

Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería en Computadores  
Programa de Licenciatura en Ingeniería en Computadores



## **Espejo Interactivo de Bienestar y Ejercicio Personalizado con Inteligencia Artificial**

Informe de Trabajo Final de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Computadores con el grado académico de Licenciatura

Axel Josué Cordero Martínez

Cartago, 14 de Setiembre, 2025

Declaro que el presente documento de tesis ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos y resultados experimentales propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de tesis realizado y por el contenido del presente documento.

Axel Josué Cordero Martínez

Cartago, 13 de octubre de 2025

Céd: 9-0122-0972

*a mis queridos padres*

# Agradecimientos

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de Thevenin, Norton, Einstein y mi querido amigo Ohm.

Axel Josué Cordero Martínez

Cartago, 13 de octubre de 2025

# Resumen

El resumen es la síntesis de lo que aparecerá en el tesis. Tiene que ser lo suficientemente consiso y claro para que alguien que lo lea sepa qué esperar del resto de la tesis si la leyera completamente. Puede concluir con palabras clave, que son los temas principales tratados en el documento. El resumen queda fuera de la numeración del resto de secciones.

No se acostumbra utilizar referencias bibliográficas, tablas, o figuras en el resumen.

**Palabras clave:** palabras, clave, ...

# Abstract

The same as before, but in English.

**Keywords:** word 1, word 2,

# Índice general

Índice de figuras	III
Índice de tablas	IV
Lista de símbolos y abreviaciones	v
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes del proyecto . . . . .	1
1.1.1. Descripción de la organización . . . . .	2
1.1.2. Descripción del área de conocimiento del proyecto . . . . .	2
1.1.3. Trabajos similares encontrados . . . . .	2
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	4
1.2.1. Contexto del problema . . . . .	4
1.2.2. Justificación del problema . . . . .	5
1.2.3. Enunciado del problema . . . . .	5
1.3. Objetivos del proyecto . . . . .	6
1.3.1. Objetivo general . . . . .	6
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	6
1.4. Alcances, entregables y limitaciones del proyecto . . . . .	6
<b>2. Marco teórico</b>	<b>8</b>
2.1. Introducción . . . . .	8
2.2. Mapa conceptual . . . . .	9
2.3. Explicación y discusión de los principales elementos . . . . .	9
2.3.1. Sistemas empujados y procesamiento en el borde . . . . .	10
2.3.2. Visión por computadora y estimación de postura . . . . .	11
2.3.3. Reconocimiento de patrones: conteo de repeticiones . . . . .	12
2.3.4. Vestible: frecuencia cardíaca; visualización y alertas . . . . .	12
2.3.5. Control por voz (comandos básicos) . . . . .	13
2.3.6. Visualización (HUD) y streaming local . . . . .	14
2.3.7. Privacidad y latencia: procesamiento on-device . . . . .	14
2.3.8. Seguridad: OAuth 2.0 y manejo de tokens . . . . .	15
2.3.9. Métricas de evaluación: MAE, latencia (p50/p95), FPS y tasa de reconocimiento . . . . .	15

---

<b>3. Marco metodológico</b>	<b>17</b>
3.1. Introducción . . . . .	17
3.2. Explicación y justificación de la estrategia metodológica . . . . .	17
3.3. Secuencia del proceso seguido . . . . .	18
3.4. Tabla de desglose del marco metodológico . . . . .	19
<b>4. Descripción del trabajo realizado</b>	<b>22</b>
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>23</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>24</b>
<b>A. Demostración del teorema de Nyquist</b>	<b>27</b>



# Índice de figuras

2.1. Mapa conceptual del marco teórico . . . . .	10
3.1. Flujo metodológico iterativo . . . . .	19

# Índice de tablas

3.1. Desglose metodológico por objetivo específico. . . . .	20
---	----

# Capítulo 1

## Introducción

El bienestar integral, entendido como la combinación de salud física y mental, se ha consolidado como un componente esencial en la calidad de vida de las personas. Sin embargo, el estilo de vida contemporáneo, caracterizado por el sedentarismo, las jornadas laborales extensas y las limitaciones de acceso a servicios especializados, ha contribuido a elevar los niveles de inactividad física a nivel global [14], [15].

Ante este panorama, la tecnología se ha convertido en un aliado estratégico para fomentar hábitos saludables. Los avances en áreas como los sistemas empujados, la visión por computadora y la inteligencia artificial han abierto la posibilidad de desarrollar herramientas accesibles que brinden acompañamiento más allá de la simple cuantificación de métricas.

En este marco, el proyecto de espejo inteligente que se presenta en este documento busca constituirse en una alternativa tecnológica innovadora. Su propósito es integrar el monitoreo fisiológico, el análisis postural y la retroalimentación en tiempo real, con el fin de apoyar la práctica de ejercicio físico en el hogar y contribuir al fortalecimiento de estilos de vida más saludables.

### 1.1. Antecedentes del proyecto

La promoción de la actividad física es un eje reconocido para la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles, y organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan al menos 150 minutos semanales de actividad moderada [14], [15]. Además, la práctica regular de ejercicio se asocia con mejoras en indicadores de salud mental, como reducción del estrés y de la ansiedad [21].

En paralelo, la adopción de dispositivos y plataformas inteligentes para el monitoreo de la salud (relojes y sensores biométricos) ha crecido de forma sostenida [19]. Este proyecto se inscribe en ese contexto, explorando el uso de sistemas empujados, visión por computadora e inteligencia artificial para apoyar la práctica de ejercicio en el hogar.

### 1.1.1. Descripción de la organización

El proyecto se desarrolla en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), una institución pública de educación superior fundada en 1971 mediante la Ley N.º 4777 [4]. A lo largo de su trayectoria, el TEC se ha consolidado como una de las universidades técnicas más relevantes de Centroamérica, destacándose por su orientación hacia la formación científica y tecnológica, así como por el impulso a la investigación y la vinculación con el sector productivo.

El Trabajo Final de Graduación se llevará a cabo en la Escuela de Ingeniería en Computadores, ubicada en el Campus Central de Cartago. Esta Escuela se distingue por su enfoque en la integración de hardware y software para la resolución de problemas, con líneas de trabajo en sistemas empuotrados, visión por computadora, inteligencia artificial y desarrollo de soluciones aplicadas a contextos reales [5]. Asimismo, promueve iniciativas de investigación, innovación y extensión que fortalecen la formación académica y aportan a las necesidades de la sociedad costarricense.

### 1.1.2. Descripción del área de conocimiento del proyecto

Las áreas de conocimiento directamente involucradas en este proyecto son:

- **Sistemas empuotrados:** procesamiento para adquisición de señales y control; integración de cámara, micrófono y pantalla.
- Reconocimiento y procesamiento de imágenes: estimación de postura por visión por computadora.
- Inteligencia artificial y aprendizaje de máquina: técnicas ligeras para detección de eventos y apoyo a la estimación de postura.
- Internet de las cosas: integración de datos desde servicios de reloj inteligente.
- Reconocimiento de patrones: clasificación de posturas y eventos a partir de señales de video.
- Verificación de hardware y software: pruebas e integración para precisión, latencia y confiabilidad.

