validación del Monitor de Saltos comparado con el sistema de referencia Vald ForceDecks. El ForceDecks es un dispositivo basado en plataformas de fuerza que registra con gran precisión fuerzas de reacción del suelo, tiempos de contacto y de vuelo, a partir de los cuales calcula la altura de salto y otros indicadores de rendimiento. Su amplio uso en contextos deportivos y clínicos, y la evidencia de su validez y fiabilidad, lo convierten en un patrón idóneo para esta comparación (Collings, 2024).

El sistema ForceDecks utiliza una o dos plataformas de fuerza para muestrear la señal de fuerza vertical a alta frecuencia. A partir de esa señal identifica con precisión los eventos de despegue y aterrizaje y calcula métricas como la altura de salto, asimetrías y potencia mecánica. En diversas investigaciones se ha reportado su validez y repetibilidad para pruebas de salto vertical (Collings, 2024).

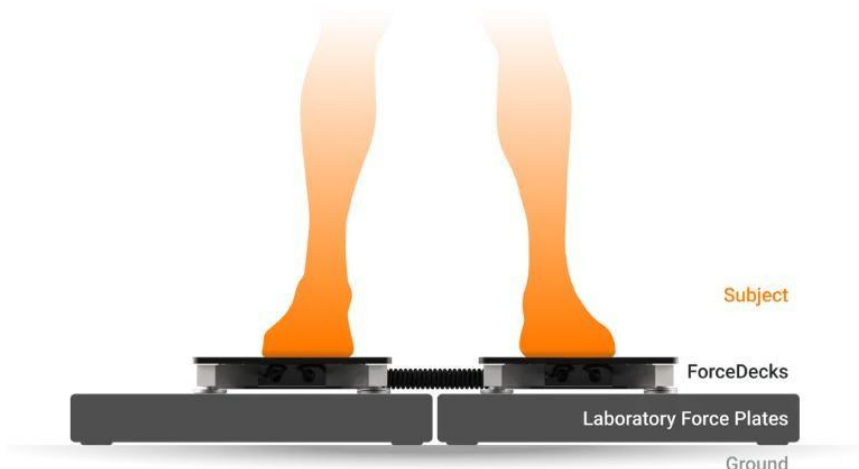


Fig 24. Plataforma de fuerza ForceDecks (VALD Performance, 2025).

Se efectuaron dos fases experimentales. En la Fase 1 se obtuvieron 16 saltos de un único jugador con el algoritmo inicial del Monitor de Saltos. Tras analizar los resultados, se ajustaron los umbrales de detección de inicio y fin del salto en el firmware; luego, en la Fase 2 se registraron 30 saltos con tres jugadores.

Las métricas que se utilizaron para este análisis fueron:

- Error absoluto (EA):

$$EA_i = |Monitor_i - ForceDecks_i| \quad 2$$

- Error relativo porcentual (ER%):

$$ER_i = \frac{|Monitor_i - ForceDecks_i|}{ForceDecks_i} * 100 \quad 3$$

- Porcentaje error promedio (PE):

$$PE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ER_i \quad 4$$

- Porcentaje de exactitud (PA):

$$PA = 100 - PE \quad 5$$

- Error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Monitor_i - ForceDecks_i)^2} \quad 6$$

- Coeficiente de correlación de Pearson (r):

$$r = \frac{Cov(Monitor, ForceDecks)}{\sigma_{Monitor} * \sigma_{ForceDecks}} \quad 7$$

A continuación, en la Tabla 1, se detallan los 16 saltos de la fase 1, con los resultados obtenidos para sus respectivos errores absolutos y errores relativos.

Tabla 1. Saltos fase 1

Salto	ForceDecks (cm)	Monitor (cm)	ErrorAbs (cm)	ErrorRel (%)
1	28.60	27.34	1.26	4.41
2	22.90	27.50	4.60	20.09
3	34.10	34.44	0.34	0.99
4	28.60	26.79	1.81	6.34
5	27.00	27.15	0.15	0.56
6	20.80	22.68	1.88	9.04
7	31.30	28.50	2.80	8.95
8	19.00	22.16	3.16	16.63
9	30.60	27.20	3.40	11.11
10	26.40	26.56	0.16	0.62
11	27.00	25.35	1.65	6.11
12	27.00	27.94	0.94	3.47
13	29.90	25.31	4.59	15.34
14	18.50	28.77	10.27	55.54
15	31.30	32.50	1.20	3.83
16	20.90	27.43	6.53	31.22

En la Fase 1 se obtuvo un porcentaje de error promedio de 12,14 %, una exactitud de 87,86 %, un error cuadrático medio de 3,82 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,59. A continuación se observa en la Figura 24 una comparativa de las mediciones de las alturas de los saltos obtenidas con el monitor de saltos desarrollado en este proyecto versus los marcados por la plataforma de fuerza Vald ForceDecks.

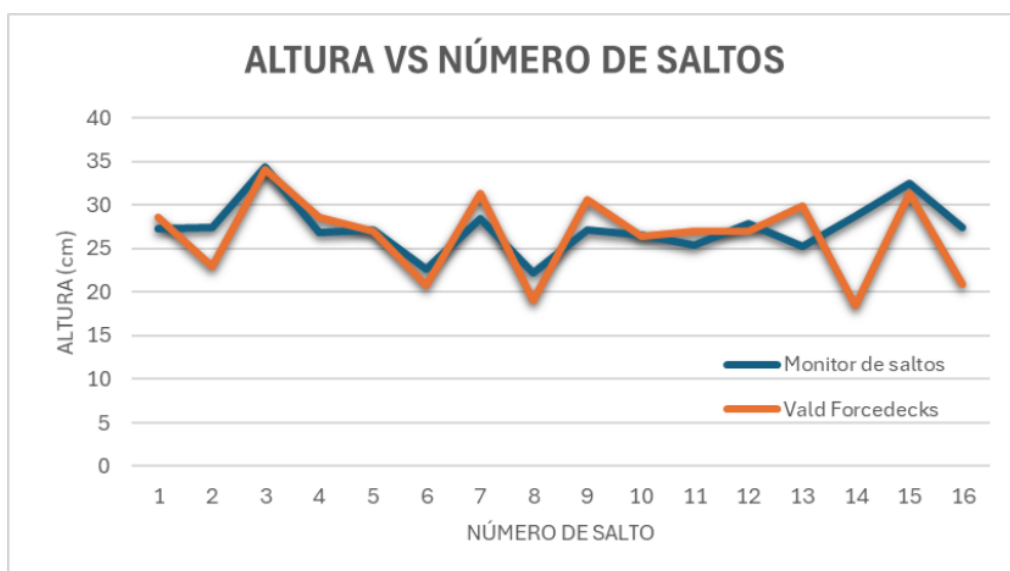


Fig 25. Altura vs número de saltos fase 1

Posterior a esto, se recolectaron los saltos de la fase 2, la cual fue dividida en 10 saltos para 3 jugadores distintos (Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4) obteniendo sus respectivos errores absolutos y errores relativos.

