

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Desarrollo de una solución tecnológica para la detección y notificación de caídas
utilizando TinyML
TECH-356

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Ciencias de la Computación

Presentado por:

Alan Xavier Barco Gaspar

Paul Mauricio Gudiño Pacha

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi familia, por su apoyo y cariño incondicional. A mi madre, Guadalupe Gaspar, por su amor inquebrantable, y por ser un verdadero modelo de fortaleza y dedicación. A mi padre, Darío Barco, por su cariño y aliento incesantes, que me han impulsado siempre hacia adelante. A mi hermano, Sebastián, por ser una fuente de inspiración y por el apoyo constante que me brinda. A mis amigos de la universidad, por compartir conmigo momentos inolvidables y hacer de esta etapa una experiencia mucho más enriquecedora y divertida.

Alan Xavier Barco Gaspar

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi abuela, quien con su apoyo y sabiduría me ha acompañado en cada paso. A mi prima, por ayudarme a ingresar a la universidad y estar siempre a mi lado cuando más la he necesitado. Y a mi madre, cuya paciencia y constante apoyo han sido fundamentales para superar cada obstáculo en mi camino. Su amor y fe en mí me han impulsado a alcanzar mis metas. A ellas, mi inspiración y fortaleza, les dedico con gratitud este trabajo

Paul Mauricio Gudiño Pacha

Agradecimientos

Le doy gracias a Dios por brindarme la fortaleza y la energía necesaria para culminar esta etapa de mi vida. A mi familia por ser mi motor de vida. A Claudia, por su valiosa colaboración en la ejecución del proyecto. A mi prima Paula cuyos consejos fueron fundamentales durante mi tiempo en la universidad. Finalmente, agradezco a todos los docentes que desempeñaron un papel crucial en mi formación académica, en especial al Mgstr. Ronald Criollo por su constante apoyo y motivación a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Alan Xavier Barco Gaspar

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a Mgst. Ronald Criollo, por su invaluable ayuda que mantuvieron el proyecto en el camino correcto. Agradezco también la confianza y la oportunidad que me brindó para participar en este y otros proyectos bajo su liderazgo, lo cual ha sido fundamental para mi crecimiento profesional.

Paul Mauricio Gudiño Pacha

Declaración Expresa

Nosotros **Paul Mauricio Gudiño Pacha** y **Alan Xavier Barco Gaspar** acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 21 de septiembre de 2024.

Paul Mauricio Gudiño Pacha

Alan Xavier Barco Gaspar

Evaluadores

Ronald Raúl Criollo Bonilla

Profesor de Materia

Ronald Raúl Criollo Bonilla

Tutor de proyecto

Resumen

Las caídas representan un riesgo significativo para la salud, especialmente entre personas mayores y aquellos con condiciones médicas, donde una respuesta tardía puede tener consecuencias graves. Este proyecto se enfoca en desarrollar una solución tecnológica para la detección y notificación de caídas, con el objetivo de ofrecer una respuesta rápida en situaciones de emergencia. Se plantea la hipótesis de que el uso de TinyML en dispositivos portátiles puede mejorar la precisión y rapidez en la detección de caídas, justificando así su implementación en sistemas de emergencia. Para el desarrollo, se utilizó el microcontrolador Xiao Sense Seeed, seleccionada por su tamaño y capacidad para almacenar modelos de inteligencia artificial. Se creó un conjunto de datos propio para entrenar un modelo de detección de caídas, que fue implementado en el dispositivo. Este se alojó junto a una batería recargable en una carcasa impresa en 3D, y se sujeta al bíceps mediante una correa ajustable. Además, se integró un modelo de inteligencia artificial en un microcontrolador adicional para el reconocimiento de una palabra clave, permitiendo al usuario activar manualmente el sistema de emergencia en situaciones críticas. El modelo alcanzó una efectividad del 76%, y la notificación mediante la aplicación móvil fue eficaz para enviar alertas a un servicio de emergencias preestablecido.

Palabras clave: Xiao Sense Seeed, Inteligencia Artificial, alerta de emergencia, seguridad.

Abstract

Falls represent a significant health risk, especially among older people and those with medical conditions, where a delayed response can have serious consequences. This project focuses on developing a technological solution for fall detection and notification, with the aim of offering a rapid response in emergency situations. It is hypothesized that the use of TinyML in wearable devices can improve the accuracy and speed of fall detection, thus justifying its implementation in emergency systems. For the development, the Xiao Sense Seeed microcontroller was used, selected for its size and capacity to store artificial intelligence models. A proprietary dataset was created to train a fall detection model, which was implemented in the device. This was housed together with a rechargeable battery in a 3D printed housing, and was attached to the biceps by an adjustable strap. In addition, an artificial intelligence model was integrated into an additional microcontroller for the recognition of a keyword, allowing the user to manually activate the emergency system in critical situations. The model achieved 76% effectiveness, and notification via the mobile app was effective in sending alerts to a pre-established emergency service.

Keywords: Xiao Sense Seeed, Artificial Intelligence, emergency alert, security.

Índice de contenido

Resumen	I
Abstract	II
Índice de tablas.....	V
Índice de figuras	VI
Abreviaturas	VII
Simbología	VIII
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del Problema	2
1.3 Justificación del Problema	3
1.4 Objetivos.....	4
<i>1.4.1 Objetivo general</i>	4
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i>	4
1.5 Marco teórico.....	5
1.5.1 Lesiones por caídas	5
1.5.2 Detectores de caídas	6
1.5.3 Microcontroladores	7
1.5.4 TinyML	9
1.5.5 Edge Impulse.....	9
Capítulo 2	2
2. Metodología.....	12
2.1.1 Análisis.....	12
2.1.2 Prototipado	18
2.1.3 Evaluación.....	23
2.2 Diseño de la solución.....	24

2.2.1	Arquitectura.....	24
2.2.2	Diagramas.....	27
Capítulo 3.....		12
3.	Resultado y análisis.....	31
3.1	Plan de Implementación	31
3.2	Pruebas.....	34
3.2.1	Pruebas de movimiento:	34
3.2.2	Pruebas de reposo:.....	34
3.2.3	Pruebas de caída:	34
3.2.4	Pruebas de alcance con obstáculos:.....	35
3.2.5	Pruebas de alcance sin obstáculos:.....	35
3.2.6	Pruebas de interacción del usuario con la aplicación Detfall:.....	35
3.2.7	Pruebas de tiempo de envío:.....	35
3.2.8	Pruebas de duración de la batería.....	36
3.3	Resultados.....	36
3.4	Análisis de Costos	38
3.4.1	Desglose de costos	38
Capítulo 4.....		31
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	41
4.1	Conclusiones.....	41
4.2	Recomendaciones	42
Apéndice.....		45
Manual de usuario.....		45