### 1.1.3. Trabajos similares encontrados

En el mercado actual existen múltiples soluciones orientadas al apoyo de la actividad física, como relojes inteligentes, aplicaciones móviles y plataformas de suscripción en línea. Estos dispositivos permiten registrar métricas básicas tales como la frecuencia cardíaca, el conteo de pasos o el gasto calórico, lo que representa un aporte inicial al monitoreo del

estado físico. Sin embargo, su alcance resulta limitado en aspectos críticos para la calidad del entrenamiento:

- No incorporan mecanismos de retroalimentación inmediata sobre la postura del usuario durante la ejecución de los ejercicios.
- Carecen de adaptabilidad dinámica que ajuste la intensidad del entrenamiento según las condiciones fisiológicas actuales.
- Su efectividad depende en gran medida de la autogestión del usuario, lo que afecta la adherencia a largo plazo.

En la literatura académica se han desarrollado aproximaciones que van más allá de la cuantificación de la actividad. Yang et al. (2020) proponen un sistema habilitado por IoT para el monitoreo postural utilizando sensores vestibles, evidenciando la capacidad de identificar desviaciones en tiempo real [35]. De manera similar, Tao et al. (2012) presentan un análisis de la marcha mediante sensores vestibles, mostrando cómo los datos recopilados permiten detectar irregularidades biomecánicas con aplicaciones en rehabilitación y prevención de lesiones [30].

Adicionalmente, existen soluciones comerciales y académicas relevantes:

- **Samsung Health Smart Trainer (TV).** Función para televisores Samsung que realiza tracking y análisis de postura en tiempo real; ofrece retroalimentación sobre la forma y conteo de repeticiones durante la clase [23], [24].
- **Peloton Guide.** Cámara con body tracking orientada a entrenamiento de fuerza; permite comparar la postura del usuario con la del instructor en tiempo real y habilita conteo de repeticiones dentro del ecosistema Peloton [17], [18].
- **MagicMirror<sup>2</sup>.** Marco modular de código abierto para espejos inteligentes centrado en visualización (tiempo, calendario, noticias); útil para HUD, pero sin estimación de postura ni visión en tiempo real incorporadas [13].
- **BlazePose (Google Research).** Demuestra estimación de postura de 33 puntos en tiempo real on-device, habilitando casos como *fitness tracking* en plataformas de cómputo limitado [1].

Estas referencias ilustran el estado del arte y el mercado: las soluciones comerciales integran retroalimentación visual y conteo de repeticiones, pero suelen depender de plataformas cerradas y suscripciones (por ejemplo, Samsung Health Smart Trainer y Peloton Guide) [17], [18], [23], [24]. Por su parte, la literatura y los desarrollos abiertos muestran la viabilidad de la estimación de postura en tiempo real—ya sea con sensores vestibles [30], [35] o mediante visión por computadora on-device como BlazePose [1]—, lo que se alinea con el enfoque de este proyecto, que prioriza procesamiento local, baja latencia y protección de datos.

## 1.2. Planteamiento del problema

La inactividad física, asociada al ritmo de vida contemporáneo, constituye uno de los principales factores de riesgo para enfermedades crónicas no transmisibles, tal como lo reconocen organismos internacionales de salud pública [7], [14], [15].

A pesar de la amplia disponibilidad de aplicaciones móviles y dispositivos portables, diversos estudios han señalado que estas soluciones suelen carecer de mecanismos de corrección postural en tiempo real, lo que limita su efectividad y reduce la adherencia de los usuarios [19], [32].

El presente proyecto surge ante esta brecha, planteando la necesidad de un sistema que integre análisis de postura y monitoreo fisiológico en un entorno accesible para el hogar. En los apartados siguientes se desarrolla el contexto, la justificación y el enunciado del problema que fundamentan esta propuesta [3], [30], [35].

### 1.2.1. Contexto del problema

El estilo de vida contemporáneo plantea obstáculos para la práctica regular de actividad física supervisada. Factores como las extensas jornadas laborales, el tráfico en zonas metropolitanas y los costos de entrenadores o gimnasios limitan la posibilidad de mantener rutinas constantes [15]. En Costa Rica, la inactividad física entre adultos de 18 años o más, alcanza el 38 % en hombres y el 54 % en mujeres; en adolescentes (11–17), las estimaciones son del 76 % y 88 %, respectivamente, según el Physical Activity Profile 2022 de la OMS [16].

Ante estas limitaciones, el entrenamiento en el hogar se ha posicionado como una alternativa viable. Las opciones más utilizadas incluyen aplicaciones móviles, videos pregrabados y plataformas de ejercicio en línea. Sin embargo, aunque son accesibles, tienden a carecer de retroalimentación y monitoreo fisiológico en tiempo real, de mecanismos de corrección postural y de adaptación de la intensidad a las condiciones fisiológicas del usuario; además, su efectividad depende en gran medida de la motivación y autogestión, lo que reduce la adherencia [19], [21].

En paralelo, el avance de dispositivos empotrados de bajo consumo, la visión por computadora y algoritmos de inteligencia artificial permite concebir sistemas interactivos capaces de procesar datos en tiempo real y generar retroalimentación inmediata [35]. Estas tecnologías han mostrado resultados en investigación y aplicaciones clínicas, pero aún no se han consolidado soluciones accesibles y adaptadas al entorno doméstico.

En síntesis, existe una brecha clara: crece la necesidad de herramientas de apoyo para la práctica de ejercicio en casa, pero faltan soluciones integrales que combinen monitoreo fisiológico, análisis postural y un control interactivo de ejercicios. Este proyecto busca atender esa brecha mediante un prototipo que integre hardware empotrado, visión por computadora y métricas biométricas.

### 1.2.2. Justificación del problema

El desarrollo de un espejo inteligente interactivo se justifica en función de tres dimensiones principales: social, tecnológica y académica.

Desde el punto de vista social, la inactividad física constituye uno de los principales factores de riesgo para enfermedades crónicas no transmisibles, situación que se agrava cuando las personas no cuentan con acceso a entrenadores o programas estructurados de ejercicio [15]. Una solución tecnológica accesible que guíe al usuario desde su hogar puede contribuir a disminuir estas barreras, fomentar hábitos saludables y reducir riesgos asociados a la ejecución incorrecta de rutinas.

En la dimensión tecnológica, los dispositivos de consumo se concentran en registrar métricas básicas y suelen carecer de corrección postural y de integración efectiva de la biometría en el flujo de entrenamiento [19]. El prototipo propuesto aprovecha sistemas empotrados y visión por computadora para ofrecer:

- Retroalimentación inmediata sobre la postura y conteo de repeticiones en tiempo real.
- Visualización de frecuencia cardíaca obtenida de un reloj inteligente, con alertas por zona de intensidad durante la sesión.
- Control por voz local para comandos básicos (iniciar, pausar/reanudar, siguiente, finalizar) que habilite interacción manos libres.
- Procesamiento local de video en la plataforma empotrada, lo que reduce latencia y favorece la privacidad de los datos.

Desde la perspectiva académica, el proyecto integra y aplica áreas clave del plan de estudios de Ingeniería en Computadores, tales como sistemas empotrados, reconocimiento y procesamiento de imágenes, inteligencia artificial y aprendizaje de máquina, reconocimiento de patrones y verificación de hardware y software [5]. Además, incorpora una evaluación en escenarios controlados con métricas objetivas de rendimiento y funcionamiento, contribuyendo a la formación en diseño, implementación y validación de sistemas interactivos en tiempo real.

El prototipo desarrollado tiene potencial de extenderse a campos como la rehabilitación física, la educación en línea y el diseño de programas de bienestar para adultos mayores, fortaleciendo el impacto social y la proyección investigativa de la Escuela de Ingeniería en Computadores [5].