Tabla 2. Saltos fase 2 jugador 1

Salto	ForceDecks (cm)	Monitor (cm)	ErrorAbs (cm)	ErrorRel (%)
1	45.00	45.03	0.03	0.07
2	43.70	42.37	1.33	3.04
3	42.30	44.53	2.23	5.27
4	33.50	36.02	2.52	7.52
5	43.50	43.27	0.23	0.53
6	43.70	40.25	3.45	7.89
7	35.50	33.77	1.73	4.87
8	43.50	40.25	3.25	7.47
9	44.70	43.27	1.43	3.20
10	44.10	43.27	0.83	1.88

En el caso del jugador 1 se registró un porcentaje de error promedio de 4,18 %, una exactitud de 95,82 %, un error cuadrático medio de 2,03 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,87 y se desarrolló la respectiva comparativa en la Figura 25.

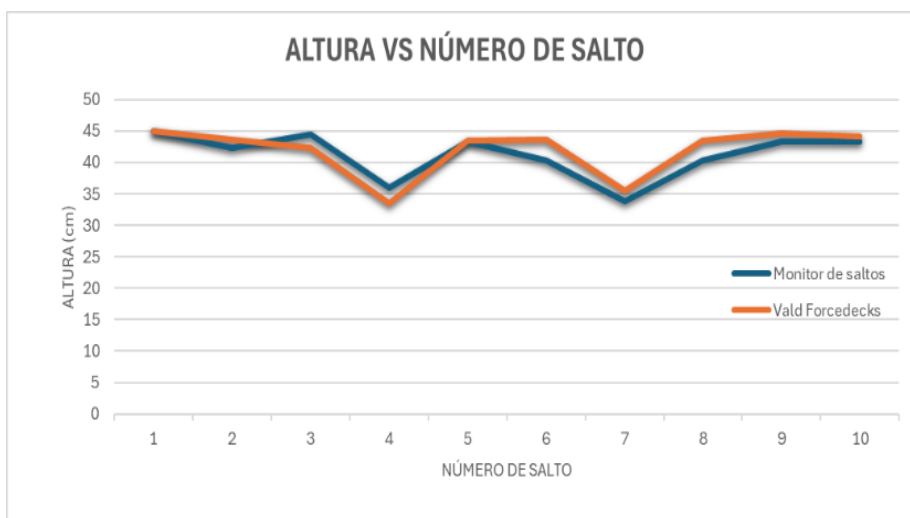


Fig 26. Altura vs número de saltos fase 2 jugador 1

La siguiente tabla (Tabla 3) muestra los resultados obtenidos para el jugador 2 en la fase 2.

Tabla 3. Saltos fase 2 jugador 2

Salto	ForceDecks (cm)	Monitor (cm)	ErrorAbs (cm)	ErrorRel (%)
1	39.60	38.05	1.55	3.91
2	36.90	38.99	2.09	5.66
3	44.50	46.15	1.65	3.71
4	47.80	49.66	1.86	3.89
5	50.10	47.14	2.96	5.91
6	50.10	53.04	2.94	5.87
7	44.90	44.21	0.69	1.54
8	51.20	54.35	3.15	6.15
9	44.20	40.84	3.36	7.60
10	43.90	45.48	1.58	3.60

Para el jugador 2 se obtuvo un error medio porcentual de 4,78 %, una precisión del 95,22 %, una desviación cuadrática media de 2,34 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,90, presentándose la correspondiente comparación en la Figura 26.

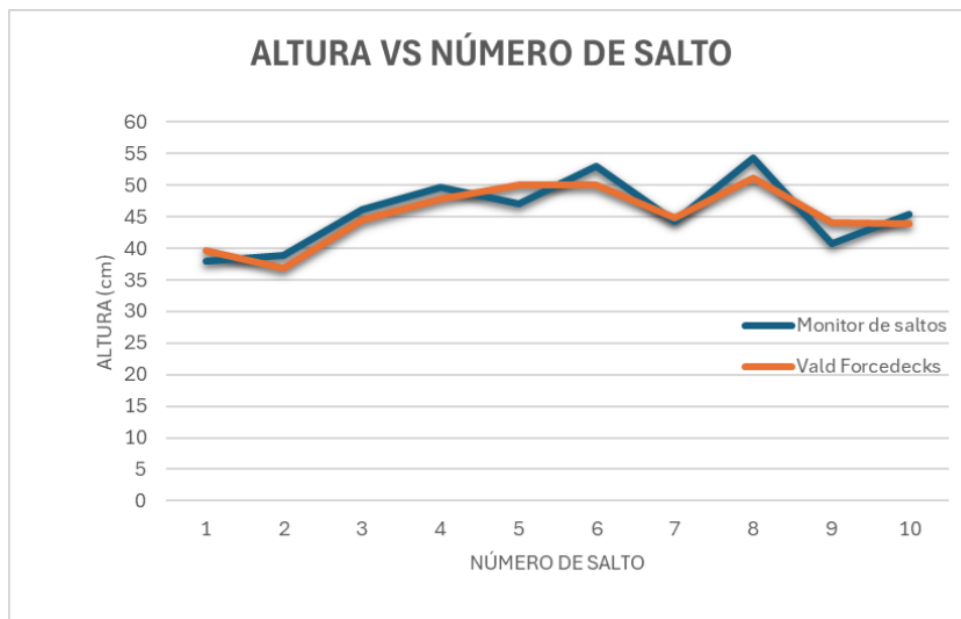


Fig 27. Altura vs número de saltos fase 2 jugador 2

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos para el jugador 3 en la fase 2.