Índice de tablas

Tabla 1	Comparación de características entre los microcontroladores ESP32 + MPU6050, Nicla Voice y Seeed nRF52840 Sense	8
Tabla 2	Dispositivo TinyML	12
Tabla 3	Comunicación bluetooth	12
Tabla 4	Reconocimiento de caída.....	13
Tabla 5	Aplicación Móvil.....	13
Tabla 6	Integración con API externa.....	13
Tabla 7	Comunicación Wi-Fi.....	14
Tabla 8	Alerta con sonido	14
Tabla 9	Autonomía y duración de la batería	15
Tabla 10	Tiempo de respuesta.....	15
Tabla 11	Interfaz de usuario.....	16
Tabla 12	Integración con sensores externos.....	16
Tabla 13	Desglose de costos	39

Índice de figuras

Figura 1	<i>Prototipado del dispositivo</i>	18
Figura 2	<i>Pruebas con un ESP32</i>	19
Figura 3	<i>Pruebas con el Nicla Voice</i>	20
Figura 4	<i>Pruebas con Seeed Xiao nRF52840 Sense</i>	21
Figura 5	<i>Aplicación móvil de Sacha</i>	22
Figura 6	<i>Recolección de datos</i>	24
Figura 7	<i>Creación de impulso</i>	25
Figura 8	<i>Modelo inteligencia artificial</i>	26
Figura 9	<i>Caso de uso: Dispositivo portable.</i>	27
Figura 10	<i>Caso de uso: Aplicación Móvil</i>	28
Figura 11	<i>Diagrama de secuencia</i>	29
Figura 12	<i>Diagrama conceptual</i>	29
Figura 13	<i>Fase de análisis del proyecto</i>	31
Figura 14	<i>Fase de desarrollo del proyecto</i>	32
Figura 15	<i>Fase de pruebas del proyecto</i>	33
Figura 16	<i>Fase de finalización del proyecto</i>	33
Figura 17	<i>Resultados del modelo para detección de caídas</i>	36
Figura 18	<i>Versión final del dispositivo</i>	38

Abreviaturas

API Application Programming Interface

BLE Bluetooth Low Energy

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

GPS Global Positioning System

RAM Random Access Memory

SRAM Static Random Access Memory

TIYNML Tiny Deep Learning

USB Universal Serial Bus

WIFI Wireless Fidelity

Simbología

V Voltios

MHz Megahertzios

Mm Milímetros

MB Megabytes

KB Kilobytes

mAh Miliamperios-hora

Capítulo 1

1.1 Introducción

Las caídas representan un riesgo para personas de diferentes edades que realizan diferentes actividades diarias. Aunque suele considerarse como incidentes menores, pueden tener graves consecuencias, especialmente si la persona pierde el conocimiento o no se encuentra en la capacidad de pedir ayuda. En situaciones donde alguien puede encontrarse sin gente alrededor, la capacidad de comunicarse para obtener ayuda se vuelve crucial. Sin embargo, puede no ser posible, dejando a la persona en una situación crítica.

Actualmente, las soluciones disponibles para detectar caídas son costosas, lo que limita su accesibilidad para quienes más lo necesitan. Es por ello, que es fundamental desarrollar una manera efectiva de alertar sobre una caída, especialmente cuando la persona no puede hacerlo por sí misma debido a su estado físico. Se necesita un sistema que pueda identificar automáticamente una caída y enviar una señal de emergencia a un contacto de confianza, ofreciendo una respuesta oportuna que podría ser vital para salvaguardar la salud.

Por lo tanto, se propone desarrollar un dispositivo que cumpla con estas necesidades. Este dispositivo sería portable, fácil de usar, económico y capaz de distinguir entre movimientos normales y una caída real, lo que evitaría alertas innecesarias. Además, debe tener una forma segura y efectiva para comunicarse con los servicios de emergencia o con un contacto seleccionado previamente por el usuario.

1.2 Descripción del Problema

La prevención de caídas en personas mayores es un tema crítico en la salud y el bienestar de la población. Se estima que cada año fallecen por caídas alrededor de 648.000 personas en el mundo, de las cuales más del 80% se encuentran en países de ingresos bajos y medianos. Los adultos mayores de 60 años son los que sufren el mayor número de caídas mortales.[1]

Las caídas pueden ocurrir en varias situaciones habituales. Por ejemplo, una persona puede caerse mientras está realizando ciclismo sin que se encuentre nadie cerca para asistirle. De igual manera, un corredor puede experimentar un calambre repentino y no obtener ayuda de manera inmediata. En ambos casos, las víctimas de caídas se enfrentan a la posibilidad de esperar a que alguien pase por casualidad para brindarles asistencia o intentar alcanzar su dispositivo móvil para contactar a alguien. Sin embargo, dicha espera o necesidad de manipular un dispositivo puede resultar en una pérdida de tiempo significativa, especialmente si se encuentran en un entorno peligroso o si sufren de lesiones graves.

Las caídas pueden conllevar graves consecuencias para personas de todas las edades, por lo que es fundamental desarrollar soluciones que permitan detectarlas. Por lo general, estas soluciones se implementan con algoritmos de inteligencia artificial (IA). Sin embargo, actualmente no se encuentra una variedad de opciones de detectores de caídas, y los disponibles en el mercado suelen tener un costo elevado. La falta de disponibilidad y asequibilidad limita la adopción de tecnologías que pueden salvar vidas y resguardar la seguridad humana.

La ausencia de asistencia inmediata en situaciones de caídas no solo pone en riesgo la vida de las personas, sino que también puede empeorar las lesiones y retrasar la recuperación. Por ello, es importante desarrollar soluciones eficaces y accesibles que permitan la detección oportuna y notificación ante estos incidentes, garantizando así una mayor calidad de vida.

1.3 Justificación del Problema

La detección y notificación oportuna de caídas es esencial para garantizar la calidad humana en términos de seguridad y el bienestar, especialmente aquellos que son más susceptibles a lesiones graves, como los adultos mayores o personas con discapacidades físicas. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de detección disponibles en el mercado, como el Apple Watch[2] u otros sensores dedicados[3], presentan una barrera significativa debido a sus precios elevados.