### 1.2.3. Enunciado del problema

¿Cómo diseñar e implementar un sistema de espejo inteligente, basado en sistemas empotrados, que en el entorno doméstico brinde retroalimentación en tiempo real sobre la

postura y conteo de repeticiones, integre y visualice la frecuencia cardíaca proveniente de un reloj inteligente, y permita control por voz de comandos básicos?

### 1.3. Objetivos del proyecto

En lo que sigue se presenta el objetivo general, que sintetiza el propósito central del proyecto, y los objetivos específicos, que detallan las metas concretas que evidencian su cumplimiento.

#### 1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de espejo inteligente que facilite la práctica de ejercicio en el hogar mediante retroalimentación en tiempo real, a través del análisis de postura, el monitoreo de datos fisiológicos y el control por voz, empleando sistemas empotrados y visión por computadora.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

1. Diseñar e implementar un módulo de análisis de postura en tiempo real, con retroalimentación visual al usuario y conteo de repeticiones, para reducir errores durante la ejecución de ejercicios.
2. Integrar datos de frecuencia cardíaca obtenidos de un reloj inteligente para su visualización en tiempo real.
3. Implementar una interfaz de rutinas predefinidas con control por voz que guíe la ejecución de los ejercicios y mejore la accesibilidad durante las sesiones.
4. Evaluar el desempeño del prototipo con un único participante y en condiciones controladas, midiendo precisión, estabilidad, rendimiento y experiencia de uso.

### 1.4. Alcances, entregables y limitaciones del proyecto

**Alcances:** El proyecto contempla el diseño e implementación de un prototipo funcional de espejo inteligente, sobre una plataforma de sistemas empotrados con procesamiento local, que integre módulos de análisis de postura, monitoreo fisiológico mediante un reloj inteligente, manejo de rutinas mediante control por voz para interacción manos libres y gestión de configuraciones. El alcance se limita al desarrollo de un prototipo demostrativo, sin contemplar la producción a escala comercial ni pruebas clínicas extensivas.

**Entregables:** Los entregables para este proyecto corresponden a:



- Prototipo físico del espejo inteligente (estructura, pantalla/carcasa, plataforma de sistemas empotrados, cámara y micrófono).
- Software empotrado con análisis de postura en tiempo real y retroalimentación visual; incluye conteo de repeticiones.
- Integración operativa con un reloj inteligente comercial para la obtención y visualización de frecuencia cardíaca.
- Control por voz funcional para manejo de rutinas predefinidas y comandos básicos de sesión (iniciar, pausar/reanudar, siguiente, finalizar).
- Mecanismo de gestión de configuraciones locales (p.ej., selección de ejercicio y parámetros básicos de operación).
- Informe final y documentación técnica que describa la arquitectura, el diseño, la implementación y el protocolo de evaluación con resultados.

**Limitaciones:** Las limitaciones para este proyecto corresponden a:

- El tiempo disponible corresponde a un semestre académico, lo que restringe la posibilidad de realizar pruebas longitudinales o estudios poblacionales amplios.
- El hardware empotrado seleccionado (Raspberry Pi) impone restricciones en cuanto a capacidad de cómputo y procesamiento en tiempo real de algoritmos avanzados de visión por computadora.
- La integración con el reloj inteligente depende de APIs abiertas, lo cual limita la compatibilidad con ciertos dispositivos comerciales y puede condicionar la estabilidad de la comunicación.
- La validación del prototipo se llevará a cabo únicamente en entornos controlados, sin que ello implique un estudio clínico ni la verificación de su eficacia en contextos diversos o prolongados.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Introducción

El presente capítulo establece el andamiaje conceptual que sustenta la propuesta de un espejo inteligente orientado al ejercicio en el hogar con procesamiento local en el dispositivo (on-device). Se articulan nociones provenientes de visión por computadora, estimación de postura y procesamiento de señales biométricas, junto con principios de arquitecturas empotradas, seguridad y experiencia de usuario. Desde una perspectiva teórica, se revisan modelos de estimación de puntos clave corporales y sus implicaciones en precisión y latencia, así como estrategias de estabilización temporal que permiten cálculos angulares y detección de eventos con mayor confiabilidad. Asimismo, se abordan fundamentos de modelos ligeros e inferencia local en plataformas con arquitectura ARM y criterios de integración con dispositivos vestibles (wearables) para obtener señales de frecuencia cardíaca bajo marcos de autorización estandarizados.

El marco incluye también lineamientos de presentación de información en pantallas ambientales (HUD) de baja carga cognitiva y control por voz de vocabulario reducido, con el fin de favorecer la atención en la tarea motora. Finalmente, se sintetizan antecedentes relevantes de soluciones comerciales, iniciativas abiertas y literatura científica sobre monitoreo postural y actividad física, a fin de ubicar la propuesta en el estado del arte y justificar, a nivel conceptual, decisiones sobre el compromiso precisión-latencia, la privacidad de los datos y el diseño de la interacción. En conjunto, estos fundamentos proporcionan la base para comprender las decisiones de arquitectura adoptadas y su pertinencia para un sistema doméstico de guía de ejercicio que combina estimación de postura en tiempo real y señales biométricas obtenidas de vestibles [1], [19].

## 2.2. Mapa conceptual

La Figura 2.1 muestra cómo se organizan los conceptos que sustentan el proyecto y cuáles son sus dependencias. En el centro se ubica el espejo inteligente con procesamiento local. A la izquierda aparecen los sistemas empotrados, que integran captura, cómputo y presentación en un mismo dispositivo. Esta cercanía reduce la latencia y evita el envío de video crudo, lo que contribuye a la protección de datos. De forma transversal, el nodo de privacidad refuerza esa idea de mantener el procesamiento en el borde, mientras que el nodo de seguridad señala el uso de OAuth 2.0 y tokens para la integración con servicios externos, limitando la información compartida y resguardando credenciales.

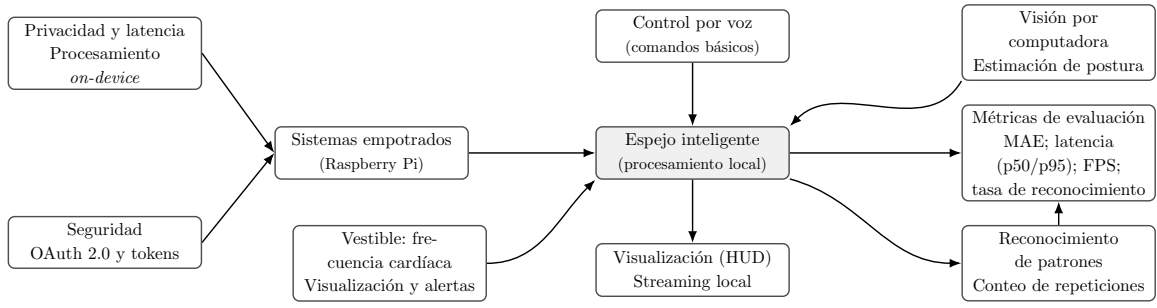
En el cuadrante superior derecho, la visión por computadora y la estimación de postura convierten cada fotograma en puntos clave y ángulos articulares. Esa información alimenta el reconocimiento de patrones, tanto para contar repeticiones como para detectar desalineaciones, siempre con estabilidad temporal [1]. A partir de ahí se desprende el bloque de métricas de evaluación, que reúne criterios como el error medio absoluto en ángulos y conteos, la latencia percibida (p50/p95), la tasa de cuadros por segundo y la precisión en el reconocimiento de eventos. Estos indicadores permiten comprobar si el prototipo cumple con los requisitos de usabilidad en tiempo real y facilitan la comparación entre modelos y configuraciones.

