

Diseño y desarrollo de un dispositivo wearable para monitoreo del sueño

Integrantes del equipo:

- Alejandro Iñiguez Capitaine
- Ivan Antonio García Castillo
- Luis Fernando Aguilar Cruz
- Jojhan Eliezer Cu Barrera

Carrera: Ingeniería Biomédica

Semestre: Sexto semestre

Asignatura: Proyectos VI

Profesora: Cielo Guadalupe Poot Bote



Introducción

El sueño es un proceso fisiológico fundamental para la homeostasis metabólica, neurológica y cardiovascular. La evidencia clínica reciente demuestra que los eventos agudos de privación de sueño generan repercusiones inmediatas y severas en la salud pública, alterando negativamente la respuesta del sistema inmunológico y aumentando el riesgo de morbilidades a largo plazo. (Kelly et al., 2026)

A pesar de su importancia clínica, el monitoreo del sueño enfrenta barreras de accesibilidad. Actualmente, el estándar de oro para el diagnóstico es la polisomnografía (PSG). Sin embargo, la PSG es un estudio de alto costo que requiere instalaciones hospitalarias, personal especializado y la colocación intrusiva de múltiples electrodos, lo cual altera la arquitectura natural del descanso del paciente (fenómeno conocido como "efecto de la primera noche").

Para democratizar el acceso a la salud preventiva, este proyecto propone el diseño y desarrollo de un dispositivo wearable (tipo pulsera) basado en el Internet de las Cosas (IoT). El objetivo es crear una herramienta de telemedicina de bajo costo que permita el monitoreo ambulatorio, continuo y no invasivo del sueño, procesando variables fisiológicas mediante la fusión de sensores ópticos e inerciales para alcanzar una validez clínica comparable a los sistemas de laboratorio.

Antecedentes

Históricamente, los dispositivos portátiles para el monitoreo del sueño se basaban únicamente en la actigrafía (medición del movimiento). Sin embargo, la actigrafía por sí sola presenta una baja especificidad clínica, ya que es incapaz de diferenciar fisiológicamente entre el sueño profundo y un estado de vigilia inmóvil (por ejemplo, un paciente con insomnio acostado sin moverse).

Para superar esta limitación, el estado del arte actual en instrumentación biomédica ambulatoria exige la fusión de sensores. Estudios de validación clínica en poblaciones con trastornos del sueño han demostrado que la combinación simultánea de actigrafía de muñeca y fotopletismografía (PPG) incrementa drásticamente la precisión del dispositivo, logrando identificar las cuatro fases del sueño con una correlación superior al 76% frente a la polisomnografía de referencia (Wulterkens et al., 2021). Esta mejora se debe a que la PPG permite extraer la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV), un biomarcador clave para medir la actividad del sistema nervioso autónomo y detectar fluctuaciones simpáticas durante la fase REM.

En el ámbito del diseño de hardware de bajo costo, la literatura técnica reciente avala la viabilidad de los componentes seleccionados para este prototipo. Investigaciones en diseño biomédico han validado el uso de biosensores ópticos compactos, demostrando que sensores como el MAX30102 son capaces de capturar la señal cardiovascular de forma continua y extraer la HRV con un margen de error inferior al 1% en entornos de laboratorio (Semiz, 2025).

Asimismo, la arquitectura de procesamiento propuesta en este proyecto cuenta con respaldo empírico. El acoplamiento de sensores PPG (como el MAX30102) con microcontroladores de ultra bajo consumo y radiofrecuencia de la familia ESP32 ha sido rigurosamente probado en entornos de telemedicina, logrando tasas de precisión del 99.88% en la adquisición y transmisión en tiempo real de signos vitales (Krishnapriya, PhD & S., 2025).

Estos antecedentes sustentan que la integración de actigrafía de alta sensibilidad y oximetría reflexiva bajo una arquitectura IoT no solo es viable económicamente, sino que cumple con los estándares de rigor técnico necesarios para el monitoreo clínico remoto.