Uno de los principales desafíos que se enfrenta es el alto costo asociado con estos dispositivos detectores de caídas. Por ejemplo, los sensores especializados que se encuentran en el mercado pueden superar los 150 dólares, lo que los hace inaccesibles para muchas personas, especialmente aquellas con recursos económicos limitados o que viven en regiones donde el acceso a estas tecnologías es restringido.

Esta disparidad en el acceso a soluciones de detección de caídas plantea un problema significativo, ya que deja a muchas personas sin la protección necesaria para responder de manera rápida y efectiva ante una situación de emergencia. Las consecuencias de esta falta de acceso pueden ser graves, incluyendo retrasos en la atención médica o la incapacidad de recibir ayuda en situaciones críticas.

Por lo tanto, es esencial buscar alternativas que sean más económicas y estén en el alcance de un amplio abanico de usuarios. En este sentido, la tecnología TinyML ofrece una oportunidad única, ya que permite implementar algoritmos de detección de caídas en dispositivos de bajo costo y consumo de energía.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un dispositivo portable para la notificación de alerta al detectar una caída utilizando TinyML.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar un conjunto de datos con información de acelerómetro en movimientos cotidianos incluyendo caídas.
2. Desarrollar un modelo de reconocimiento de patrones de aceleración en los movimientos utilizando técnicas de inteligencia artificial

3. Entrenar el modelo utilizando el conjunto de datos para identificar los patrones del acelerómetro en los diferentes movimientos.
4. Desplegar el modelo entrenado en un microcontrolador.
5. Desarrollar una aplicación móvil para la comunicación con el dispositivo y envío de alerta.
6. Ejecutar pruebas para validar el funcionamiento del dispositivo.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Lesiones por caídas

Aunque las estadísticas varían entre países, las caídas representan un problema grave a nivel mundial. Esto se debe a factores como la distribución de la población, las medidas de prevención de caídas, el estilo de vida y la cultura de cada región.

El 71% de las caídas tienen un impacto físico, con un 7.7% de este resultando en fractura de hueso o una lesión grave, y un 21.7% requiriendo asistencia médica. Estos accidentes pueden provocar grandes períodos de inmovilidad en el suelo y, además de las lesiones físicas, pueden tener consecuencias psicosociales graves.[2] A menudo, las personas experimentan miedo a caer nuevamente o sienten vergüenza. A largo plazo, estos factores conducen a una reducción de las actividades físicas diarias, lo que, aparte de hacerlas más dependientes, las hace aún más vulnerables.

El impacto económico de las caídas es notable. Representan una carga financiera directa tanto para el sistema sanitario como para las familias.[3]. Factores como la prolongación de la estancia hospitalaria, la rehabilitación y los cuidados a largo plazo incrementan el costo. Además, se generan costos indirectos debidos a la disminución de la calidad de vida, la dependencia y la necesidad de cuidados continuos.

1.5.2 Detectores de caídas

Los detectores de caídas son dispositivos modernos que emplean sensores de acelerómetro y giroscopio para detectar cambios en la aceleración y la orientación del sujeto en los tres ejes espaciales. Estos sensores funcionan conjuntamente para proporcionar una monitorización precisa y en tiempo real de los movimientos del usuario, lo que permite identificar caídas que pueden ser peligrosas.

El acelerómetro mide la aceleración lineal del movimiento del cuerpo en todas las direcciones, lo que permite detectar cambios repentinos de velocidad. Por otro lado, el giroscopio mide la velocidad angular y la orientación, proporcionando datos sobre la rotación del cuerpo. La combinación de estos parámetros permite a los algoritmos de inteligencia artificial del detector de caídas distinguir entre actividades normales y movimientos que podrían indicar una caída, como un desplome repentino seguido de un impacto.

Los conjuntos de datos son esenciales para el desarrollo y la evaluación de algoritmos en el campo de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático. Proporcionan los datos que se necesitan para entrenar modelos, validar su rendimiento y garantizar su robustez en distintas situaciones. En el contexto de la detección de caídas, los conjuntos de datos permiten simular condiciones reales y recopilar datos sobre distintos tipos de caídas y actividades cotidianas, lo que resulta crucial para desarrollar sistemas precisos y fiables. El conjunto de datos SisFall[4], en particular, es un recurso valioso para la investigación de la detección de caídas, ya que contiene una gran variedad de caídas simuladas y actividades cotidianas registradas con sensores de aceleración y giroscopios. Utilizando SisFall, los desarrolladores pueden evaluar y perfeccionar sus sistemas en condiciones controladas antes de implantarlos en el mundo real, lo que les permite asegurarse de que proporcionan alertas precisas y oportunas para la asistencia inmediata a las personas víctimas de caídas.

Los detectores de caídas son habitualmente dispositivos pequeños y portátiles diseñados para que el usuario los porte con comodidad. Entre las formas más habituales están las pulseras, los collares, los clips para la ropa y los integrados en smartwatches.[5] [6]. En la universidad de Adamson, en Filipinas, se desarrolló el proyecto ICFY, un detector de caídas implementado con ESP32 CAM más el sensor MPU 6050 creando un dispositivo portátil que monitorea y detecta caídas en adultos mayores proporcionando alertas mediante SMS, alarmas sonoras y capturas de imágenes para asistencia inmediata. Este enfoque no solo busca mejorar la respuesta a caídas, sino también aumentar la comodidad y la aceptación del usuario, utilizando materiales como silicona y algodón para las correas del dispositivo[7].

El presente proyecto emplea un microcontrolador avanzado con capacidades de comunicación Bluetooth, lo que permite al dispositivo comunicarse con una aplicación móvil para enviar notificaciones inmediatamente en caso de que se detecte una caída. Este sistema de comunicación asegura que los usuarios o sus cuidadores reciban alertas en tiempo real, posibilitando una respuesta rápida y eficaz. Además, el dispositivo está equipado con una batería recargable, que permite autonomía y elimina la necesidad de sustituir constantemente la batería. Gracias a su diseño compacto y ligero, el dispositivo es portátil y no supone ninguna molestia para el usuario, lo que mejora notablemente su aceptación y comodidad durante el uso diario. La combinación de estas características garantiza que el dispositivo no sólo sea eficaz en la detección de caídas, sino también práctico y cómodo para el usuario final.