Tabla 4. Saltos fase 2 jugador 3

Salto	ForceDecks (cm)	Monitor (cm)	ErrorAbs (cm)	ErrorRel (%)
1	41.70	38.83	2.87	6.88
2	46.20	44.46	1.74	3.77
3	37.90	36.63	1.27	3.35
4	44.50	45.68	1.18	2.65
5	39.60	39.47	0.13	0.33
6	43.80	41.94	1.86	4.25
7	49.20	46.31	2.89	5.87
8	44.50	40.95	3.55	7.98
9	42.30	39.20	3.10	7.33
10	38.80	38.21	0.59	1.52

Para el jugador 3 se obtuvo un error porcentual promedio de 4,39 %, una precisión del 95,61 %, una desviación cuadrática media de 2,21 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,90, elaborándose la respectiva comparación en la Figura 27.

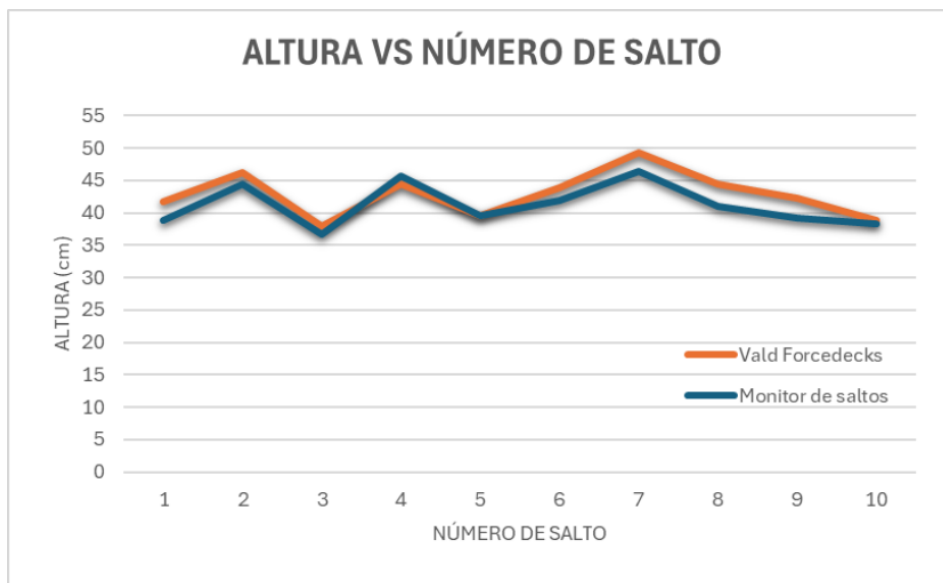


Fig 28. Altura vs número de saltos fase 2 jugador 3

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la comparativa de los valores del porcentaje de error, porcentaje de exactitud, coeficiente de correlación y error cuadrático medio para las fases 1 y 2.

Tabla 5. Comparativa fase 1 versus fase 2

Escenario	PE (%)	PA (%)	RMSE (cm)	r
Fase 1 · 1 jugador (16 saltos)	12.14	87.86	3.82	0.59
Fase 2 · 3 jugadores (30 saltos)	4.45	95.55	2.19	0.89

En la Fase 1 se obtuvieron un porcentaje de error promedio de 12,14 %, una exactitud de 87,86 %, un error cuadrático medio de 3,82 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,59.

En la Fase 2 se registraron resultados para tres jugadores. En el Jugador 1 se obtuvo un porcentaje de error promedio de 4,18 %, una exactitud de 95,82 %, un error cuadrático medio de 2,03 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,87. En el Jugador 2 se alcanzó un porcentaje de error promedio de 4,78 %, una exactitud de 95,22 %, un error cuadrático medio de 2,34 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,90. En el Jugador 3 se registró un porcentaje de error promedio de 4,39 %, una exactitud de 95,61 %, un error cuadrático medio de 2,21 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,90.

De forma global en la Fase 2, considerando los tres jugadores, los resultados muestran un porcentaje de error promedio de 4,45 %, una exactitud de 95,55 %, un error cuadrático medio de 2,19 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,89.

Además de las mediciones controladas realizadas en fases previas para validar el Monitor de Saltos, se efectuó una prueba en condiciones de juego real. Para ello se recolectaron los datos correspondientes a un set de voleibol con una duración aproximada de quince minutos. Durante este tiempo, el dispositivo registró cada uno de los saltos efectuados por el jugador en las distintas posiciones que ocupó según el sistema de rotación propio del voleibol, donde las posiciones delanteras concentran la mayoría de los saltos mientras que en las posiciones traseras la frecuencia de saltos es significativamente menor.

En el set analizado se obtuvo una frecuencia promedio de 4,33 saltos por minuto y una altura máxima registrada de 57,18 cm, correspondiente a un salto realizado en una acción ofensiva en zona delantera.

En la Figura 28 se muestra la evolución de la altura de los saltos en función del número de salto, donde se aprecia la variación natural en la ejecución con saltos de menor altura asociados a acciones de cobertura o desplazamiento y saltos de mayor altura vinculados a situaciones ofensivas.

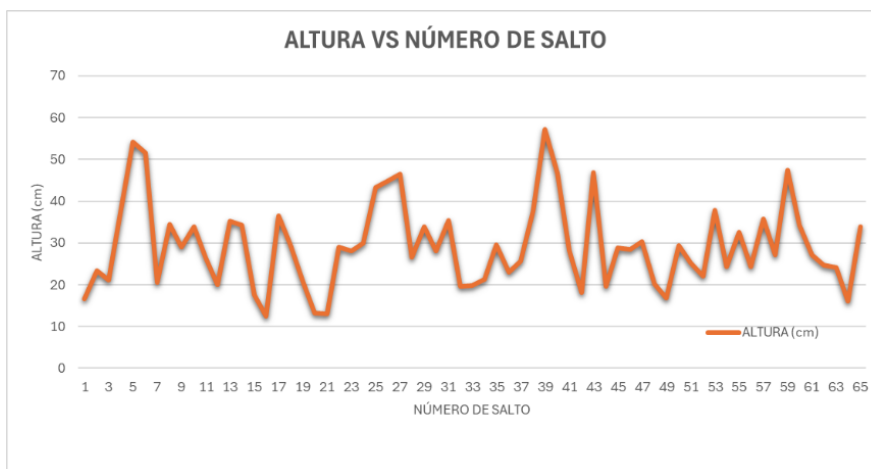


Fig 29. Altura versus número de salto

CAPÍTULO 5. ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS DE COSTOS

La estimación de costos del presente proyecto se realizó considerando dos rubros principales: materiales y mano de obra. Esta metodología permite diferenciar entre los recursos físicos utilizados en la construcción del dispositivo y el esfuerzo humano requerido para el desarrollo integral del mismo. Para la valoración de la mano de obra se utilizó como referencia el salario mínimo mensual para un bachiller universitario en Costa Rica, establecido por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (MTSS, 2025).

