Prototipo multiparamétrico para prevención y seguimiento de rodilla en jugadores de football flag.

Multiparametric prototype for knee prevention and monitoring in flag football players.

Iván Octavio Hernández Gómez* (1).
Estudiante Universidad Politecnica de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez.
223066@ib.upchiapas.edu.mx.

Dekker Díaz Margarita Belén (2). Estudiante Universidad Politecnica de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez,
231043@ib.upchiapas.edu.mx.

José Euardo Ordaz de la Cruz (3). Estudiante Universidad Politecnica de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez,
223066@ib.upchiapas.edu.mx.

Arturo Pinto Orozco (4). Universidad Politécnica de Chiapas, apinto@ib.upchiapas.edu.mx.

Gerardo Velázquez Hernández (5). Universidad Politécnica de Chiapas, gvelazquez@ib.upchiapas.edu.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 07, 2025; aceptado en octubre 17, 2025.

Resumen.

La ingeniería biomédica juega un papel crucial en el desarrollo de tecnologías para la prevención y tratamiento de lesiones (Bishop, 2008) musculoesqueléticas en atletas. Este proyecto propone el diseño y desarrollo de un dispositivo portátil para el análisis preventivo y seguimiento de lesiones (Bishop, 2008) en la articulación de la rodilla (Winter, 2009) en atletas de Flag Football. El dispositivo integrará tres tecnologías biomédicas clave: espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS (Beltrán Carrillo, 2020)) para evaluar la oxigenación muscular y el flujo sanguíneo, electromiografía (EMG (De Luca, 2002; Rodríguez Torres et al., 2018)) superficial para analizar la activación neuromuscular y la fatiga muscular, y medición del rango de movimiento (ROM (Roldán Jiménez, 2017)) para detectar alteraciones en la movilidad articular. La combinación de estos parámetros permitirá un análisis integral en tiempo real, facilitando la identificación de factores de riesgo y optimizando la recuperación tras una lesión. La información recolectada será transmitida a un dispositivo móvil para su interpretación por parte de entrenadores y profesionales de la salud. Este desarrollo representa una innovación en la medicina deportiva y la ingeniería biomédica, con el potencial de reducir la incidencia de lesiones (Bishop, 2008) y mejorar la rehabilitación de los atletas.

Palabras claves: Biomédica, EMG, flag football, NIRS, rodilla.

Abstract.

This project proposes the design and development of a portable device for the preventive analysis and monitoring of knee joint injuries in Flag Football athletes. Biomedical engineering plays a crucial role in the development of technologies for the prevention and treatment of musculoskeletal injuries in athletes. The device will integrate three key biomedical technologies: near-infrared spectroscopy (NIRS) to assess muscle oxygenation and blood flow,

superficial electromyography (EMG) to analyze neuromuscular activation and muscle fatigue, and range of motion (ROM) measurement to detect alterations in joint mobility. The combination of these parameters will allow for a comprehensive analysis in real time, facilitating the identification of risk factors and optimizing recovery after an injury. The information collected will be transmitted to a mobile device for interpretation by coaches and coaches.

Keywords: Biomedical, EMG, flag football, knee, NIRS.

1. Introducción.

La ingeniería biomédica es una disciplina que combina principios de ingeniería y ciencias de la salud para diseñar soluciones tecnológicas que mejoren la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades o lesiones. En el campo deportivo, esta disciplina es crucial para prevenir y tratar lesiones musculoesqueléticas en atletas, así como para optimizar su rendimiento.

Uno de los problemas más frecuentes en atletas, especialmente en deportes como el Flag Football, son las lesiones en la articulación de la rodilla. La rodilla es una articulación compleja y vulnerable, sometida a intensas fuerzas y movimientos repetitivos que pueden causar daños en los ligamentos (como el cruzado anterior), desgaste de los meniscos, tendinitis o esguinces.