1.5.3 Microcontroladores

Los microcontroladores son circuitos integrados que incorporan memoria RAM, memoria flash, procesadores, periféricos y puertos, y funcionan como microordenadores de pequeño tamaño con capacidad para ejecutar diversas funciones específicas según los programas cargados en su memoria.[8]. La RAM ofrece almacenamiento temporal para datos y variables durante la ejecución

del programa, mientras que la memoria flash almacena el código del programa de forma permanente. Los periféricos y puertos permiten la interacción con otros dispositivos externos, como sensores y actuadores, haciendo posible una amplia gama de aplicaciones que van desde la automatización industrial y los electrodomésticos hasta los dispositivos médicos y la electrónica de consumo. Gracias a su gran capacidad para realizar con eficacia tareas precisas y repetitivas, los microcontroladores son esenciales en el desarrollo de sistemas embebidos, ya que ofrecen una solución rentable y energéticamente eficaz, indispensable en la tecnología moderna.

Entre los microcontroladores existentes para calcular los valores de frecuencia de los acelerómetros se encuentran los que se indican en la Tabla 1, la cual contiene toda la información relevante:

Tabla 1

Comparación de características entre los microcontroladores ESP32 + MPU6050, Nicla Voice y Seeed nRF52840 Sense

Características	ESP32 + MPU6050	Nicla Voice	Seeed XIAO nRF52840 Sense
Memoria Flash	-	512 KB	1MB
Memoria RAM	520 KB SRAM	64 KB SRAM	256 KB RAM
Procesador	Xtensa single-/dual-core 32 bits (240MHz)	ARM Cortex-M4F (64MHz)	nRF52840 M4F@64MHz
Dimensiones	51 x 23 x 8 mm	22,86 x 22,86 mm	21 x 17.5 mm
Comunicación inalámbrica	Bluetooth 4.2 BR/EDR	ANNA-B112 Bluetooth® Module	Bluetooth 5.0 / BLE

		IMU 6-axis (BMI270)	
	Acelerómetro y giroscopio	con acelerómetro y	
	de 3 ejes	giroscopio 3 ejes,	
Sensores	(MPU6050)	Magnetómetro 3 ejes	IMU, Micrófono
integrados		(BMM150),	
		Micrófono de alta	
		calidad (IM69D130).	

Nota. Información extraído de [9] [10] [11] [12]

1.5.4 TinyML

TinyML consta de la integración de modelos de inteligencia artificial en microcontroladores, lo que permite la ejecución de algoritmos complejos en entornos con limitación de recursos. Estos modelos están diseñados para operar con menor potencia de procesamiento, memoria y consumo de energía.[13].

La principal ventaja de TinyML radica en su alta eficiencia, que posibilita soluciones inteligentes en un tiempo casi real. Esto es de gran utilidad en situaciones en las que el tiempo de respuesta y la conectividad son cruciales, como en dispositivos del Internet de las Cosas, monitores de salud, sensores industriales, dispositivos *wearables*, entre otros. Por ejemplo, un detector de caídas que utilice TinyML puede analizar los datos del acelerómetro en tiempo real para detectar caídas de forma inmediata y precisa, sin la necesidad de conectarse a Internet.[14].

1.5.5 Edge Impulse

Edge Impulse es una plataforma en donde se facilita el proceso de desarrollo de modelos de TinyML para microcontroladores[15]. Entre las principales características que tiene esta plataforma destacan:

- **Recopilación de datos:** La plataforma permite la recopilación de datos mediante la conexión de cualquier dispositivo, ya sea un microcontrolador u otro hardware, y también

permite la exportación de datos para su posterior procesamiento y el entrenamiento de modelos de aprendizaje automático (ML), todo ello sin necesidad de escribir código.

- **Configuración de Modelos:** Los usuarios pueden seleccionar configuraciones adecuadas para los bloques de aprendizaje, denominados "impulsos", que entrenan el modelo según las capacidades del dispositivo de destino.
- **Optimización Automática:** Edge Impulse ajusta automáticamente los modelos para su ejecución en hardware específico, garantizando un rendimiento óptimo.
- **Despliegue de Modelos:** Los modelos entrenados pueden ser desplegados directamente en una amplia gama de plataformas de hardware, incluyendo microcontroladores, placas de desarrollo y sistemas embebidos, lo que facilita su integración en aplicaciones de TinyML.

Edge impulse es útil para desarrollar modelos que identifican patrones de movimiento asociados a las caídas. Estos modelos pueden entrenarse con datos recopilados por sensores como el acelerómetro y el giroscopio.

Capítulo 2

2. Metodología.

2.1.1 Análisis

2.1.1.1 Requerimientos

2.1.1.1.1 Requerimientos Funcionales

Tabla 2

Dispositivo TinyML

Requerimiento funcional N°	RQF01
Tipo	Producto
Prioridad	Alta
Descripción	El dispositivo TinyML tendrá almacenado un modelo de inteligencia artificial con el cual permitirá la detección de caídas.

Nota. Autoría propia.

Tabla 3

Comunicación bluetooth

Requerimiento funcional N°	RQF02
Tipo	Producto
Prioridad	Alta
Descripción	El dispositivo TinyML debe ser capaz de establecer una conexión Bluetooth, para comunicarse con otros dispositivos o sistemas.

Nota. Autoría propia.

Tabla 4
Reconocimiento de caída

Requerimiento funcional N°	RQF03
Tipo	Producto
Prioridad	Alta
Descripción	El dispositivo TinyML debe ser capaz de detectar cuando el usuario sufre una caída y enviar una señal a un dispositivo móvil mediante Bluetooth.

Nota. Autoría propia.

Tabla 5
Aplicación Móvil

Requerimiento funcional N°	RQF04
Tipo	Organizacional
Prioridad	Media
Descripción	La aplicación móvil podrá comunicarse con el dispositivo Tiny ML a través de Bluetooth. Además, esta aplicación deberá ser intuitiva y fácil de usar.

Nota. Autoría propia.

Tabla 6
Integración con API externa

Requerimiento funcional N°	RQF05
Tipo	Producto

Prioridad	Media
Descripción	La aplicación móvil debe ser capaz de comunicarse con una API elaborada por ESPOL para el envío de las alertas de emergencia.
<i>Nota. Autoría propia.</i>	

Tabla 7
Comunicación Wi-Fi

Requerimiento funcional N°	RQF06
Tipo	Producto
Prioridad	Media
Descripción	La aplicación móvil debe ser capaz de establecer una conexión Wi-Fi, para comunicarse con la API de ESPOL.
<i>Nota. Autoría propia.</i>	

Tabla 8
Alerta con sonido

Requerimiento funcional N°	RQF07
Tipo	Producto
Prioridad	Media
Descripción	La aplicación móvil mostrará una alerta cuando se ha detectado una caída, si el usuario no desactiva la alerta se envía un mensaje a la API

de ESPOL.