5.1 Costos de materiales

En la Tabla 6 se presentan los materiales necesarios para la construcción del dispositivo. Se incluyen los elementos electrónicos principales, los componentes mecánicos y algunos insumos y herramientas utilizados en el proceso. Este rubro corresponde a aquellos costos directamente replicables en caso de que se produzca un nuevo ejemplar del dispositivo.

Tabla 6. Costos de materiales

Ítem	Cantidad	Precio unitario (₡)	Subtotal (₡)
ESP32 WROOM DevKit	1	5,000.00	5,000.00
MPU6050 (giroscopio/acelerómetro)	1	2,500.00	2,500.00
Módulo de carga TP4056	1	2,275.00	2,275.00
Batería de litio	1	8,000.00	8,000.00
Interruptor (switch)	1	400.00	400.00
Bloque terminal para Batería	1	250.00	250.00
Estaño para soldar	1	1,500.00	1,500.00
Adaptador de corriente	1	3,000.00	3,000.00
Cable USB A a USB C	1	2,950.00	2,950.00
Banda elástica	1	800.00	800.00
Broches y ajustes para la banda	1	300.00	300.00
Impresión 3D (LAIMI)	1	1,600.00	1,600.00
Impresión de PCB	1	8,000.00	8,000.00
Cautín	1	5,500.00	5,500.00

La Tabla anterior presenta un desglose de los componentes y materiales utilizados en el proyecto, cada uno acompañado por la cantidad requerida, su precio unitario y el subtotal correspondiente.

Se incluyen elementos electrónicos principales como el ESP32 WROOM DevKit y el MPU6050 (giroscopio/acelerómetro), junto con el módulo de carga TP4056, la batería

de litio, un interruptor (switch) y un bloque terminal para batería, que conforman la parte fundamental del sistema electrónico.

También se detallan materiales de soporte para el ensamblaje y la conexión, como el estaño para soldar, el adaptador de corriente, el cable USB A a USB C, además de accesorios mecánicos como la banda elástica y los broches y ajustes para la banda.

Se contemplan procesos externos de fabricación como la impresión 3D en LAIMI y la impresión de PCB, ambos con costos propios. Finalmente, se incluye la herramienta de trabajo, el caudín, dentro de los insumos necesarios.

5.2 Costos de mano de obra

La estimación de la mano de obra, reflejada en la Tabla 7 se fundamenta en la tarifa por hora correspondiente al salario mínimo mensual para un bachiller universitario, que asciende a ₡653 427,21 (MTSS, 2025). Considerando una jornada ordinaria de 48 horas semanales, equivalente a 208 horas mensuales, la tarifa por hora corresponde a ₡3 141,48. En este proyecto se estimó una dedicación total de 320 horas, distribuidas de la siguiente manera:

- Desarrollo de la aplicación Android para la recepción y almacenamiento de datos.
- Programación del firmware del ESP32, encargado de procesar y enviar la información.
- Diseño esquemático y de la PCB mediante software de diseño electrónico.
Pruebas, calibraciones y validación de los resultados obtenidos en campo.
- Diseño 3D de la carcasa del dispositivo.

- Documentación y desarrollo del manual de usuario.

Tabla 7. Costos de mano de obra

Concepto	Monto (C\$)
Tarifa por hora	3 141,48
Horas trabajadas	320
Subtotal mano de obra	1 005 274

5.3 Análisis de replicabilidad de costos

Es importante destacar que gran parte de las horas invertidas en el desarrollo de este proyecto corresponden a tareas de diseño y programación, que son actividades no replicables si se desea producir nuevas unidades del dispositivo. Esto significa que los costos de mano de obra presentados reflejan el esfuerzo de desarrollo inicial, pero no son representativos del costo de producción en serie.

En un escenario de replicación, el costo de cada dispositivo adicional se reduciría drásticamente, quedando prácticamente limitado al costo de materiales (C\$41 275) y a un número reducido de horas de ensamble y pruebas. Esto convierte al proyecto en una propuesta viable y escalable, especialmente si se considera la fabricación en mayor volumen.

5.4 Resumen total de costos

Para complementar el análisis de los componentes y materiales utilizados, en la Tabla 8 se presenta a continuación el resumen global de los costos asociados al desarrollo del dispositivo. En este apartado se consideran tanto los insumos físicos empleados como la estimación de la mano de obra involucrada en las diferentes etapas del proyecto. La siguiente tabla sintetiza estos valores, permitiendo visualizar de manera clara la distribución del gasto total.

Tabla 8. Resumen total de costos

Concepto	Monto (C\$)
Subtotal de Materiales	41 275
Subtotal de mano de obra	1 005 274
Costo total	1 046 549

De esta forma el costo total del proyecto asciende a C\$1 046 549, siendo la mano de obra el rubro más significativo. No obstante, este valor refleja el esfuerzo de investigación, desarrollo y diseño realizado en el marco académico. El costo unitario de producción de futuras unidades sería considerablemente menor, lo que refuerza la viabilidad técnica y económica del dispositivo.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se cumplió el objetivo general de desarrollar un dispositivo portátil, de bajo costo y accesible, capaz de medir, registrar y visualizar en tiempo real la cantidad, frecuencia y altura de los saltos realizados por jugadores de voleibol del Tecnológico de Costa Rica. El sistema demostró un desempeño confiable en pruebas de validación frente al dispositivo de referencia ForceDecks, alcanzando una exactitud global superior al 95 %, lo que confirma su validez como herramienta práctica y aplicable en contextos universitarios.
- El dispositivo implementó exitosamente un sistema de medición basado en sensores inerciales (MPU6050) y procesamiento embebido en el microcontrolador ESP32, logrando estimar la altura de los saltos mediante el tiempo de vuelo, así como registrar la cantidad de saltos y la frecuencia con la que se realizan.
- La validación experimental evidenció que, tras la optimización de los umbrales de detección en el firmware, el dispositivo alcanzó un nivel de precisión comparable a sistemas comerciales de referencia, reduciendo significativamente el error cuadrático medio y aumentando la correlación con los datos obtenidos con la plataforma de fuerza ForceDecks.