Para abordar esta problemática, el dispositivo propuesto tiene como objetivo monitorear parámetros clave de la función muscular y articular mediante tres técnicas biomédicas principales:

Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIRS).

La Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIRS, por sus siglas en inglés Near Infrared Spectroscopy) es una técnica óptica no invasiva utilizada para evaluar de manera continua y en tiempo real la oxigenación muscular y el flujo sanguíneo local en los tejidos. Su principio de funcionamiento se basa en la capacidad que tienen ciertos compuestos biológicos —principalmente la hemoglobina oxigenada (HbO_2) y la hemoglobina desoxigenada (HHb)— de absorber luz en la región del infrarrojo cercano (generalmente entre 700 y 900 nm). Al emitir luz de estas longitudes de onda hacia el tejido y analizar la cantidad de luz absorbida y reflejada, es posible determinar el nivel de oxigenación del músculo.

Esta tecnología permite monitorear cambios fisiológicos de manera inmediata, sin necesidad de procedimientos invasivos, lo que la convierte en una herramienta ideal para su aplicación en entornos deportivos y clínicos. En contextos de ejercicio, una disminución significativa en la oxigenación muscular puede indicar fatiga o hipoxia localizada, factores que aumentan la probabilidad de sufrir lesiones. Por esta razón, integrar NIRS en un dispositivo portátil orientado a atletas ofrece la posibilidad de establecer sistemas de alerta temprana, detectando alteraciones antes de que ocurran daños estructurales en músculos o articulaciones.
Electromiografía (EMG) Superficial

La Electromiografía (EMG) superficial es una técnica que permite registrar y analizar la actividad eléctrica generada por los músculos durante la contracción. A diferencia de la EMG intramuscular, que utiliza agujas o electrodos invasivos, la EMG superficial se basa en electrodos adheridos a la piel, lo que facilita su uso en entornos deportivos, clínicos y de investigación sin generar molestias al usuario. Esta señal eléctrica representa la suma de los potenciales de acción de múltiples fibras musculares, lo que brinda información detallada sobre la activación neuromuscular, el reclutamiento de unidades motoras, la intensidad de la contracción y la presencia de fatiga muscular.

El funcionamiento de la EMG superficial inicia con la detección de las señales bioeléctricas que se generan cuando el sistema nervioso central envía impulsos para activar los músculos. Estas señales son amplificadas, filtradas y digitalizadas para su análisis en tiempo real. La presencia de patrones atípicos, como una disminución en la amplitud o cambios en la frecuencia de la señal, pueden ser indicadores de sobrecarga muscular o desequilibrios funcionales.

En el contexto de este proyecto, esta técnica representa un componente esencial para identificar condiciones que puedan derivar en lesiones de rodilla en atletas, al ofrecer datos objetivos sobre el estado muscular durante entrenamientos o competencias.

Medición del Rango de Movimiento (ROM)

El Rango de Movimiento (ROM, por sus siglas en inglés Range of Motion) se refiere a la amplitud máxima de movimiento que puede realizar una articulación en cada uno de sus planos. Evaluar el ROM es fundamental para determinar el estado funcional de una articulación y detectar limitaciones, restricciones, hipermovilidades o asimetrías que puedan predisponer a lesiones musculoesqueléticas. Un ROM adecuado permite que las articulaciones trabajen de forma eficiente, mientras que una movilidad reducida o excesiva puede comprometer la estabilidad y aumentar el riesgo de daño durante la actividad física.

La medición del ROM puede realizarse mediante diferentes métodos. Tradicionalmente se utiliza la goniometría manual, pero con el desarrollo tecnológico han surgido alternativas más precisas y portátiles, como los sensores inerciales (IMU), acelerómetros y giroscopios, que permiten obtener datos angulares en tiempo real. Estos sensores registran los movimientos de la extremidad y los traducen en ángulos articulares, proporcionando un análisis dinámico y continuo. En este proyecto, la integración de la medición del ROM tiene como objetivo identificar alteraciones en la movilidad de la rodilla que puedan estar relacionadas con desequilibrios musculares o con un riesgo elevado de lesión, complementando así la información obtenida por NIRS y EMG superficial.