Nota. Autoría propia.

2.1.1.1.2 Requerimientos No-Funcionales

Tabla 9

Autonomía y duración de la batería

Requerimiento funcional N°	RQNF01
Tipo	Producto
Prioridad	Media
Descripción	El dispositivo Tiny ML debe tener una autonomía y duración de la batería adecuada para garantizar su funcionalidad durante un periodo prolongado de tiempo.

Nota. Autoría propia.

Tabla 10

Tiempo de respuesta

Requerimiento funcional N°	RQNF02
Tipo	Producto
Prioridad	Alta
Descripción	El sistema debe ser capaz de reconocer la caída en tiempo real, con en el menor retardo posible.

Nota. Autoría propia.

Tabla 11
Interfaz de usuario

Requerimiento funcional N°	RQNF03
Tipo	Usabilidad
Prioridad	Media
Descripción	La interfaz de usuario del dispositivo debe ser de uso intuitivo y sencillo, incluido para personas con escasa preparación tecnológica.
<i>Nota. Autoría propia.</i>	

Tabla 12
Integración con sensores externos

Requerimiento funcional N°	RQNF04
Tipo	Integración
Prioridad	Baja
Descripción	El sistema debe estar diseñado de manera que pueda ser capaz de integrarse con sensores nuevos.
<i>Nota. Autoría propia.</i>	

2.1.1.2 Alcance y limitaciones de la solución

El alcance del proyecto comprende el envío correcto de las alertas generadas por el dispositivo TinyML cuando detecte una caída. Para realizar esta comunicación, se utiliza un dispositivo móvil para establecer una conexión mediante Bluetooth. Cuando el dispositivo TinyML está vinculado a la aplicación móvil, establece una comunicación con una API externa

para el envío de alerta al centro de atención de ESPOL. Este centro es el que recibe las notificaciones de seguridad para actuar lo antes posible.

2.1.1.3 Riesgos y beneficios de la solución

La solución necesita de conexión de WiFi y Bluetooth para poder funcionar correctamente, y esto podría ser una limitación en términos para el usuario porque no siempre estará en un entorno donde ambas conexiones sean estables y confiables. Por otro lado, una vez que la aplicación móvil recibe la señal, puede enviar una alerta a la API de centro de atención de ESPOL mediante WiFi. No obstante, la dependencia de esta conexión implica que, en situaciones donde esta conexión no esté disponible, la funcionalidad del sistema podría verse comprometida, especialmente en áreas rurales o durante cortes de servicio. Para mitigar este riesgo, la aplicación móvil también puede configurarse para utilizar datos móviles cuando la conexión WiFi no esté disponible. Sin embargo, el uso de datos móviles puede implicar costos adicionales para el usuario y puede no ser tan confiable en zonas con baja cobertura de red celular. Por tanto, es esencial considerar tanto la estabilidad como los costos asociados con esta alternativa.

Sin embargo, el empleo de un microcontrolador con capacidades de TinyML y Bluetooth presenta numerosos beneficios. Por un lado, el microcontrolador puede procesar datos localmente, reduciendo la necesidad de transmisión constante y permitiendo una detección rápida y eficiente de caídas. Esto minimiza la latencia y mejora la precisión en la detección de eventos críticos. Además, el uso de Bluetooth para la comunicación con una aplicación móvil asegura un consumo energético bajo, lo cual es esencial para la durabilidad de los dispositivos portátiles.

2.1.1.4 Usuarios de la solución

Los usuarios finales que llevarán el dispositivo y utilizarán la función de detección de caídas en su vida diaria, son fundamentales. Además, el proyecto involucra a las autoridades y

organismos responsables de la respuesta a emergencias, que recibirán las alertas generadas por el dispositivo y tomarán las acciones necesarias.

2.1.2 Prototipado

2.1.2.1 Dispositivo portable

Figura 1

Prototipado del dispositivo



Nota. Autoría propia.

Para el desarrollo del prototipo del dispositivo detector de caídas, se utilizó un microcontrolador con sensor de acelerómetro, una caja rectangular, un banco de energía y cinta elástica, como se muestra en la Figura 1. Se determinó que la ubicación ideal del dispositivo podría ser en el hombro o alrededor del bíceps y así asegurarse de que el dispositivo esté donde el movimiento del usuario sea mínimo para evitar falsos positivos de caídas. El lugar del bíceps es ideal porque permite mantener el dispositivo firme y estable, reduciendo el riesgo de movimientos innecesarios que podrían activar el sensor de manera incorrecta. Además, el bíceps es una zona

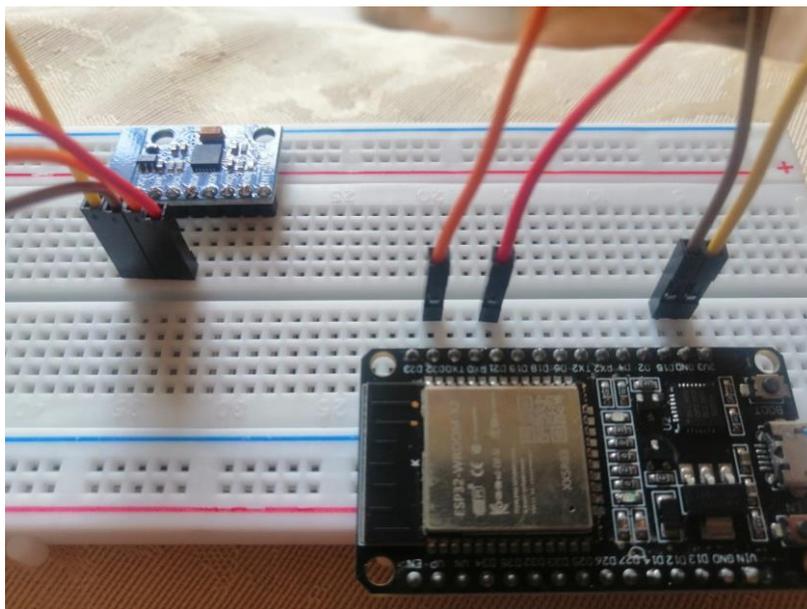
del cuerpo que no se mueve tanto como otras partes durante las actividades diarias, lo que mejora la precisión del dispositivo en la detección de caídas.

2.1.2.2 Dispositivos Tiny ML

- Esp32 + MPU6050

Figura 2

Pruebas con un ESP32



Nota. Autoría propia.