Tabla de antecedentes

Artículo	Tipo de dispositivo	Sensores	Variables medidas	Procesamiento	Validación	Limitaciones
Nature Comm., 2026	Wearable	Acelerómetro	Patrones de sueño	Análisis estadístico	Cohorte (85k sujetos)	No mide variables fisiológicas
Sensors, 2025	Prototipo IoT	PPG (MAX30102)	HRV	Procesamiento digital	Validación experimental	Sin clasificación de sueño
JPCS, 2024	Wearable IoT	PPG + SpO ₂	Frecuencia cardíaca	IoT remoto	Pruebas funcionales	No incluye actigrafía
Sleep Journal, 2024	Smartwatch	PPG + acelerómetro	HRV + movimiento	Algoritmo ML	Contra PSG	Dependencia de hardware propietario

Resumen

El proyecto consiste en el desarrollo de un sistema portátil de monitoreo del sueño que integra sensores con un microcontrolador y una aplicación móvil para registrar variables fisiológicas, analizar la calidad del descanso y ofrecer herramientas de apoyo como sonidos relajantes y un diario de sueños. Su factibilidad es alta debido al uso de componentes accesibles y tecnologías ya probadas en entornos biomédicos y de desarrollo móvil. Se espera como beneficio principal el acceso al monitoreo del sueño, mejorar los hábitos de descanso en jóvenes de educación superior y población general, y contribuir a la prevención temprana de trastornos asociados a la falta de sueño, con impacto positivo en la salud física, mental y el rendimiento académico.

Problemática

La falta de sueño y la alta prevalencia de trastornos asociados a esto en la población mexicana, particularmente en jóvenes universitarios, los cuales representan un problema de salud pública que impacta negativamente en el rendimiento académico, la salud física y el bienestar emocional. A pesar de la existencia de estudios especializados como la polisomnografía, su alto costo y limitada accesibilidad dificultan el diagnóstico y seguimiento oportuno. Por ello, se plantea la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles y no invasivas que permitan monitorear la calidad del sueño y brinden herramientas de apoyo para mejorar los hábitos de descanso.

Análisis del entorno y estado de la técnica

Autor (Año)	Objetivo del	Tecnología	Variables	Hallazgos
-------------	--------------	------------	-----------	-----------

	Estudio	Empleada	Monitoreadas	
Scientific Reports (2024)	Comparar la precisión de sistemas basados solo en movimiento frente a sistemas de fusión de sensores para clasificar el sueño.	Fotopletiografía (PPG) y actigrafía (Acelerometría) de muñeca.	Movimiento corporal y ritmo cardíaco (PPG).	La actigrafía aislada genera falsos positivos en vigilia inmóvil. Integrar la señal cardiovascular (PPG) reduce drásticamente el sesgo frente a la polisomnografía.
MDPI Sensors (2026)	Evaluar la precisión de biosensores digitales de bajo costo frente a circuitos médicos analógicos de alta resolución.	Sensor óptico MAX30102 (PPG).	Señal PPG bruta, Intervalos R-R, Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV).	El sensor presenta una relación señal-ruido clínicamente apta, validando su capacidad para extraer marcadores autonómicos del sueño.
SciTePress (2023)	Desarrollar un sistema de monitoreo IoT enfocado en el registro de movimientos nocturnos y posturas durante el descanso.	Unidad de Medición Inercial (IMU) MPU6050 y SoC ESP.	Aceleración triaxial (micro-movimientos) y rotación (postura).	Los datos crudos del MPU6050 poseen la sensibilidad exacta requerida para la actigrafía clínica y la detección de despertares transitorios.
Engineering Applications (2026)	Analizar el rendimiento de protocolos de comunicación y gestión de energía en dispositivos de Internet de las Cosas Médico (IoMT).	Microcontrolador ESP32, modos Deep Sleep y Bluetooth Low Energy (BLE).	Consumo de corriente (μ A) y latencia de transmisión de datos.	Trasladar el procesamiento a un dispositivo externo (Offloading) usando BLE y Deep Sleep es el estándar indispensable para lograr autonomías de más de 8 horas.
AIMS Bioengineering (2025)	Validar el diseño traslacional de monitores no invasivos procesando señales crudas de biosensores mediante software.	Filtros digitales paramétricos (paso-bajo y paso-banda) en entornos móviles.	Frecuencia cardíaca e intervalos inter-latido.	El filtrado digital externo (en la App) mitiga los artefactos de movimiento, garantizando la extracción fidedigna de umbrales de

				estadificación.
--	--	--	--	-----------------

Idea del proyecto

El proyecto surge como respuesta a la creciente problemática de la mala calidad de sueño en estudiantes universitarios, un fenómeno con elevada prevalencia que afecta tanto el rendimiento académico como la salud física y mental. Los métodos clínicos tradicionales, como la polisomnografía, aunque son el estándar de oro para el diagnóstico de trastornos del sueño, resultan costosos, poco accesibles y requieren infraestructura hospitalaria, lo que limita su aplicación en la población general.