La combinación de NIRS, EMG y ROM permitirá un análisis integral y en tiempo real de la rodilla, con datos objetivos para la prevención y el tratamiento de lesiones. Este proyecto busca desarrollar un dispositivo portátil y accesible que optimice el rendimiento deportivo y mejore los protocolos de rehabilitación en atletas de Flag Football.

2. Métodos.

El proyecto sigue un enfoque clínico y de seguimiento con una fase de desarrollo tecnológico.Diseño del Estudio El dispositivo será diseñado y evaluado para el análisis preventivo y seguimiento de lesiones (Bishop, 2008) de rodilla (Winter, 2009) en atletas de flag football.

Población y Muestra.

La población objetivo de este estudio está conformada por atletas de flag football pertenecientes a categorías amateur y semiprofesional. Se seleccionó este grupo debido a que este deporte implica movimientos explosivos, cambios de dirección frecuentes y un alto grado de exigencia física, lo que incrementa significativamente el riesgo de sufrir lesiones (Bishop, 2008) en la articulación de la rodilla (Winter, 2009). Además, al ser una disciplina ampliamente practicada en el ámbito universitario, representa un escenario ideal para aplicar y validar tecnologías biomédicas portátiles orientadas a la prevención de lesiones (Bishop, 2008). Esta población permitirá observar el comportamiento muscular y articular en condiciones reales de entrenamiento y competencia.

En cuanto a los criterios de inclusión, se considerarán únicamente jugadores activos que participen regularmente en entrenamientos y torneos, y que presenten antecedentes de lesiones (Bishop, 2008) en rodilla (Winter, 2009) o que, por sus características físicas y patrón de juego, se identifiquen como población en riesgo. Este enfoque permitirá trabajar con sujetos que puedan beneficiarse directamente del dispositivo propuesto, asegurando que la información recopilada tenga relevancia clínica y deportiva para la validación del sistema híbrido NIRS (Beltrán Carrillo, 2020)–EMG (De Luca, 2002; Rodríguez Torres et al., 2018)–ROM (Roldán Jiménez, 2017).

Por otro lado, los criterios de exclusión contemplan la no participación de personas con cirugías recientes (en un periodo menor a seis meses) y de aquellos que presenten lesiones (Bishop, 2008) severas que impidan realizar pruebas físicas o que puedan comprometer su seguridad durante la evaluación. Esta delimitación busca garantizar que los

sujetos seleccionados puedan completar las mediciones y actividades sin agravar una condición preexistente, además de asegurar la integridad de los datos obtenidos.

Finalmente, la selección de la muestra se llevará a cabo mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, lo que implica que los participantes serán elegidos en función de su disponibilidad y accesibilidad dentro de los equipos universitarios y ligas locales. Este método es apropiado para estudios exploratorios y de validación de prototipos, ya que permite trabajar con una población representativa de las condiciones reales en las que se espera aplicar el dispositivo. Además, facilita la implementación práctica del estudio sin requerir procedimientos complejos de aleatorización, priorizando la calidad de los datos obtenidos sobre el tamaño muestral.

3. Desarrollo.

El desarrollo del presente proyecto se estructuró en diversas fases metodológicas que permitieron avanzar de manera ordenada y fundamentada desde la concepción de la idea hasta la validación inicial del prototipo. Cada etapa tuvo un propósito específico y se basó en principios de diseño biomédico, asegurando la integración de tecnologías confiables y adecuadas para la aplicación en entornos deportivos universitarios.

La primera etapa correspondió a la revisión bibliográfica, en la cual se investigaron dispositivos biomédicos existentes, protocolos clínicos y deportivos utilizados para la evaluación de la articulación de la rodilla (Winter, 2009), así como las tecnologías aplicables para el monitoreo no invasivo de parámetros musculares y articulares. Esta fase fue esencial para identificar las limitaciones de los dispositivos comerciales —principalmente su alto costo y complejidad—, además de comprender las bases fisiológicas y biomecánicas necesarias para el diseño de una solución adaptada al flag football y al entorno universitario.