Se iniciaron las pruebas con un ESP32 conectado a un sensor MPU 6050, seleccionado debido a su asequibilidad y disponibilidad en el mercado, como se muestra en la Figura 2. Para el desarrollo del modelo de detección de caídas, se utilizó la plataforma Edge Impulse, junto con el conjunto de datos "Sisfall".

Durante las pruebas, se colocó el dispositivo en el brazo de varios usuarios para evaluar su rendimiento en un entorno real. Sin embargo, se observó que el dispositivo resultaba pesado y molesto para los usuarios, lo que afectaba negativamente su comodidad y usabilidad. Además, los resultados obtenidos fueron regulares, mostrando una precisión insuficiente para una implementación confiable en situaciones cotidianas.

Estos inconvenientes resaltaron la necesidad de buscar alternativas más ligeras y portátiles, sin comprometer la precisión del modelo de detección de caídas. Así, se inició la búsqueda de microcontroladores más adecuados que pudieran mejorar la experiencia del usuario y la efectividad del dispositivo.

Para mejorar la portabilidad, se exploraron dos alternativas: Nicla Voice y XIAO Seed Sense nRF252.

- Nicla Voice

Figura 3

Pruebas con el Nicla Voice



Nota. Autoría propia.

Se seleccionó el Nicla Voice por su menor tamaño y sensor IMU integrado, como se muestra en la Figura 3. Este microcontrolador incluye dos procesadores: el Syntiant® NDP120, especializado en la ejecución de modelos de aprendizaje profundo, y el Nordic nRF52832 MCU, destinado a tareas generales como la comunicación con sensores, el control de actuadores y la ejecución de código. Se logró cargar el modelo en el Syntiant® NDP120 y obtener las respuestas esperadas. Sin embargo, se identificó una falla de comunicación entre los dos procesadores, lo que impidió combinar la inferencia del modelo con el envío de señales por Bluetooth. Al consultar con

la comunidad de Syntiant, se informó que el microcontrolador está actualmente enfocado en aplicaciones de audio, aunque se espera un futuro soporte mejorado para sensores IMU.

- Seed Xiao nRF52840 Sense

Figura 4

Pruebas con Seed Xiao nRF52840 Sense

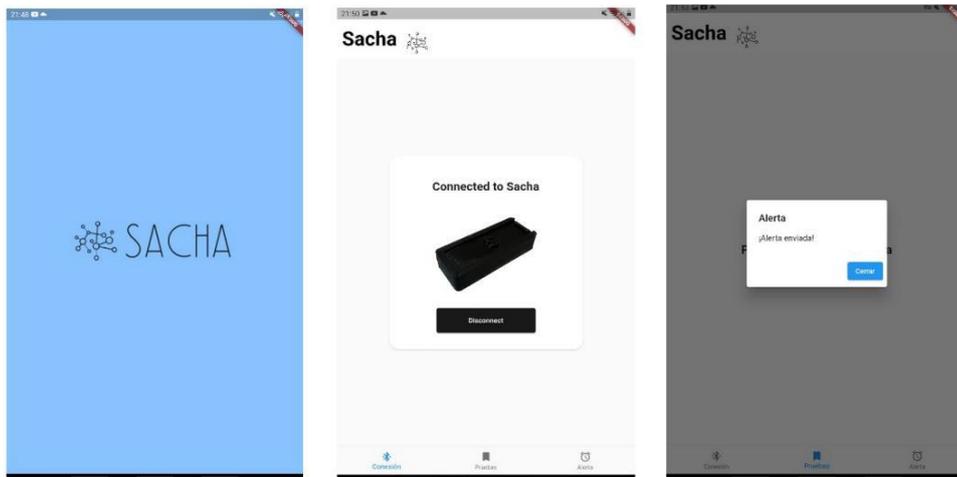


Nota. Autoría propia.

Finalmente, se probó con el XIAO Seed nRF52840, que tiene un tamaño aún más reducido que el Nicla Voice y cuenta con un microprocesador destinado a tareas generales, como se muestra en la Figura 4. Inicialmente, se utilizó el conjunto de datos "Sisfall" para entrenar el modelo, pero los resultados no fueron precisos. Se decidió entonces crear un conjunto de datos propio, grabado con el mismo microcontrolador. Con estos datos, se logró una comunicación efectiva entre la inferencia del modelo y el Bluetooth, permitiendo el envío de señales al detectar caídas.

2.1.2.3 Aplicación Móvil

- Integración con Sacha

Figura 5*Aplicación móvil de Sacha**Nota. Aplicación Sacha*

Se desarrolló una aplicación móvil para incorporar un proyecto previamente realizado llamado "Sacha"[16]. Este proyecto utilizaba un dispositivo Tiny ML para almacenar un modelo de inteligencia artificial que reconociera la palabra "Sacha". Al pronunciar esta palabra, la aplicación móvil del proyecto enviaba una alerta a un contacto preestablecido, como se muestra en la Figura 5.

El objetivo es integrar "Sacha" en el proyecto de detección de caídas, con el fin de mejorar la seguridad del usuario. El presente proyecto utiliza un dispositivo Tiny ML que, al detectar una caída, notifica a la aplicación móvil, la cual a su vez envía una alerta al centro de seguridad de ESPOL. La integración de ambos proyectos da lugar a una aplicación móvil que combina la detección de caídas y el reconocimiento de voz, ofreciendo una solución más robusta para la seguridad del usuario. Para el desarrollo de la aplicación, se empleó Flutter, una plataforma que permite crear aplicaciones nativas de alta calidad para móviles, web y escritorio desde una única base de código.

2.1.3 Evaluación

La búsqueda de un dispositivo de detección de caídas eficaz y portátil llevó a evaluar varias distintas opciones de hardware. Inicialmente, se consideró el ESP32 con la MPU 6050, que proporcionaba una buena base pero no satisfacía los requisitos de tamaño y rendimiento necesarios. Posteriormente, se evaluó el Nicla Voice, que presentaba mejoras significativas en cuanto a tamaño y capacidad de procesamiento, especialmente en el tratamiento del audio. Sin embargo, no logró reunir las condiciones de comunicación requeridas por el proyecto.

Finalmente, se seleccionó la placa XIAO Seeed nRF52840 para la detección de caídas. Esta placa demostró ser la solución más viable, logrando la combinación deseada de precisión y portabilidad. Sus datos personalizados y su capacidad de procesamiento la convierten en una opción superior para este propósito.

Paralelamente, se integró el proyecto "Sacha" utilizando la placa Nicla Voice, cuyo fuerte es el procesamiento de audio. Esta integración permite que el sistema reconozca la palabra "Sacha" y envíe una alerta al centro de seguridad de ESPOL.