*SomnIA propone el desarrollo de un **sistema portátil no invasivo** integrado a una **aplicación móvil** que permita monitorear parámetros fisiológicos y ambientales asociados al sueño. El dispositivo incluirá sensores de frecuencia cardíaca mediante fotoplethismografía (PPG), acelerómetro para registrar movimiento y un micrófono para analizar el ambiente sonoro y la presencia de ronquidos. Estos datos serán procesados por la aplicación para estimar indicadores de calidad de sueño y brindar retroalimentación personalizada al usuario.*

*La plataforma móvil complementará la medición objetiva con funciones de registro subjetivo de sueños, emociones y hábitos, además de recursos de apoyo como sonidos relajantes y recomendaciones basadas en higiene del sueño. De esta forma, SomnIA busca no solo monitorear, sino también **promover hábitos saludables** y mejorar el bienestar integral de los usuarios.*

*El valor agregado del proyecto radica en su **accesibilidad y enfoque preventivo**, ofreciendo a los estudiantes una herramienta práctica y de bajo costo que fomente la conciencia sobre la importancia del descanso, contribuyendo así a reducir los efectos negativos del insomnio y la privación de sueño en la vida académica y personal.*

Objetivos generales

Diseñar y desarrollar, en un periodo de dos semestres, un sistema portátil no invasivo de monitoreo del sueño que integre sensores con un microcontrolador ESP32 y una aplicación móvil que sea capaz de registrar, procesar y analizar variables fisiológicas para evaluar la calidad del descanso y ofrecer herramientas de apoyo orientadas a mejorar los hábitos de sueño en jóvenes y público en general.

Objetivos específicos

- Investigar y documentar regulaciones aplicables, el estado del arte de tecnología de monitoreo del sueño.
- Definir los requerimientos técnicos y funcionales del dispositivo y la aplicación móvil antes de finalizar el primer semestre, mediante entrevistas a estudiantes universitarios y revisión bibliográfica.
- Diseñar el prototipo conceptual (diagramas, arquitectura del sistema y selección preliminar de sensores y componentes) al cierre del semestre, estableciendo criterios claros de validación.
- Hacer las pruebas pertinentes en el prototipo y la aplicación del sistema
- Pulir todos los errores que tenga el prototipo y la aplicación

Organización del equipo

- Profesor: Cielo Guadalupe Poot Bote
- Asesores: Rodrigo Daniel Solís Ortega, Edson Geovanny Estrada Lopez
- Líder de proyecto (Alejandro Iñiguez Capitaine): Coordinar el trabajo general, supervisar avances, asegurar cumplimiento de tiempos y objetivos.
- Responsable de hardware (Luis Fernando Aguilar Cruz): Selección, integración y pruebas de sensores (PPG, acelerómetro, micrófono).
- Responsable de software (Ivan Antonio Garcia Castillo): Desarrollo de la aplicación móvil, integración con la base de datos, diseño de la interfaz de usuario.
- Responsable de ciencia de datos/IA (Jojhan Eliezer Cu Barrera): Implementación de algoritmos de procesamiento de señales y machine learning para estimar etapas de sueño y detectar patrones.

Características

Componentes y características principales del proyecto

Hardware central

- Microcontrolador (ESP32)

- Placa base/protoboard/PCB: Para integrar y asegurar conexiones estables entre el ESP32 y los módulos sensores.

Sensores biomédicos y ambientales

- PPG/FC-SpO₂ (MAX30102): Sensor óptico con LEDs rojo/IR y fotodiodo integrado; interfaz I²C; muestreo típico 50–200 Hz; útil para frecuencia cardíaca, tendencia de saturación y artefacto de movimiento.

- Acelerómetro/Giroscopio (MPU-6050)

Alimentación y gestión de energía

- Batería de Litio
- Cargador

Diseño físico y ergonomía

- Funda/correa textil y encapsulado: Material suave e hipoalergénico para muñeca/antebrazo; caja impresa en 3D con ventilación y acceso a puerto de carga.
- Gestión de cables y conectores: Conectores JST/PH para módulos.
- Indicadores discretos (LED de estado): Estados de encendido, emparejamiento y batería.