La segunda fase consistió en el diseño del prototipo, en la cual se definieron y seleccionaron cuidadosamente las tecnologías que integrarían el sistema multiparamétrico. Para la medición de la actividad eléctrica muscular se optó por un Sensor Muscular Biomédico EMG (De Luca, 2002; Rodríguez Torres et al., 2018) Electronics compatible con Arduino y Raspberry, el cual permite obtener señales electromiográficas de manera no invasiva y en tiempo real. Para la medición de oxigenación muscular se eligió implementar tecnología de reflectancia NIRS (Beltrán Carrillo, 2020), que consiste en emitir luz en la región del infrarrojo cercano y analizar la luz reflejada por el tejido, permitiendo obtener información sobre la saturación de oxígeno de forma continua. Finalmente, para la medición del Rango de Movimiento (Roldán Jiménez, 2017) (ROM) de la rodilla (Winter, 2009) se integró un encoder rotativo, el cual ofrece una lectura precisa de los desplazamientos angulares, proporcionando datos objetivos sobre la movilidad articular. Esta combinación tecnológica busca obtener una visión integral del estado funcional de la rodilla (Winter, 2009), abarcando tanto parámetros fisiológicos como biomecánicos con un enfoque de bajo costo y alta aplicabilidad práctica.

Posteriormente, se desarrolló la fase de implementación del prototipo, que implicó el diseño e integración del hardware y software necesarios para la adquisición y procesamiento de señales en tiempo real. La cabeza principal del circuito está basada en una placa ESP32-S3, seleccionada por su baja latencia, alta capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica integrada (Wi-Fi y Bluetooth) y compatibilidad con múltiples protocolos de comunicación. Esto permite que el sistema pueda recopilar y transmitir datos de manera eficiente sin necesidad de equipos voluminosos o costosos.

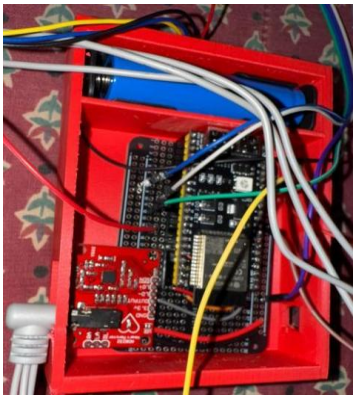

Figura 1. Circuito del prototipo.

En el apartado de software, se empleó una arquitectura híbrida: la programación base de adquisición y control se desarrolló en Arduino IDE, mientras que el procesamiento avanzado de señales, la depuración y la visualización de datos se realizaron en Python utilizando el entorno Spyder. Esta combinación permite aprovechar la facilidad de programación de Arduino junto con la potencia analítica de Python, integrando algoritmos de filtrado y análisis en tiempo real. Durante esta fase también se realizó la calibración de cada sensor y el desarrollo de una interfaz funcional que permite monitorear las variables fisiológicas y biomecánicas de forma clara y accesible.

Finalmente, se llevaron a cabo las pruebas iniciales en laboratorio, con el objetivo de validar la funcionalidad y precisión de cada uno de los módulos. Durante esta etapa se comprobó el comportamiento de los sensores frente a estímulos reales y se verificó que el sistema de adquisición respondiera de manera estable y confiable. Estas pruebas constituyen un paso previo esencial antes de la evaluación en campo con atletas, permitiendo detectar posibles fallas técnicas y optimizar el rendimiento del prototipo para su posterior aplicación práctica.