En el eje inferior, la señal de la frecuencia cardíaca se sincroniza con los eventos de postura para ajustar la retroalimentación durante la sesión [19]. Esa información se refleja en la visualización HUD, donde un streaming local proyecta sobre la imagen datos mínimos como repeticiones, advertencias de forma, zona de pulso o estado de la rutina. En la parte superior, el control por voz con un vocabulario reducido (iniciar, pausar, reanudar, siguiente, finalizar) permite la interacción sin perder la atención en el movimiento.

Por último, el bloque de estado del arte agrupa referentes como Samsung Smart Trainer o Peloton Guide, que demuestran el interés por la retroalimentación en tiempo real, aunque en general dentro de ecosistemas cerrados. Frente a ellos, el proyecto se plantea como una alternativa con énfasis en procesamiento local, baja latencia, protección de datos y apertura tecnológica. En conjunto, el mapa conceptual guía las decisiones de diseño y ayuda a equilibrar precisión y rendimiento bajo las limitaciones propias del cómputo en el borde.

## 2.3. Explicación y discusión de los principales elementos

Esta sección organiza los conceptos que sustentan el prototipo mostrado en el mapa conceptual: cómputo en el borde, visión por computadora en tiempo real, estimación de postura y estabilización temporal, modelos ligeros para dispositivos ARM, arquitectura de servicios y visualización, integración biométrica de un reloj inteligente mediante



**Figura 2.1:** Relaciones entre procesamiento local, visión/pose, reconocimiento de patrones, biométricos, control por voz, visualización en HUD y seguridad, y su conexión con métricas y estado del arte. Referencias: estimación de postura [1], [3], vestibles y actividad [19], [32], y ejemplos comerciales [17], [18], [23], [24].

OAuth 2.0, control por voz, principios de diseño de interfaces 'ambient' y lineamientos de seguridad y privacidad.

### 2.3.1. Sistemas empotrados y procesamiento en el borde

El cómputo en el borde sitúa adquisición, procesamiento y presentación cerca de la fuente de datos. Esta proximidad reduce la dependencia de la red, acota la variabilidad de latencia y limita la exposición de datos sensibles al evitar el envío de video crudo a terceros [25], [27]. En plataformas empotradas, el presupuesto de recursos es estricto: CPU/GPU de baja potencia, memoria limitada y restricciones térmicas; por ello, los modelos y las rutas críticas del pipeline deben ser compactos y predecibles.

Desde teoría de tiempo real, la interacción visual fluida exige que la latencia extremo a extremo por cuadro de la pantalla (frame),  $L_{e2e}$ , respete el plazo de presentación  $D$ , que para una tasa objetivo  $F_{\text{target}}$  se aproxima por

$$L_{e2e} \leq D = \frac{1}{F_{\text{target}}}. \quad (2.1)$$

Si cada cuadro requiere un tiempo de cómputo  $C$  y llega con periodo  $T = 1/F_{\text{in}}$ , la factibilidad en un procesador único se expresa mediante la utilización

$$U = \frac{C}{T} = C F_{\text{in}} \leq 1, \quad (2.2)$$

donde  $U$  es la **utilización del procesador**, es decir, la fracción de tiempo que la CPU/GPU permanece ocupada atendiendo la carga periódica durante cada intervalo  $T$ ;  $C$  representa el tiempo efectivo de cómputo por cuadro y  $F_{\text{in}}$  la tasa de entrada de cuadros. Si  $U > 1$ , se acumulan colas y aparecen pérdidas de cuadros o incrementos de latencia.

Para  $n$  tareas periódicas independientes con prioridades fijas, una cota suficiente clásica es

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \leq n(2^{1/n} - 1), \quad (2.3)$$

cuyo comportamiento asintótico converge a

$$a \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} n(2^{1/n} - 1) = \ln 2 \approx 0,693,$$

por lo que, para conjuntos grandes de tareas, la utilización total admisible se aproxima a  $a \approx 0,693$  [12]. Estas expresiones se usan aquí como guía conceptual (véase (2.1)–(2.3)), no como requisitos de planificación estricta.

En sistemas empotrados generales, muchas cargas son aperiódicas o esporádicas y se ejecutan sobre dispositivos multinúcleo; por tanto, sirven como cotas conservadoras. La asincronía y la distribución de trabajo entre núcleos reducen contención, pero la estabilidad perceptual sigue dependiendo de que las rutas críticas de captura–inferencia–presentación permanezcan ligeras. Asimismo, la visualización local (HUD o flujo en el propio dispositivo) ayuda a desacoplar la presentación y a amortiguar el jitter, entendido como la variabilidad temporal entre cuadros (fluctuaciones en la latencia o en el período de presentación) que se perciben como tirones o microcortes.

En el contexto del espejo, estos principios justifican el uso de modelos ligeros y flujos locales de visualización: mantener  $L_{e2e}$  por debajo de  $1/F_{\text{target}}$  y una utilización agregada acotada permite una experiencia estable con baja latencia, preservando además la privacidad por el procesamiento en dispositivo [25], [27].

### 2.3.2. Visión por computadora y estimación de postura

La estimación de postura por visión identifica un conjunto de puntos anatómicos (key-points) y permite derivar magnitudes cinemáticas como ángulos articulares y fases del movimiento [3]. El flujo conceptual comprende captura, preprocesamiento, inferencia del esqueleto y renderizado de superposiciones. La latencia extremo a extremo del cuadro se aproxima por la suma de tiempos de captura, preprocesamiento, inferencia y presentación:

$$\text{Latencia} \approx t_{\text{captura}} + t_{\text{preproc}} + t_{\text{inferencia}} + t_{\text{render}}, \quad (2.4)$$

de modo que los esfuerzos de optimización se orientan a reducir el costo de preprocesamiento e inferencia y a mantener una ruta de presentación ligera.

Existen diseños de modelo con distintos compromisos precisión–latencia. OpenPose formula el problema mediante campos de afinidad de partes (Part Affinity Fields), lo que ofrece buenas asociaciones entre articulaciones a costa de un requerimiento computacional elevado típico de GPU de escritorio [2]. BlazePose prioriza eficiencia en dispositivos de consumo y realiza seguimiento de 33 puntos a tasas aptas para ejecución local en plataformas con recursos limitados, con menor latencia y uso de memoria [1]. En sistemas empotrados ARM, la viabilidad práctica favorece arquitecturas ligeras y resoluciones de entrada moderadas para sostener una tasa de fotogramas estable.

Para este proyecto, este marco justifica la elección de modelos compactos y la atención a la estabilidad temporal de los puntos clave: el conteo de repeticiones y la retroalimentación

dependen de señales de postura consistentes, que más adelante se refuerzan con técnicas de suavizado temporal [1], [3].

### 2.3.3. Reconocimiento de patrones: conteo de repeticiones

El conteo de repeticiones se formula como un problema de reconocimiento de patrones sobre trayectorias cinemáticas derivadas de puntos clave (keypoints). A partir de tres puntos anatómicos ( $\mathbf{p}_a, \mathbf{p}_b, \mathbf{p}_c$ ) se define el ángulo articular en el vértice  $\mathbf{p}_b$  mediante los segmentos  $\mathbf{u} = \mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b$  y  $\mathbf{v} = \mathbf{p}_c - \mathbf{p}_b$ :

$$\theta = \arccos \left( \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}{(\|\mathbf{u}\| + \varepsilon)(\|\mathbf{v}\| + \varepsilon)} \right), \quad (2.5)$$

donde  $\theta$  se expresa en radianes y  $\varepsilon > 0$  actúa como término de seguridad para evitar inestabilidades cuando los segmentos son muy cortos. En la práctica, también es habitual construir señales a partir de distancias o alturas normalizadas por una referencia del esqueleto (por ejemplo, hombro-cadera) para lograr invariancia a escala.