6.2 Recomendaciones

- Mejoras técnicas: incorporar algoritmos de filtrado y aprendizaje automático que permitan una detección de saltos más robusta y la identificación de patrones de fatiga o riesgo de lesión.
- Escalabilidad: adaptar el sistema a otros deportes con alta demanda de saltos como el baloncesto o el atletismo, ampliando así su aplicabilidad en el TEC.
- Pruebas a gran escala: realizar validaciones con un mayor número de jugadores y en distintas condiciones de entrenamiento y competencia, con el fin de robustecer la evidencia de fiabilidad del dispositivo.

Bibliografía

- Borges, T. O. (2017). Validation of the VERT Wearable Jump Monitor device in elite youth volleyball players. *Biology Of Sport*. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29158616/>
- Charlton, P. C. (2017). A simple method for quantifying jump loads in volleyball athletes. *Journal Of Science and Medicine in Sport*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1440244016301414>
- Skazalski, C. S. (2017). A valid and reliable method to measure jump-specific training and competition load in elite volleyball players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29315832/>
- Lima, R. F. (2019). Measuring the training external jump load of elite male volleyball players: an exploratory study in Portuguese League. *Sports Biomechanics*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/333666493_Measuring_the_training_external_jump_load_of_elite_male_volleyball_players_an_exploratory_study_in_Portuguese_League
- Nielsen, E. T. (2019). Validation of an inertial measurement unit to determine countermovement jump height. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214687318300189>

MacDonald, K. (2017). Validation of an inertial measurement unit for the measurement of jump count and height. *Journal Of Australian Strength and Conditioning*.

Recuperado

de

<https://www.researchgate.net/publication/311502831> Validation of an inertial measurement unit for the measurement of jump count and height

De Leeuw, A. (2022). Modeling match performance in Elite Volleyball players: Importance of jump load and strength training characteristics. *Journal Of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*.

Recuperado de

<https://www.researchgate.net/publication/364410583> Modeling Match Performance in Elite Volleyball Players Importance of Jump Load and Strength Training Characteristics.

alldatasheet.com. (s. f.). MPU-6050 Datasheet, PDF. *Alldatasheet*.

Recuperado de https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mpu-6050&gadsourc=1&gclid=Cj0KCQiA0MG5BhD1ARIsAEcZtwRZAKO81dbDeVgvpJ4EhwydTygAgNBoBCO2ta047A6s0x5PC9Arr8aAiJ-EALw_wcB

Collings, T. J., Lima, Y. L., Dutailis, B., & Bourne, M. N. (2024). Concurrent validity and test–retest reliability of VALD ForceDecks' strength, balance, and movement assessment tests. *Journal of Science and Medicine in Sport*.

Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2024.04.014>

VALD Performance. (2025). ForceDecks. Recuperado de

<https://valdperformance.com/es/products/forcedecks>

NanJing Top Power ASIC Corp., TP4056 Lithium Battery Charger Datasheet, 2002.

Recuperado de <https://datasheetspdf.com/pdf/TP4056>

InvenSense Inc., MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification, Revision 3.4,

Recuperado de <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>

Espressif Systems (2020). ESP32-WROOM-32 Datasheet. Recuperado de

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf

MyVert. (2009). FAQ – What is the accuracy of a VERT Wearable Jump Monitor?

Recuperado de <https://www.myvert.com/faq>

Apéndices

Abreviaturas

- **TEC:** Instituto Tecnológico de Costa Rica
- **MTSS:** Ministerio de Trabajo y Seguridad Social
- **IMU:** *Inertial Measurement Unit* (Unidad de Medición Inercial)
- **PCB:** *Printed Circuit Board* (Placa de Circuito Impreso)
- **BLE:** *Bluetooth Low Energy* (Bluetooth de Bajo Consumo)
- **ESP32-WROOM-32:** Microcontrolador de la familia ESP32 de Espressif
- **I²C:** *Inter-Integrated Circuit* (Protocolo de comunicación entre circuitos integrados)
- **SPI:** *Serial Peripheral Interface* (Interfaz Serial Periférica)
- **UART:** *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (Receptor-Transmisor Asíncrono Universal)
- **ADC:** *Analog to Digital Converter* (Convertidor Analógico-Digital)
- **DAC:** *Digital to Analog Converter* (Convertidor Digital-Analógico)
- **GPIO:** *General Purpose Input / Output* (Entradas/Salidas de Propósito General)
- **PWM:** *Pulse Width Modulation* (Modulación por Ancho de Pulso)
- **FDM:** *Fused Deposition Modeling* (Modelado por Deposición Fundida, técnica de impresión 3D)
- **PLA:** *Polylactic Acid* (Ácido Poliláctico, material de impresión 3D)
- **UUID:** *Universally Unique Identifier* (Identificador Único Universal)
- **JSON:** *JavaScript Object Notation* (Formato de intercambio de datos ligero)

- **UI:** *User Interface* (Interfaz de Usuario)
- **DAO:** *Data Access Object* (Objeto de Acceso a Datos)
- **RMSE:** *Root Mean Square Error* (Error Cuadrático Medio)
- **PE:** Porcentaje de Error Promedio
- **PA:** Porcentaje de Exactitud
- **r:** Coeficiente de correlación de Pearson

Anglicismos

- **Firmware:** Microprograma embebido en el dispositivo que controla su funcionamiento.
- **Hardware:** Componentes físicos del sistema.
- **Software:** Programas y aplicaciones que controlan el sistema.
- **Benchmark / Validación experimental:** Prueba comparativa de rendimiento.
- **ForceDecks:** Nombre comercial de la plataforma de fuerza usada como referencia.
- **Room Database:** Base de datos ligera para Android.
- **Android Studio:** Entorno de desarrollo integrado para aplicaciones Android.
- **Kotlin:** Lenguaje de programación utilizado para la aplicación móvil.
- **SolidWorks:** Software de diseño CAD 3D.
- **Eagle CAD:** Software de diseño de circuitos impresos.
- **Google Drive:** Servicio de almacenamiento en la nube de Google