El objetivo de este proyecto es desarrollar una solución tecnológica portable que integre tanto la detección de caídas como el reconocimiento de voz, utilizando los dispositivos Tiny ML mencionados. Además, se diseñó un estuche que almacenaba y protegía el equipo utilizado en ambos proyectos, asegurando su correcto funcionamiento y durabilidad. Esta integración no solo mejoró la funcionalidad de los sistemas existentes, sino que también proporcionó una capa adicional de seguridad y protección para los usuarios en situaciones de emergencia.

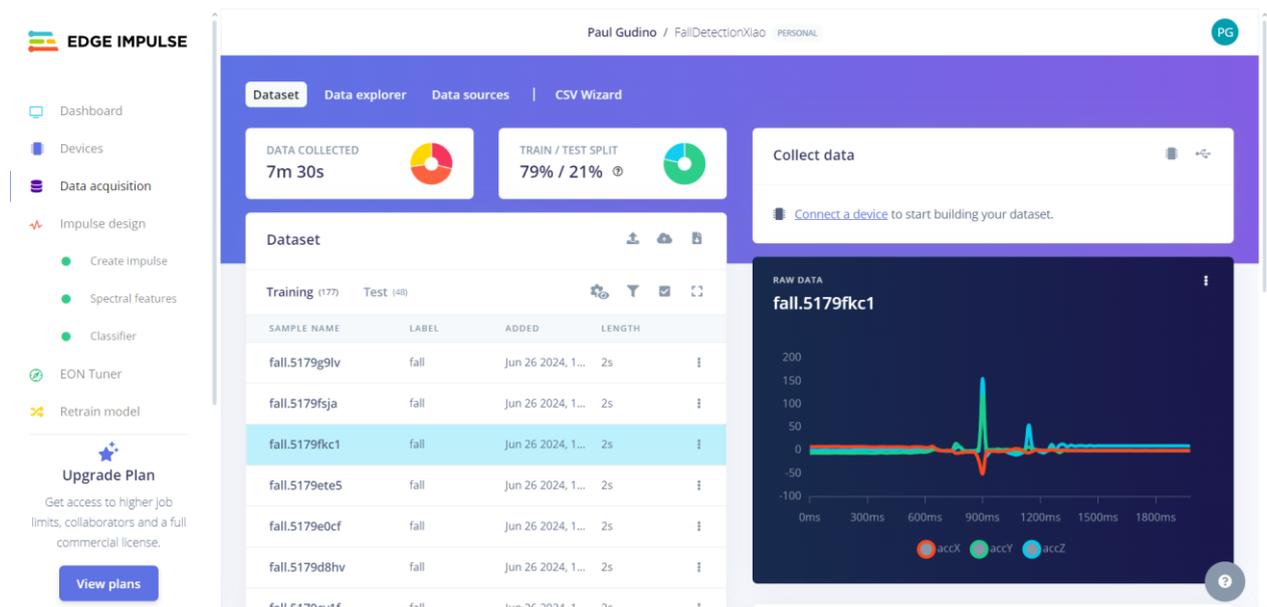
2.2 Diseño de la solución

2.2.1 Arquitectura

- Edge Impulse

Figura 6

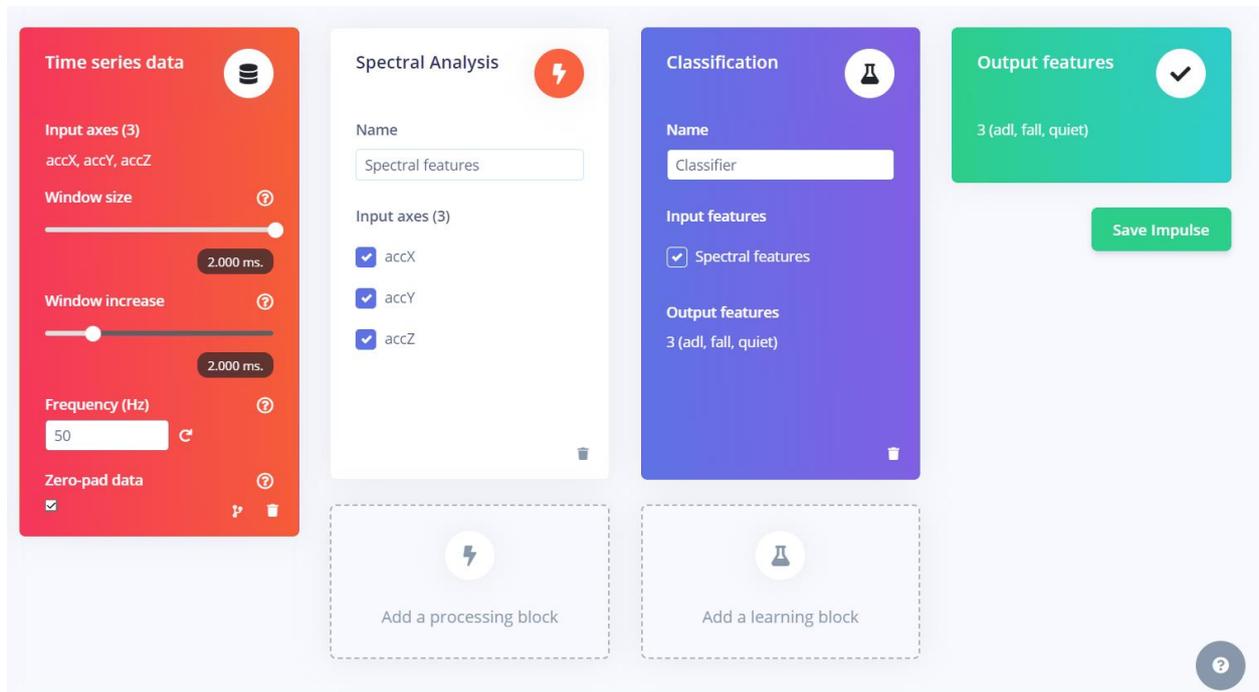
Recolección de datos



Nota. Autoría propia

Edge Impulse es una plataforma innovadora diseñada para facilitar el desarrollo y despliegue de modelos de aprendizaje automático en dispositivos Tiny ML, permitiendo a los desarrolladores crear soluciones inteligentes con facilidad.