Las series temporales angulares y de distancias permiten describir un ciclo motor por la sucesión de fases con máximos y mínimos locales coherentes con la técnica del ejercicio. La consistencia temporal se expresa acotando el intervalo entre hitos detectados,  $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ :

$$\Delta t_{\min} \leq \Delta t_k \leq \Delta t_{\max}, \quad (2.6)$$

con lo que se descartan detecciones espurias debidas a ruido u oscilaciones rápidas. La estabilidad de las trayectorias mejora con suavizado previo (por ejemplo, media móvil exponencial o filtro de Kalman), que reduce el jitter y favorece la separabilidad de eventos sin imponer un esquema metodológico específico [34]. El uso de umbrales con histéresis disminuye rebotes alrededor de los puntos de cambio de fase. La confiabilidad final depende de la calidad de los puntos clave; en contextos de recursos limitados, modelos eficientes de estimación de postura como BlazePose suministran señales suficientes para esta tarea con latencias bajas [1], [3].

Este marco permite definir repeticiones a partir de magnitudes angulares y reglas temporales de manera robusta y explicable, con complejidad acotada y adecuada a la ejecución local, a la vez que facilita una retroalimentación clara y estable en el HUD [3].

### 2.3.4. Vestible: frecuencia cardíaca; visualización y alertas

La señal de frecuencia cardíaca obtenida de un dispositivo vestible constituye un marcador fisiológico de la intensidad del esfuerzo y se representa como una serie temporal con muestreo y latencia dependientes del fabricante. Debido a artefactos por movimiento, perfusión y condiciones de contacto, la medición óptica presenta errores transitorios que aconsejan filtrado suave y alineación temporal con otros eventos del sistema [19], [32]. De

forma conceptual, la información se resume en zonas de intensidad relativas a la capacidad del usuario, lo que favorece decisiones de retroalimentación robustas frente a variaciones puntuales de latido a latido.

Un esquema clásico define la frecuencia objetivo mediante la fórmula de Karvonen:

$$HR_{\text{target}} = HR_{\text{rest}} + p(HR_{\text{max}} - HR_{\text{rest}}), \quad 0 < p \leq 1, \quad (2.7)$$

donde  $HR_{\text{rest}}$  es la frecuencia en reposo,  $HR_{\text{max}}$  la máxima estimada y  $p$  el porcentaje de intensidad deseada [11]. Al trabajar por zonas (por ejemplo, recuperación, aeróbica moderada y vigorosa), la interfaz evita exigir exactitud absoluta en pulsaciones por minuto y reduce la carga cognitiva.

Cuando se dispone de marcas de tiempo del proveedor, la alineación con eventos de postura se realiza conceptualmente por sincronización de sellos temporales y re-muestreo coherente, lo que mitiga desfasajes entre captura visual y adquisición cardíaca [6]. En conjunto, la combinación de zonas, filtrado leve y alineación temporal proporciona señales más estables y accionables para la guía del ejercicio [19], [32].

### 2.3.5. Control por voz (comandos básicos)

El control por voz de vocabulario reducido se fundamenta en el reconocimiento de un conjunto acotado de órdenes discretas (por ejemplo: iniciar, pausar, reanudar, siguiente, finalizar). En este escenario, la detección de actividad de voz (VAD) separa segmentos de habla del ruido de fondo y limita el procesamiento a regiones relevantes, lo que mejora la latencia y reduce falsas activaciones [28]. Sobre dichos segmentos, un modelo acústico-lingüístico decide entre un número finito de clases; al tratarse de comandos cortos y semánticamente separados, resulta viable emplear gramáticas estrictas y umbrales de decisión conservadores que prioricen bajas tasas de falsas aceptaciones frente a rechazos ocasionales [10].

La robustez frente a ruido y reverberación se aborda conceptualmente con tres ideas: i) normalización y detección de energía a nivel de enmarcado para VAD; ii) rasgos acústicos estables frente a variaciones de canal; y iii) decisiones con histéresis temporal y ventanas de confirmación para evitar rebotes cuando el entorno es ruidoso. La latencia perceptual depende del retardo de adquisición, el tiempo de decisión del VAD y el clasificador, y del esquema de terminación de la orden (por ejemplo, detección de silencio final); mantener estos componentes por debajo del presupuesto de interacción favorece una experiencia fluida.

La integración de confirmaciones breves (indicadores visuales o auditivos) ayuda a resolver ambigüedades y reduce la carga cognitiva. En conjunto, un vocabulario reducido, VAD confiable y políticas de decisión con histéresis sustentan un control manos libres estable y de baja latencia en plataformas empotradas [10], [28].

### 2.3.6. Visualización (HUD) y streaming local

La visualización tipo HUD prioriza información esencial y estable en pantalla, con codificación mínima y señales fáciles de interpretar en la periferia visual. Este enfoque reduce la carga cognitiva y favorece que la atención permanezca en la ejecución motora, en línea con los principios de computación calmada y displays ambientales [33]. Conceptualmente, separar la generación del HUD del resto del flujo ayuda a amortiguar variaciones de latencia: el render local no depende de la red y mantiene consistencia perceptual aun cuando existan fluctuaciones en captura o cómputo.

Para transportar video en un entorno local se consideran tres familias de soluciones con compromisos distintos. i) MJPEG transmite una secuencia de fotogramas JPEG sobre HTTP; su simplicidad y arranque casi inmediato permiten latencias bajas y compatibilidad amplia, a costa de mayor ancho de banda y ausencia de compresión temporal. ii) WebRTC ofrece transporte en tiempo real con cifrado, control de congestión y muy baja latencia extremo a extremo, pero requiere señalización y mayor complejidad de sesión al involucrar canales interactivos y negociación de media [31]. iii) HLS/DASH segmentan el contenido y se apoyan en HTTP para escalabilidad y adaptación de tasa; su latencia típica es de segundos, incluso en variantes de baja latencia, por lo que resultan más adecuadas para distribución a múltiples clientes que para retroalimentación inmediata en un espejo doméstico [9].

En un HUD conciso combinado con un flujo simple y de baja latencia, resulta suficiente para presentar superposiciones y estados de sesión de forma clara; alternativas de muy baja latencia orientadas a interacción remota o distribución masiva pueden considerarse cuando el alcance funcional lo justifique.

### 2.3.7. Privacidad y latencia: procesamiento on-device

El procesamiento local reduce la exposición de datos personales al evitar la transmisión de video crudo y metadatos sensibles a infraestructuras de terceros. En términos de arquitectura, aproximar adquisición, cómputo y presentación disminuye la variabilidad introducida por la red y elimina un término de transporte en la latencia extremo a extremo, que conceptualmente se suma a los componentes de captura, preprocesamiento, inferencia y renderizado como en (2.4) [25], [27]. Este enfoque se alinea con principios de minimización de datos: recolectar lo estrictamente necesario, retener por tiempo limitado y evitar persistir material identificable cuando no aporta al objetivo funcional.