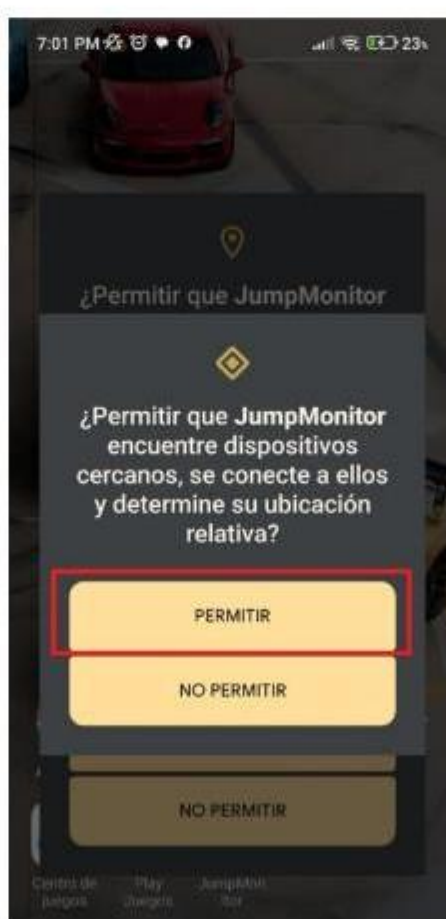
Manual de usuario

Manual de Usuario - Dispositivo de Monitoreo de Saltos

1. Primera conexión

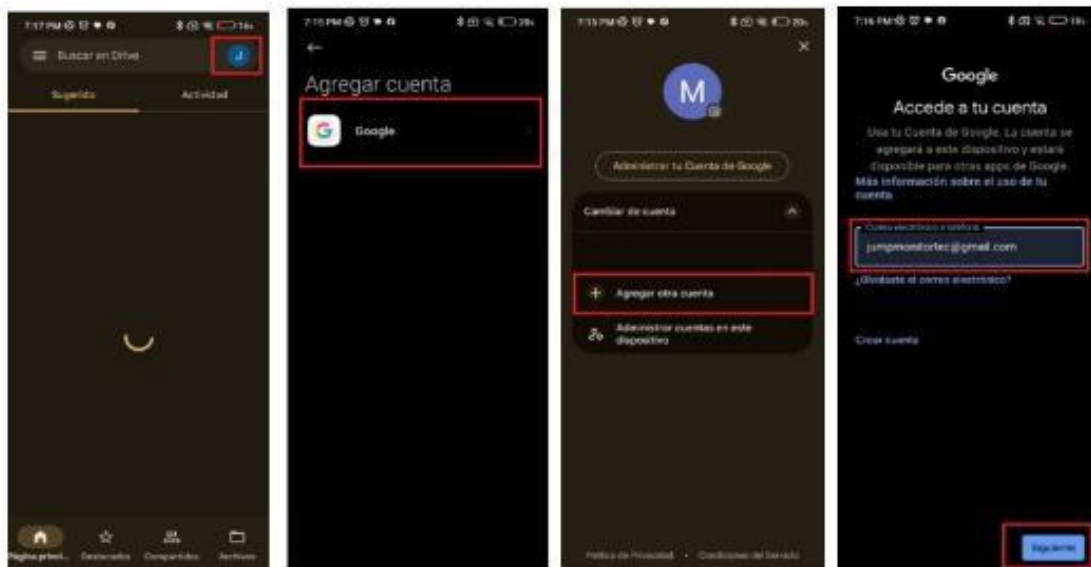
1.1 Otorgar permisos

Para el correcto funcionamiento de la aplicación, es necesario otorgar permisos de ubicación y Bluetooth al momento de su instalación en el dispositivo móvil.



1.2 Inicio de sesión en la cuenta de Google

Debe tener previamente instalada la aplicación de Google Drive. Para agregar la cuenta, diríjase a la esquina superior derecha donde se encuentra un círculo con las iniciales de la cuenta actual. Al seleccionarlo se desplegarán opciones, entre ellas la de agregar otra cuenta. Seleccione esta opción e ingrese las credenciales de acceso para iniciar sesión.



2. Uso del dispositivo

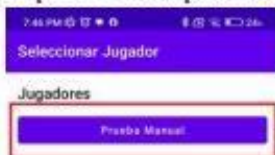
2.1 Crear usuarios

Con la aplicación abierta, rellene el recuadro en la parte inferior que dice 'Nombre Nuevo Jugador'. Posteriormente, seleccione el botón 'Crear jugador' que se habilita al ingresar un nombre.



2.2 Tener sesiones de entrenamiento

En la aplicación, seleccione el jugador previamente creado desde el menú en la parte superior de la pantalla.



En este punto puede encender el dispositivo ubicando el switch en la posición que cuenta con un punto blanco a su lado.

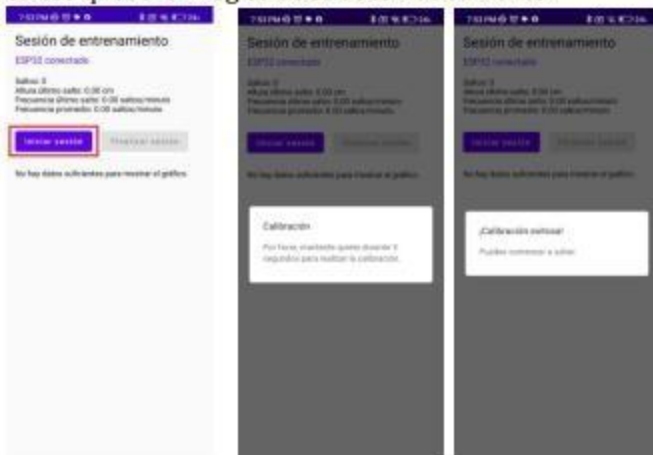


Una vez seleccionado el jugador, presione el botón 'Iniciar sesión de entrenamiento' en la aplicación. Se ingresará al menú de selección del dispositivo BLE, donde aparecerá como 'ESP32 JumpMonitor'. Al seleccionarlo se mostrará el mensaje 'Conectando...' y posteriormente 'Conectado' al finalizar la conexión.