Software y protocolos

- Firmware (C/C++ sobre ESP32):
 - Adquisición: Tareas separadas por sensor con muestreo configurable.
 - Procesamiento básico: Filtrado pasa-bajo/pasa-banda en PPG, detección de picos para FC, actigrafía con ventana móvil, energía de señal en audio.
 - Comunicación BLE: Perfil GATT con características para transmitir FC, movimiento y eventos de audio; empaquetado eficiente y timestamps.
- App móvil (Flutter o MIT App Inventor):
 - Bluetooth BLE: Emparejamiento, lectura en tiempo real, reconexión automática.
 - Visualización: Gráficas de FC, movimiento y ruido; métricas de sueño (duración, eficiencia, tiempo despierto).
 - Funciones: Diario de sueños, sonidos relajantes, alarmas en fase ligera; almacenamiento local (SQLite) y exportación CSV.
- Análisis complementario (Python/MATLAB):
 - Validación y prototipado de algoritmos: Filtrado, segmentación, clasificación de eventos; generación de reportes y visualizaciones.
 - Etiquetado de sesiones piloto: Para ajustar umbrales y evaluar precisión.

Integración, pruebas y seguridad

- Calibración inicial: Ajuste de intensidad LED en PPG, orientación del acelerómetro y niveles de ruido del micrófono.
- Pruebas piloto controladas: Escenarios con y sin ruido, diferentes posiciones de uso; comparación básica contra dispositivos comerciales.
- Privacidad y almacenamiento: Datos almacenados localmente con control de usuario; identificación por seudónimo; exportación bajo consentimiento.
- Mantenibilidad: Código modular, documentación de APIs BLE y versiones de firmware/app para facilitar iteraciones del equipo.

Delimitaciones

1. Alcance tecnológico

- El sistema se limita a medir variables fisiológicas básicas: frecuencia cardíaca, movimiento corporal y sonido ambiente.
- No sustituye estudios clínicos especializados como la polisomnografía, que incluyen EEG, EMG o EOG.
- El análisis de datos se centrará en métricas generales de sueño (duración, eficiencia, tiempo despierto) y no en diagnósticos médicos.

2. Población objetivo

- El prototipo está diseñado principalmente para jóvenes universitarios, por ser un grupo con alta prevalencia de problemas de sueño y fácil acceso para pruebas piloto.
- No se contempla en esta fase la validación clínica en pacientes con trastornos graves del sueño.

3. Tiempo y recursos

- El desarrollo se realizará en un periodo de 12 meses, dividido en fases de investigación, prototipado, desarrollo de software y pruebas piloto.
- Se utilizarán componentes de bajo costo y disponibles en el mercado local (ESP32, sensores comerciales, baterías recargables).

4. Limitaciones de validación

- Las pruebas se enfocarán en la funcionalidad técnica y la usabilidad de la app, más que en la validación clínica exhaustiva.
- Los resultados se interpretarán como indicadores aproximados de calidad del sueño, no como diagnósticos médicos.

5. Entorno de uso

- El sistema está pensado para uso doméstico y personal, no hospitalario.
- La app funcionará en dispositivos móviles con sistema operativo Android.

Referencias

- Kelly, N. J., Chaudhary, R., El Khoury, W., Kalepalli, N., Wang, J., Patel, P., Chan, I. N., Rahman, H., Saiyed, A., Shah, A. N., McClung, C. A., Okawa, S., Nouraie, S. M., & Chan, S. Y. (2026). Health outcomes after national acute sleep deprivation events among the American public. *JCI Insight*, 11(3), e195344. <https://doi.org/10.1172/jci.insight.195344>
- Krishnapriya, PhD, G., & S., P. (2025). Cost-Effective IoT-Based Real-Time Vital Sign Monitoring: An Affordable Telehealth Solution. *Telehealth and Medicine Today*, 10(4). <https://doi.org/10.30953/thmt.v10.611>
- Semiz, B. (2025). A Compact Multimodal Patch for Continuous and Electrode-Free Cardiopulmonary Monitoring. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 12(3), 873–893. <https://doi.org/10.54287/gujsa.1737897>
- Wulterkens, B. M., Fonseca, P., Hermans, L. W., Ross, M., Cerny, A., Anderer, P., Long, X., Van Dijk, J. P., Vandenbussche, N., Pillen, S., Van Gilst, M. M., & Overeem, S. (2021). It is All in the Wrist: Wearable Sleep Staging in a Clinical Population versus Reference Polysomnography. *Nature and Science of Sleep*, Volume 13, 885–897. <https://doi.org/10.2147/NSS.S306808>