El costo de esta decisión reside en operar bajo recursos de cómputo restringidos y en gestionar térmica y energía de forma prudente. No obstante, la previsibilidad temporal que se obtiene al eliminar incertidumbre de red es ventajosa para la interacción en tiempo real: las colas y retardos son locales y, por tanto, más controlables. Sobre esta base, la visualización en el propio dispositivo y la comparación conceptual con el estado del arte pueden realizarse sin externalizar contenidos sensibles, preservando la confidencialidad y



manteniendo latencias acotadas [25], [27].

### 2.3.8. Seguridad: OAuth 2.0 y manejo de tokens

El acceso a señales de frecuencia cardíaca desde servicios de reloj inteligente se fundamenta en el marco de autorización OAuth 2.0, que separa a las entidades en cliente, servidor de autorización y servidor de recursos [8]. En clientes públicos (sin secreto resguardable), el uso de Proof Key for Code Exchange introduce un desafío verificado criptográficamente entre la solicitud y el canje del código para mitigar ataques de interceptación [22]. Los permisos se acotan mediante alcances declarativos que restringen el acceso a conjuntos específicos de recursos; en esta aplicación, únicamente series temporales de frecuencia cardíaca y metadatos mínimos.

Desde una perspectiva conceptual, los tokens de acceso deben ser de corta duración y los tokens de renovación deben protegerse localmente, con rotación y revocación ante sospecha de compromiso. Las políticas del proveedor determinan la granularidad, latencia y cuotas de las series, por lo que la lógica de consumo se formula en términos de ventanas temporales y tolerancias, evitando suposiciones de sincronía perfecta [6]. Este marco permite integrar biometría con control explícito de privilegios y una superficie de ataque reducida, en coherencia con el procesamiento local y la minimización de datos [8], [22].

### 2.3.9. Métricas de evaluación: MAE, latencia (p50/p95), FPS y tasa de reconocimiento

La evaluación conceptual del sistema considera precisión geométrica, desempeño temporal y eficacia de detección. Para errores angulares sobre  $J$  articulaciones y  $T$  instantes, el error absoluto medio se expresa como

$$\text{MAE} = \frac{1}{JT} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \left| \hat{\theta}_{j,t} - \theta_{j,t} \right|, \quad (2.8)$$

donde  $\hat{\theta}_{j,t}$  es el valor estimado y  $\theta_{j,t}$  la referencia. Esta métrica es estándar en análisis postural para comparar estimaciones de modelos de visión con mediciones o anotaciones de referencia [3].

La responsividad se caracteriza por percentiles de la distribución de latencia por cuadro  $L$ : la mediana  $p50(L)$  refleja el comportamiento típico y  $p95(L)$  acota la cola de eventos lentos, más informativa que un promedio bajo colas pesadas [25]. La capacidad de procesamiento se resume con la tasa de fotogramas.

$$\text{FPS} = \frac{N_{\text{frames}}}{\Delta t}, \quad (2.9)$$

medida sobre intervalos suficientemente largos para estabilizar la estimación. Para tareas

de conteo o clasificación se emplea, además, la tasa de reconocimiento.

$$\text{Tasa de reconocimiento} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}, \quad (2.10)$$

que captura la sensibilidad a verdaderos eventos y omisiones. Conjuntamente, estas métricas permiten razonar sobre el compromiso precisión–latencia y sobre la utilidad práctica de la estimación de postura y del conteo de repeticiones en contextos de recursos limitados [3], [25].

# Capítulo 3

## Marco metodológico

### 3.1. Introducción

El presente capítulo describe la metodología de trabajo seguida para el desarrollo del prototipo de espejo inteligente orientado al bienestar físico. Se detallan los fundamentos de ingeniería, las estrategias metodológicas adoptadas y las herramientas empleadas para materializar los objetivos específicos planteados. Asimismo, se expone la secuencia de actividades y los mecanismos de verificación y validación utilizados durante el ciclo de desarrollo, con el propósito de garantizar la coherencia técnica, la reproducibilidad de los resultados y la trazabilidad entre los requerimientos iniciales y los entregables obtenidos.

### 3.2. Explicación y justificación de la estrategia metodológica

Para el desarrollo del prototipo se adoptó una estrategia iterativa e incremental, inspirada en los principios del marco ágil Scrum [26]. Esta elección responde a la naturaleza exploratoria y multidisciplinaria del proyecto, en el cual confluyen componentes de hardware embebido, visión por computadora, biometría y control por voz. A diferencia de los modelos secuenciales tradicionales (p. ej., cascada) descritos en la literatura clásica de ingeniería de software [20], [29], el enfoque iterativo permite realizar ciclos cortos de diseño, implementación y validación, lo que facilita incorporar mejoras progresivas, resolver dependencias técnicas y mantener un control continuo sobre el desempeño del sistema.

La aplicación de esta metodología se estructuró en sprints orientados a funcionalidades específicas del sistema, tales como el procesamiento de visión, la integración biométrica mediante la API de Fitbit, la interfaz HUD y el módulo de reconocimiento de voz. Cada iteración culminó con la validación funcional de los entregables y la retroalimentación necesaria para el siguiente ciclo, garantizando un avance sostenido y verificable en la construcción del prototipo.

Las principales razones que motivaron esta elección metodológica fueron las siguientes:

- **Variabilidad del entorno de hardware.** La ejecución sobre una Raspberry Pi 4B con cámara USB y monitor requiere validar de forma continua la latencia, la estabilidad y el consumo de recursos. Un ciclo iterativo facilita los ajustes de parámetros y la optimización del rendimiento sin comprometer la funcionalidad global.
- **Dependencias externas y restricciones de API.** La integración con la Fitbit Web API impone autenticación mediante OAuth 2.0 y límites de tasa de consulta. La estrategia incremental, basada en la filosofía “mock-first”, permitió avanzar en el desarrollo utilizando datos simulados cuando el acceso real a tokens o métricas intradía no estaba disponible, manteniendo así la continuidad del proyecto.
- **Integración multimodal.** El sistema combina distintas tecnologías: FastAPI para la arquitectura del backend, MediaPipe para la estimación de postura, `httpx/Requests` para la comunicación asíncrona, Vosk para el procesamiento de voz y SQLAlchemy para la persistencia de datos. El enfoque iterativo permitió integrar y verificar cada módulo de manera independiente, empleando la vista de depuración (`/debug/view`) para validar su comportamiento antes de consolidar el sistema completo.

En conjunto, la metodología ágil empleada permitió mantener un proceso flexible y controlado, adaptándose a las particularidades del desarrollo en entornos embebidos y asegurando la coherencia entre las decisiones de ingeniería y los resultados observados en el prototipo funcional.

### 3.3. Secuencia del proceso seguido

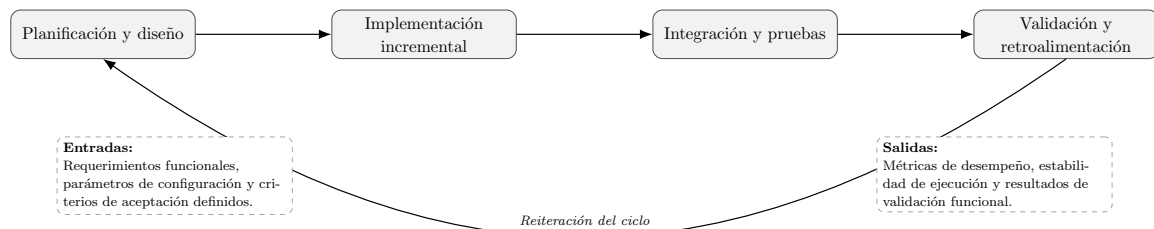
La estrategia metodológica se implementó mediante un proceso cíclico compuesto por fases iterativas de planificación, desarrollo, integración y validación. Cada ciclo tuvo como propósito consolidar un conjunto funcional del sistema, permitiendo obtener retroalimentación temprana y realizar ajustes antes de avanzar a etapas de mayor complejidad. Este enfoque favoreció la coherencia entre los objetivos específicos, los entregables parciales y la versión final del prototipo.