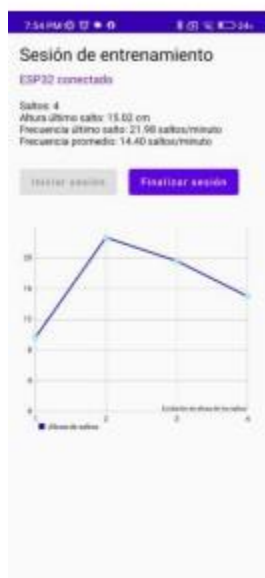


Coloque el dispositivo al atleta con el switch hacia arriba, ajustando la banda elástica en la cintura (parte trasera) con tensión suficiente para que no se desplace durante los movimientos.

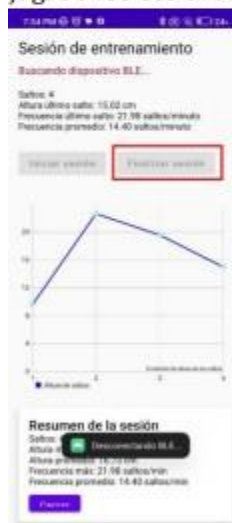
Una vez colocado, presione 'Iniciar sesión'. El atleta debe mantenerse quieto entre 3 y 5 segundos para que se realice la calibración automática. A partir de ese momento, todos los saltos quedarán registrados automáticamente.



Durante la sesión, la aplicación mostrará en tiempo real la altura de cada salto, el conteo total y la frecuencia de saltos.



Para finalizar, presione 'Finalizar sesión', lo cual guardará todos los datos en el historial del jugador seleccionado.



2.2.1 Colocar el dispositivo

1. Asegúrese de que el dispositivo esté encendido, con el switch en la posición indicada por el punto blanco.
2. Coloque la banda elástica alrededor de la cintura del atleta, de forma que el dispositivo quede centrado en la parte trasera (espalda).
3. Ajuste la banda con una tensión suficiente para que no se desplace con movimientos fuertes, pero sin incomodar al atleta.

4. Verifique que el interruptor quede hacia arriba, ya que esta es la posición correcta para la captura de datos.



2.3 Visualización de resultados

En la aplicación, seleccione el nombre del jugador del cual desea ver el historial y diríjase al botón 'Ver historial de sesiones'.



Se desplegará una lista con las sesiones de entrenamiento realizadas, ordenadas cronológicamente.



Seleccione la fecha y hora del registro que desea consultar.

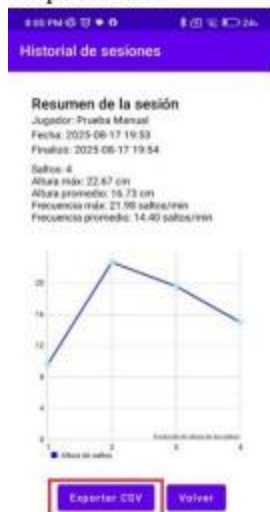
Al abrir la sesión, se mostrarán los datos registrados, incluyendo:

- Altura alcanzada en cada salto mediante un gráfico.
- Número total de saltos realizados.
- Altura máxima alcanzada.
- Altura promedio de los saltos.
- Frecuencia de salto promedio.



2.4 Exportar resultados

En la pantalla de historial, para un jugador y una sesión seleccionada, presione el botón 'Exportar CSV'.

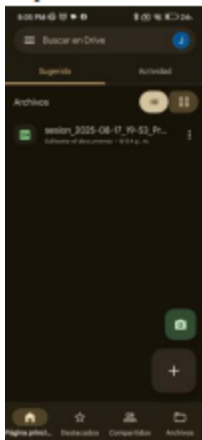


El sistema generará un archivo en formato CSV con todos los saltos registrados (altura, tiempo, promedios, máximos y frecuencia).

Al generarse el archivo, se abrirá automáticamente el selector de cuentas de Google. Desde ahí podrá elegir guardar el archivo en Google Drive de cualquiera de las cuentas disponibles en el dispositivo, siempre que la aplicación esté instalada.



Una vez seleccionada la ubicación, confirme la acción para completar el proceso de exportación.



Nota: Se recomienda organizar los archivos exportados en carpetas por jugador y fecha, para facilitar el análisis y comparación de sesiones.

3. Mantenimiento y cuidados del dispositivo

3.1 Carga de la batería

- Utilice únicamente el cable de carga USB incluido o uno certificado equivalente.
- Utilice únicamente el cargador de pared incluido o uno certificado equivalente. Cargue el dispositivo estando apagado, al iniciar la carga verá una luz roja en el interior, una vez finalizada la carga la luz cambiará a color azul.
- Evite dejar el dispositivo conectado por tiempos excesivamente largos una vez cargado.

3.2 Limpieza y cuidado físico

- Limpie el dispositivo con un paño suave y seco.
- No utilice alcohol, solventes ni agua directamente sobre el dispositivo.

3.3 Uso y almacenamiento

- No exponga el dispositivo a temperaturas extremas, humedad excesiva o luz solar directa por periodos prolongados.
- Guarde el dispositivo en un lugar seco y seguro cuando no se utilice.
- Apague el dispositivo con el switch lateral para conservar batería.

4. Resolución de problemas comunes

4.1 La aplicación móvil no encuentra el dispositivo

Si al intentar emparejar el dispositivo desde la aplicación este no aparece en la lista de dispositivos BLE, es posible que la batería esté descargada. Conéctelo al cargador de pared incluido y espere unos minutos antes de volver a intentar.

Verifique también que el switch lateral se encuentre en la posición de encendido (indicada con el punto blanco).

4.2 Mediciones poco reales

Si durante una sesión los valores de altura o frecuencia de los saltos parecen poco realistas, finalice la sesión desde la aplicación.

Inicie una nueva sesión repitiendo el proceso de calibración, asegurándose de que el deportista permanezca quieto entre 3 y 5 segundos.