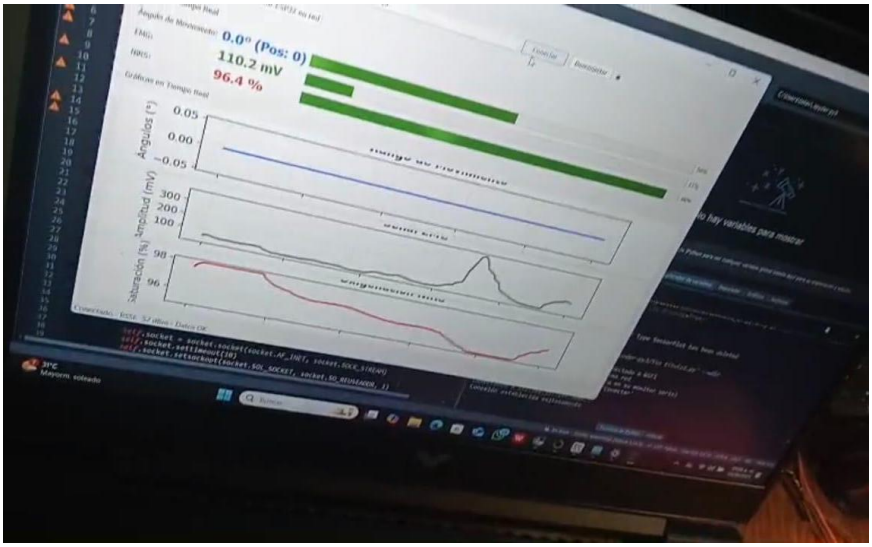

Figura 3. Prueba piloto de sensores.

Procedimiento de Evaluación en Atletas:

Los atletas serán reclutados, firmarán el consentimiento informado, y se realizará una Evaluación Basal. Posteriormente se aplicará el dispositivo para registrar actividad muscular con EMG (De Luca, 2002; Rodríguez Torres

et al., 2018), oxigenación muscular con NIRS (Beltrán Carrillo, 2020), y ROM (Roldán Jiménez, 2017) en pruebas funcionales (sentadillas, saltos, etc.). Los datos serán analizados para identificar patrones de riesgo y se validarán clínicamente comparándolos con pruebas médicas estándar.

El prototipo se materializó en una rodillera wearable de bajo costo que integra un sistema híbrido para la adquisición de señales, optimizado para el entorno dinámico del Flag Football. Los componentes principales se integraron en una Placa perforada de diseño propio para asegurar la compacidad y el bajo consumo energético, buscando mantener la accesibilidad económica del sistema.

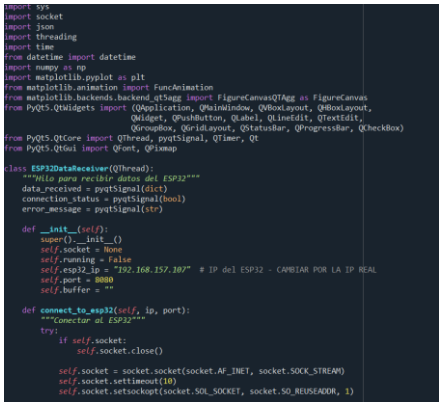

Figura 3. Parte del código y librerías.

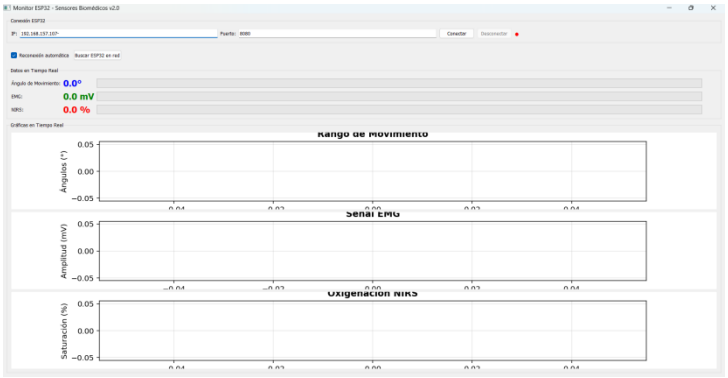

Figura 4. Interfaz.