La Figura 3.1 ilustra la secuencia general del proceso seguido, la cual se replicó en cada iteración con los ajustes necesarios según la naturaleza del módulo abordado. A continuación, se describen las etapas principales:

1. **Planificación y diseño.** En esta fase se definieron los requerimientos funcionales y técnicos de cada componente, así como los criterios de aceptación asociados. Se establecieron los parámetros de configuración iniciales del sistema, garantizando condiciones de prueba estables y reproducibles sobre la plataforma empotrada.

2. **Implementación incremental.** Cada funcionalidad se desarrolló de manera modular, siguiendo principios de cohesión y bajo acoplamiento. Las iteraciones incluyeron tareas de codificación, documentación técnica y revisión de compatibilidad entre módulos, priorizando la mantenibilidad y la simplicidad de integración.
3. **Integración y pruebas.** Los componentes desarrollados se integraron progresivamente en el entorno embebido, verificando su interoperabilidad y el cumplimiento de los tiempos de respuesta requeridos. En esta fase se realizaron pruebas funcionales, de rendimiento y estabilidad, enfocadas en la latencia del procesamiento y el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación.
4. **Validación y retroalimentación.** Finalmente, cada ciclo concluyó con la revisión de resultados frente a los objetivos definidos. Se evaluó la coherencia entre las mediciones obtenidas y los valores esperados, identificando posibles mejoras en desempeño, consumo de recursos o precisión de las métricas. Los hallazgos de esta etapa sirvieron como base para definir los ajustes de la siguiente iteración.

Este proceso iterativo permitió obtener versiones funcionales y medibles del sistema en cada ciclo, fomentando la detección temprana de errores, la mejora continua y la trazabilidad entre las decisiones de ingeniería y los resultados alcanzados. En conjunto, la secuencia metodológica aplicada garantizó un desarrollo controlado, verificable y alineado con los principios de calidad del software y del hardware empotrado.



**Figura 3.1:** Secuencia metodológica aplicada en el desarrollo del sistema, mostrando las fases iterativas y la retroalimentación hacia nuevas iteraciones.

### 3.4. Tabla de desglose del marco metodológico

La planificación metodológica del proyecto se estructuró con base en los objetivos específicos definidos en el planteamiento del problema. Cada uno de ellos se abordó mediante un conjunto de actividades técnicas, entregables verificables, herramientas de ingeniería y estrategias de validación que permitieron asegurar el cumplimiento de los requisitos funcionales y de desempeño del prototipo.

La Tabla 3.1 presenta la correspondencia entre estos elementos, evidenciando la relación directa entre la metodología aplicada y los resultados alcanzados. Esta estructura permite mantener la trazabilidad entre los objetivos planteados y los productos tecnológicos obtenidos, además de documentar las técnicas empleadas para garantizar la confiabilidad y reproducibilidad del sistema en sus distintas etapas.

Objetivo específico	Actividades principales	Entregables	Técnicas / herramientas	Verificación y validación
OE1. Diseñar la arquitectura del sistema embebido	Definición de la estructura modular del backend y sus interfaces de comunicación.	Esquema arquitectónico documentado y entorno de ejecución configurado.	Modelado de servicios REST, control de dependencias y registro de eventos.	Pruebas de conectividad, validación de endpoints y revisión de trazas de operación.
OE2. Implementar el módulo de visión y estimación de postura	Desarrollo del flujo de captura, inferencia y visualización de resultados.	Prototipo funcional del subsistema de visión y su interfaz visual (HUD).	Procesamiento de video, estimación de pose y generación de superposiciones gráficas.	Evaluación de latencia, estabilidad de visualización y validación visual de resultados.
OE3. Integrar la biometría de frecuencia cardíaca	Implementación de la comunicación con el dispositivo vestible y sincronización de datos.	Subsistema biométrico integrado al entorno del prototipo.	Autenticación segura, transferencia de datos y almacenamiento temporal.	Comparación de valores de frecuencia cardíaca frente al dispositivo de referencia.
OE4. Incorporar el control por voz y manejo de sesión	Diseño del conjunto de comandos y su integración con las funciones del sistema.	Módulo de control por voz y registro de sesiones de usuario.	Reconocimiento de voz local, gestión de sesiones y eventos de control.	Validación funcional en entorno controlado y revisión de registros de activación.
OE5. Validar el desempeño integral en la plataforma embebida	Pruebas de carga, consumo de recursos y estabilidad del sistema.	Versión final del prototipo ejecutada en Raspberry Pi con documentación técnica.	Monitoreo de latencia, consumo energético y eficiencia del procesamiento local.	Ejecuciones prolongadas, registro de métricas y comparación con parámetros esperados.

**Tabla 3.1:** Desglose metodológico por objetivo específico.

El desglose evidencia que cada etapa del desarrollo se abordó con un enfoque sistemático y verificable. La integración progresiva de los módulos permitió validar la funcionalidad

en condiciones reales de ejecución, mientras que la combinación de pruebas controladas y observación experimental garantizó la consistencia de los resultados. En conjunto, esta planificación metodológica refleja la aplicación de principios de ingeniería orientados a la confiabilidad, eficiencia y cumplimiento de los objetivos propuestos.

# Capítulo 4

## Descripción del trabajo realizado

a. Para facilitar la lectura de este capítulo se recomienda dividir el capítulo en dos secciones: proceso de solución aplicado y análisis de los resultados. b. Para la sección de proceso de solución, se recomienda dividir por la cantidad de objetivos específicos. De esta manera, en cada subsección (relacionada al objetivo específico) se detallan todas las decisiones tomadas, pasos seguidos y aplicación de los principios de ingeniería para desarrollar el objetivo específico. Importante: no mezclar con resultados. c. Para la sección de análisis de los resultados, se recomienda dividir por la cantidad de objetivos específicos. De esta manera, en cada subsección (relacionada al objetivo específico) se muestra el resultado de los pasos que se indicaron en la sección anterior. Importante: no solo es colocar resultados (tipo bitácora), sino que se debe explicar con detalle cada una de las figuras. Se debe evidenciar el cumplimiento del objetivo.



# Capítulo 5

## Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presenta un resumen con los descubrimientos más relevantes del proyecto realizado, mediante las conclusiones y recomendaciones que nacen de la experiencia obtenida. Debe reflejar de forma contundente y ordenada si se lograron los objetivos propuestos y si se cumplieron los entregables que se habían definido en el Ing. en Computadores Página 31 anteproyecto. Además, debe mostrar aquellos hallazgos que se consideran relevantes como experiencia que deja en el proyecto desde la perspectiva de la práctica ingenieril. En lo que respecta a las recomendaciones, se deben incluir los aspectos en que no se ahondó en el estudio, pero que se consideran relevantes y quedaron como trabajos futuros, así como otras recomendaciones que el estudiante considere importantes para la continuación y aprovechamiento de los resultados obtenidos con su proyecto.