5. Especificaciones técnicas del dispositivo

- Procesador principal: ESP32 Wroom, con conectividad Bluetooth Low Energy (BLE).
- Sensor inercial: MPU6050, giroscopio y acelerómetro triaxial (6 ejes en total).
- Batería: Litio recargable de 3.7 V, con autonomía aproximada de 6 a 8 horas de uso continuo.
- Método de carga: Puerto USB tipo C con cargador de pared incluido (5 V).
- Conectividad: Bluetooth Low Energy (BLE), identificable como ESP32 JumpMonitor.
- Interruptor: Switch lateral de encendido y apagado.
- Dimensiones: 5.8 cm x 6.4 cm x 2.4 cm (sin banda elástica).
- Banda elástica: Ajustable y diseñada para colocarse en la zona lumbar del atleta.
- Compatibilidad de la aplicación móvil: Android 9.0 o superior, con Google Drive previamente instalado para exportar resultados.

6. Seguridad y advertencias

- No utilizar el dispositivo durante lesiones.
- No sumergir en agua.
- Evitar caídas y golpes.
- Uso exclusivo deportivo, no médico.
- Supervisión en caso de menores de edad.
- Utilizar únicamente cargadores certificados.
- Mantener en un rango de temperatura ambiente entre 10 °C y 35 °C.

Consentimientos Informados

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Yo, Marco Alfaro Bolaños, declaro que he sido informado(a) acerca de la naturaleza y propósito del proyecto "**Desarrollo de un Dispositivo Portátil de Monitoreo de Saltos en Voleibol para la Optimización de Entrenamientos en el equipo de Voleibol del Tecnológico de Costa Rica**", que se realiza como parte del Trabajo Final de Graduación en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Se me ha explicado que: - No se recopilará ni registrará ningún dato personal identificable, como nombre, género, edad, apariencia física u otra información que permita identificarme. - Únicamente se registrarán y utilizarán los resultados de las mediciones obtenidas durante las pruebas (por ejemplo: altura de salto, número de saltos, tiempo de vuelo y frecuencia de salto), con fines exclusivamente académicos y de investigación. - La información recolectada será tratada de forma anónima y utilizada únicamente para el análisis y desarrollo del proyecto, sin fines comerciales. Declaro que participo de forma voluntaria en esta actividad y que, si así lo deseo, puedo retirarme en cualquier momento. El investigador agradece profundamente mi colaboración y el tiempo brindado para el desarrollo de este proyecto. En constancia, firmo el presente documento: Firma del participante: Marco Alfaro Bolaños Fecha: 12 / 08 / 2025
Firma del investigador: Marco Alfaro Bolaños Fecha: 12 / 08 / 2025

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Yo, Luis Eduardo Solano Céspedes, declaro que he sido informado(a) acerca de la naturaleza y propósito del proyecto "**Desarrollo de un Dispositivo Portátil de Monitoreo de Saltos en Voleibol para la Optimización de Entrenamientos en el equipo de Voleibol del Tecnológico de Costa Rica**", que se realiza como parte del Trabajo Final de Graduación en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Se me ha explicado que: - No se recopilará ni registrará ningún dato personal identificable, como nombre, género, edad, apariencia física u otra información que permita identificarme. - Únicamente se registrarán y utilizarán los resultados de las mediciones obtenidas durante las pruebas (por ejemplo: altura de salto, número de saltos, tiempo de vuelo y frecuencia de salto), con fines exclusivamente académicos y de investigación. - La información recolectada será tratada de forma anónima y utilizada únicamente para el análisis y desarrollo del proyecto, sin fines comerciales. Declaro que participo de forma voluntaria en esta actividad y que, si así lo deseo, puedo retirarme en cualquier momento. El investigador agradece profundamente mi colaboración y el tiempo brindado para el desarrollo de este proyecto. En constancia, firmo el presente documento: Firma del participante: _____ Fecha: 07 / 08 / 25
Firma del investigador: Marco Fecha: 07 / 08 / 25

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Yo, Djebrielle Alexander, declaro que he sido informado(a) acerca de la naturaleza y propósito del proyecto "**Desarrollo de un Dispositivo Portátil de Monitoreo de Saltos en Voleibol para la Optimización de Entrenamientos en el equipo de Voleibol del Tecnológico de Costa Rica**", que se realiza como parte del Trabajo Final de Graduación en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Se me ha explicado que: - No se recopilará ni registrará ningún dato personal identificable, como nombre, género, edad, apariencia física u otra información que permita identificarme. - Únicamente se registrarán y utilizarán los resultados de las mediciones obtenidas durante las pruebas (por ejemplo: altura de salto, número de saltos, tiempo de vuelo y frecuencia de salto), con fines exclusivamente académicos y de investigación. - La información recolectada será tratada de forma anónima y utilizada únicamente para el análisis y desarrollo del proyecto, sin fines comerciales. Declaro que participo de forma voluntaria en esta actividad y que, si así lo deseo, puedo retirarme en cualquier momento. El investigador agradece profundamente mi colaboración y el tiempo brindado para el desarrollo de este proyecto. En constancia, firmo el presente documento: Firma del participante: _____ Fecha: 07 / 08 / 25
Firma del investigador: Marco _____ Fecha: 07 / 08 / 2025

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Yo, JARIBO SOLANO LÓPEZ, declaro que he sido informado(a) acerca de la naturaleza y propósito del proyecto "**Desarrollo de un Dispositivo Portátil de Monitoreo de Saltos en Voleibol para la Optimización de Entrenamientos en el equipo de Voleibol del Tecnológico de Costa Rica**", que se realiza como parte del Trabajo Final de Graduación en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Se me ha explicado que: - No se recopilará ni registrará ningún dato personal identificable, como nombre, género, edad, apariencia física u otra información que permita identificarme. - Únicamente se registrarán y utilizarán los resultados de las mediciones obtenidas durante las pruebas (por ejemplo: altura de salto, número de saltos, tiempo de vuelo y frecuencia de salto), con fines exclusivamente académicos y de investigación. - La información recolectada será tratada de forma anónima y utilizada únicamente para el análisis y desarrollo del proyecto, sin fines comerciales. Declaro que participo de forma voluntaria en esta actividad y que, si así lo deseo, puedo retirarme en cualquier momento. El investigador agradece profundamente mi colaboración y el tiempo brindado para el desarrollo de este proyecto. En constancia, firmo el presente documento: Firma del participante: _____ Fecha: 12 / 08 / 2025

Firma del investigador: Marcos _____ Fecha: 12 / 08 / 2025