Conclusiones.

En el desarrollo de este proyecto multiparaétrico enfocado en la prevención y seguimiento de lesiones (Bishop, 2008) de rodilla (Winter, 2009) en jugadores de flag football, he podido constatar la gran utildad y el impacto que puede tener una herramienta de este tipo dentro del ámbito deportivo universitario. A lo largo de la investigación, hemos comprendido que la falta de dispositivos accesibles y especializados para monitorear de forma preventiva el estado físico de los atletas es una limitante importante, sobre todo en instituciones educativas que no cuentan con equipos de alto costo. Por ello, consideramos que esta propuesta representa una alternativa funcional y viable para fortalecer la cultura de la prevención en el deporte universitario, permitiendo detectar signos tempranos de sobrecarga muscular y posibles riesgos de lesión.

El objetivo principal de este proyecto ha sido diseñar y desarrollar una rodillera inteligente de bajo costo que integre tecnología de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS (Beltrán Carrillo, 2020)) y electromiografía superficial

(EMG (De Luca, 2002; Rodríguez Torres et al., 2018)), con la capacidad de monitorear en tiempo real el estado muscular durante la actividad física. La intención es que esta herramienta pueda generar una alerta temprana en caso de detectar señales relacionadas con fatiga muscular o patrones atípicos que puedan derivar en una lesión. Personalente, este enfoque me ha permitido comprender la relevancia de combinar ingeniería biomédica con prevención deportiva, orientando el diseño hacia una solución práctica y útil para estudiantes atletas y entrenadores.

Durante el desarrollo técnico, se planteó la implementación de un sistema híbrido NIRS (Beltrán Carrillo, 2020)–EMG (De Luca, 2002; Rodríguez Torres et al., 2018), complementado con algoritmos de análisis de señales enfocados en identificar cambios fisiológicos de manera confiable. Además, se trabajó en un diseño ergonómico que permita comodidad al usuario sin afectar su rendimiento durante los entrenamientos o competencias. Con esta combinación, se proyecta alcanzar una sensibilidad aproximada del 85 % en la detección de fatiga muscular, lo que representa un avance importante si se compara con métodos tradicionales menos accesibles. Esta integración tecnológica nos ha permitido aplicar conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y reforzar la importancia del diseño centrado en el usuario.

Se espera que el prototipo funcional, una vez validado en condiciones reales con equipos universitarios, logre reducir significativamente los costos y la complejidad de los equipos profesionales convencionales. Esta reducción no solo abre la puerta a que más instituciones educativas puedan contar con tecnología de prevención deportiva, sino que también permite que los atletas tengan acceso a un monitoreo constante sin requerir infraestructura costosa o personal altamente especializado. Consideramos que este enfoque democratiza el acceso a herramientas biomédicas, alineándose con la visión de innovación y desarrollo tecnológico que se impulsa desde nuestra universidad.

Finalmente, la implementación de este dispositivo sienta una base sólida para futuras investigaciones en el área de dispositivos médicos portátiles y wearables accesibles. Al ser un desarrollo pensado desde un entorno universitario mexicano, también contribuye al fortalecimiento de la investigación aplicada y al impulso de soluciones tecnológicas nacionales. Mi expectativa es que este proyecto no solo apoye la prevención de lesiones (Bishop, 2008) en flag football, sino que pueda escalarse a otros deportes y contextos clínicos, consolidándose como una herramienta útil para el cuidado de la salud musculoesquelética en la comunidad universitaria y más allá.

Créditos.

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Chiapas y a el Ingeniero Arturo Pinto Orozco, por el seguimiento y apoyo en el proyecto.

Referencias bibliográficas.

Badiola Soriano, A. (2019). *Análisis del comportamiento neuromuscular de la rodilla* **(Winter, 2009)** *durante el ejercicio* (Tesis doctoral, Universitat Ramon Llull).