### RECOMENDACIONES

a. Se recomienda dividir en dos secciones: conclusiones y recomendaciones. b. Se debe colocar una conclusión por cada objetivo específico. c. Además de evidenciar el logro o no del objetivo, debe indicar qué se generó a partir de esto. d. Recordar que las conclusiones no son un listado de logros, sino que deben mostrar el conocimiento adquirido.

# Bibliografía

- [1] V. Bazarevsky, I. Grishchenko, K. Raveendran, T. Zhu, F. Zhang y M. Grundmann, *BlazePose: On-device Real-time Body Pose Tracking*, <https://arxiv.org/abs/2006.10204>, Consultado el 13 de octubre de 2025, 2020.
- [2] Z. Cao, T. Simon, S.-E. Wei e Y. Sheikh, «Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields,» en *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017.
- [3] T. Chen, F. Pu e Y. Li, «Posture recognition and correction technologies: State of the art and future challenges,» *IEEE Access*, vol. 9, págs. 123 645-123 658, 2021.
- [4] I. T. de Costa Rica, *Historia del Tecnológico de Costa Rica*, 2023. dirección: <https://www.tec.ac.cr/historia>.
- [5] T. Escuela de Ingeniería en Computadores, *Plan de estudios de Ingeniería en Computadores*, 2023. dirección: <https://www.tec.ac.cr/ingenieria-computadores>.
- [6] Fitbit Developers, *Fitbit Web API*, 2024. dirección: <https://dev.fitbit.com/build/reference/web-api/>.
- [7] R. Guthold, G. A. Stevens, L. M. Riley y F. C. Bull, «Worldwide trends in insufficient physical activity from 2001 to 2016: a pooled analysis of 358 population-based surveys with 1.9 million participants,» *The Lancet Global Health*, vol. 6, n.º 10, e1077-e1086, 2018.
- [8] D. Hardt, *The OAuth 2.0 Authorization Framework*, IETF RFC 6749, 2012. dirección: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6749>.
- [9] A. Inc., *HTTP Live Streaming*, IETF RFC 8216, 2017. dirección: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8216>.
- [10] D. Jurafsky y J. H. Martin, *Speech and Language Processing*, 3rd ed. (draft). Prentice Hall, 2023, Capítulos de reconocimiento de voz y modelos acústicos.
- [11] M. J. Karvonen, E. Kentala y O. Mustala, «The Effects of Training on Heart Rate,» *Annales Medicinæ Experimentalis et Biologiae Fenniae*, vol. 35, págs. 307-315, 1957.
- [12] C. L. Liu y J. W. Layland, «Scheduling Algorithms for Multiprogramming in a Hard-Real-Time Environment,» *Journal of the ACM*, vol. 20, n.º 1, págs. 46-61, 1973.

- [13] MichMich and contributors, *MagicMirror<sup>2</sup>*, 2024. dirección: <https://magicmirror.builders/>.
- [14] W. H. Organization, *Global action plan on physical activity 2018–2030: More active people for a healthier world*, 2018. dirección: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241514187>.
- [15] W. H. Organization, *Physical activity*, 2020. dirección: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity>.
- [16] W. H. Organization, *Physical Activity Profile 2022: Costa Rica*, 2022. dirección: <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/country-profiles/physical-activity/physical-activity-cri-2022-country-profile.pdf>.
- [17] Peloton Interactive, Inc., *Peloton Introduces Peloton Guide, First Connected Strength Product*, 2021. dirección: <https://investor.onepeloton.com/news-releases/news-release-details/peloton-introduces-peloton-guide-first-connected-strength>.
- [18] Peloton Interactive, Inc., *Getting to Know Peloton Guide*, 2022. dirección: <https://www.onepeloton.com/press/articles/peloton-guide-available>.
- [19] L. Piwek, D. A. Ellis, S. Andrews y A. Joinson, «The rise of consumer health wearables: Promises and barriers,» *PLOS Medicine*, vol. 13, n.º 2, e1001953, 2016.
- [20] R. S. Pressman y B. R. Maxim, *Ingeniería del Software: Un enfoque práctico*, 9.ª ed. McGraw-Hill, 2020.
- [21] J. Reed, G. Buck, C. Kennett y A. Khan, «The effects of regular exercise on mental health outcomes,» *Canadian Journal of Psychiatry*, vol. 60, n.º 2, págs. 45-52, 2015.
- [22] N. Sakimura, J. Bradley, M. Jones, B. de Medeiros y C. Mortimore, *Proof Key for Code Exchange by OAuth Public Clients*, IETF RFC 7636, 2015. dirección: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7636>.
- [23] Samsung Newsroom, *Samsung Introduces Latest Innovations for a Better Normal at CES 2021*, 2021. dirección: <https://news.samsung.com/us/samsung-ces-2021-latest-innovations-for-a-better-normal/>.
- [24] Samsung Newsroom UK, *Samsung Health: Smart Trainer provides feedback on form and counts reps*, 2021. dirección: <https://news.samsung.com/uk/samsung-health-brings-workouts-and-mindfulness-activities-to-another-level-with-seamless-connectivity-and-personalised-programmes>.
- [25] M. Satyanarayanan, «The Emergence of Edge Computing,» *Computer*, vol. 50, n.º 1, págs. 30-39, 2017.
- [26] K. Schwaber y J. Sutherland, *The Scrum Guide: The Definitive Guide to Scrum*, <https://scrumguides.org/>, 2020.
- [27] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li y L. Xu, «Edge Computing: Vision and Challenges,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, n.º 5, págs. 637-646, 2016.

- [28] J. Sohn, N. S. Kim y W. Sung, «A Statistical Model-Based Voice Activity Detection,» *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 6, n.º 1, págs. 1-3, 1999.
- [29] I. Sommerville, *Software Engineering*, 10.<sup>a</sup> ed. Pearson, 2016.
- [30] W. Tao, T. Liu, R. Zheng y H. Feng, «Gait analysis using wearable sensors,» *Sensors*, vol. 12, n.º 2, págs. 2255-2283, 2012.
- [31] W3C, *WebRTC 1.0: Real-Time Communication Between Browsers*, <https://www.w3.org/TR/webrtc/>, W3C Recommendation, 2021.
- [32] R. Wang et al., «Smartphone and Wearable Technology to Monitor Physical Activity and Health: A Systematic Review,» *Journal of Medical Internet Research*, vol. 21, n.º 2, e120, 2019.
- [33] M. Weiser, «The Computer for the 21st Century,» *Scientific American*, vol. 265, n.º 3, págs. 94-104, 1991.
- [34] G. Welch y G. Bishop, «An Introduction to the Kalman Filter,» University of North Carolina at Chapel Hill, inf. téc. TR 95-041, 2006.
- [35] G. Yang, J. Deng, G. Pang, H. Zhang, J. Li y Z. Pang, «An IoT-enabled smart health system for posture monitoring using wearable sensors,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, n.º 6, págs. 5303-5316, 2020.

# Apéndice A

## Demostración del teorema de Nyquist

El título anterior es solo un ejemplo ilustrativo. Éste teorema no ameritaría un apéndice pues es parte normal del currículum de Electrónica, pero apéndices usualmente involucran aspectos de esta índole, que se salen de la línea de la tesis, pero que es conveniente incluir por completitud.

Los anexos contienen toda información adicional que se considere pertinente agregar, como manuales de usuario, demostraciones matemáticas que se salen de la línea principal de la tesis, pero que pueden considerarse parte de los resultados del trabajo.