Beltrán Carrillo, A. C. (2020). *Uso de la espectroscopia de infrarrojo cercano para la medición de la saturación de oxígeno muscular en el deporte.* Revista Española de Educación Física y Deportes, (427), 29-38.

Bishop, D. (2008). *An applied research model for the sport sciences*. Sports Medicine, 38(3), 253-263.

Budidha, F., & Kyriacou, P. A. (2019). *NIRS* **(Beltrán Carrillo, 2020)-***EMG* **(De Luca, 2002; Rodríguez Torres et al., 2018)** *for clinical applications: A systematic review.* Applied Sciences, 9(15), 2952.

De Luca, C. J. (2002). *Surface electromyography: Detection and recording.* DelSys Incorporated.

Jiménez Palomares, M. (2013). *Valoración del riesgo de lesión de rodilla* **(Winter, 2009)** *en sujetos sanos y efecto de programas de estiramiento* (Tesis de licenciatura, Universidad de Jaén).

Rodríguez Torres, J. E., et al. (2018). *Electromiografía* **(De Luca, 2002; Rodríguez Torres et al., 2018)** *en las Ciencias de la Rehabilitación*. Revista Colombiana de Psiquiatría, 47(3), 153-160.

Roldán Jiménez, C. (2017). *Estudio de la cinemática del miembro superior e inferior mediante análisis de movimiento* (Tesis doctoral, Universidad de Málaga).

Vásquez Bonilla, M. (2021). *Medición de la saturación de oxígeno muscular y su relación con el rendimiento deportivo* (Tesis doctoral, Universidad de Extremadura).

Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement* (4th ed.). Wiley.

Información de los autores.

Iván Octavio Hernández Gómez es estudiante de noveno semestre de Ingeniería Biomédica en la Universidad Politécnica de Chiapas. Actualmente desarrolla un proyecto de titulación enfocado en el diseño de un dispositivo multiparamétrico para la prevención y seguimiento de lesiones de rodilla en atletas de Flag Football. Sus áreas de interés incluyen el diseño de dispositivos médicos portátiles, instrumentación biomédica y tecnologías aplicadas a la rehabilitación y medicina deportiva.

Dekker Díaz Margarita Belén es estudiante de Ingeniería Biomédica en la Universidad Politécnica de Chiapas. Sus intereses académicos se centran en el desarrollo de dispositivos médicos innovadores, con énfasis en la instrumentación biomédica y la aplicación de tecnologías emergentes en el área de la salud y el deporte. Ha colaborado en proyectos orientados a la prevención de lesiones musculoesqueléticas y a la integración de sistemas portátiles para la evaluación fisiológica en atletas.

José Eduardo Ordaz de la Cruz es estudiante de Ingeniería Biomédica en la Universidad Politécnica de Chiapas. Su formación está orientada al diseño y desarrollo de dispositivos médicos, con especial interés en el análisis de señales fisiológicas y en la aplicación de tecnologías portátiles para el monitoreo de la salud. Ha participado en proyectos relacionados con la prevención de lesiones en el ámbito deportivo y la integración de sistemas de adquisición de datos en tiempo real.

Arturo Pinto Orozco es un ingeniero mecatrónico con una destacada trayectoria profesional y académica. Se desempeña como profesor en la Universidad Politécnica de Chiapas, donde imparte asignaturas relacionadas con la ingeniería electrónica y áreas afines. Su enfoque principal está centrado en el estudio, desarrollo y aplicación de ciencias y tecnologías vinculadas a la electrónica, la automatización y la instrumentación.

Dr. Gerardo Velázquez Hernández es un médico cirujano egresado de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) y, desde aproximadamente 2003, se dedica también a la docencia. Actualmente labora como profesor de tiempo completo en la Universidad Politécnica de Chiapas (UPChiapas), en el ámbito de ciencias de la salud e ingeniería biomédica. Además, ha obtenido estudios de posgrado relevantes: entre ellos un máster universitario, un doctorado en osteopatía, una especialización en cadenas miofasciales y una certificación en biomecánica deportiva en Argentina.