Para este proyecto, se creó un conjunto de datos propios utilizando valores de acelerómetro. Cada grabación duró exactamente 2 segundos, capturando datos de los tres ejes del acelerómetro: accX, accY y accZ, con una frecuencia de muestreo de 50 Hz, como se muestra en la Figura 6. Este enfoque detallado asegura una captura precisa de los movimientos y las condiciones que se buscan analizar. El conjunto de datos fue etiquetado cuidadosamente para reflejar tres estados distintos: actividades diarias (adl), caídas (fall) y reposo (quiet).

Figura 7***Creación de impulso***

Nota. Autoría propia

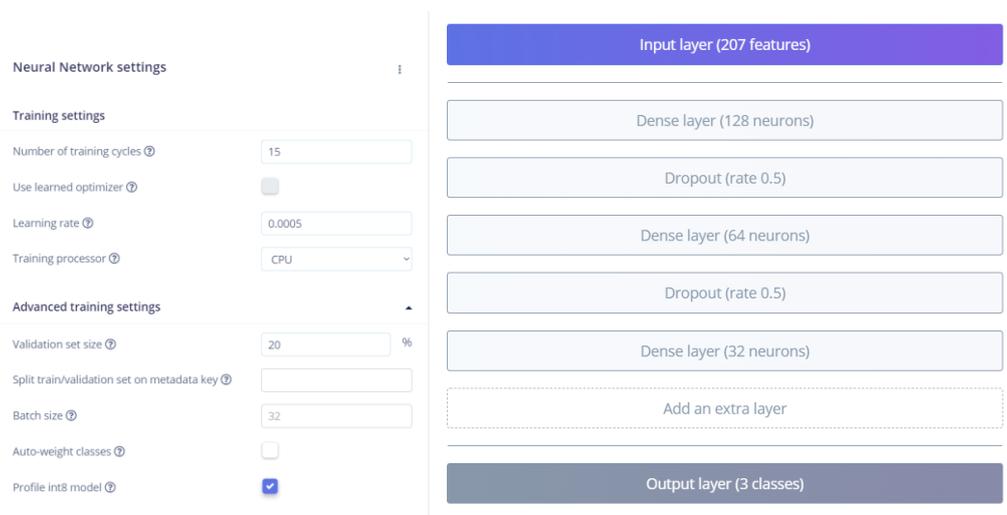
En la Figura 7 se puede observar que se diseñó un impulso utilizando una ventana de tiempo de 2 segundos, alineada con la duración de las grabaciones. Esto garantiza que el modelo pueda procesar información relevante dentro del contexto temporal adecuado. Posteriormente, se aplicó el bloque de procesamiento Spectral Analysis. Este paso es crucial ya que transforma los datos brutos del acelerómetro en características espectrales más informativas, como la energía espectral y las bandas de frecuencia, que son fundamentales para diferenciar entre los distintos estados etiquetados.

Finalmente, se agregó el bloque de procesamiento de clasificación como se observa en la Figura 8, donde se definen las características de salida (output features) como adl, fall y quiet. Este paso es esencial para entrenar un modelo de aprendizaje automático que pueda clasificar

correctamente entre estos tres estados basándose en las características extraídas previamente. La precisión en esta etapa es crítica para el éxito del proyecto, ya que determina la capacidad del sistema para identificar correctamente las caídas y distinguirlas de las actividades diarias normales o períodos de reposo.

Figura 8

Modelo inteligencia artificial



Nota. Autoría propia

La creación del modelo de inteligencia artificial para este proyecto tiene como objetivo maximizar la precisión en la clasificación de los estados de actividad. Se usó el 80% de los datos para el entrenamiento y el 20% para la validación, asegurando así que el modelo aprenda eficazmente y pueda generalizar a partir de datos no vistos previamente.

El proceso de entrenamiento se configuró con una tasa de aprendizaje de 0.0005 y 15 épocas, balanceando el tiempo de aprendizaje y evitando el sobreajuste. La arquitectura del modelo incluye una capa de entrada con 207 características, seguida de una capa densa con 128 neuronas y una capa de dropout con una tasa de 0.5 para regularización. Luego, dos capas densas adicionales

con 64 y 32 neuronas, cada una seguida por otra capa de dropout, y finalmente, una capa de salida con 3 neuronas para clasificar las actividades diarias, caídas y reposo.

Este diseño captura relaciones complejas y simples entre las características de entrada y las etiquetas de salida, mejorando la capacidad del modelo para generalizar y manejar la variabilidad en los datos de acelerómetro.

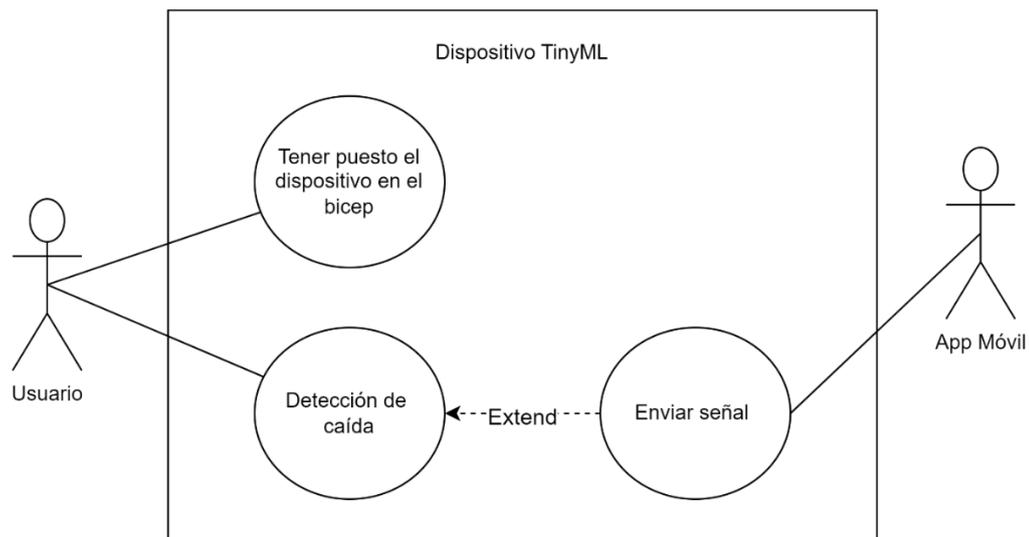
2.2.2 Diagramas

- Casos de uso

Para el desarrollo del proyecto se definen los siguientes casos de uso, como se ilustra en la Figura 9. El usuario portará dispositivo TinyML en el bíceps, y al detectar una caída, se enviará la señal por la aplicación móvil.

Figura 9

Caso de uso: Dispositivo portable.

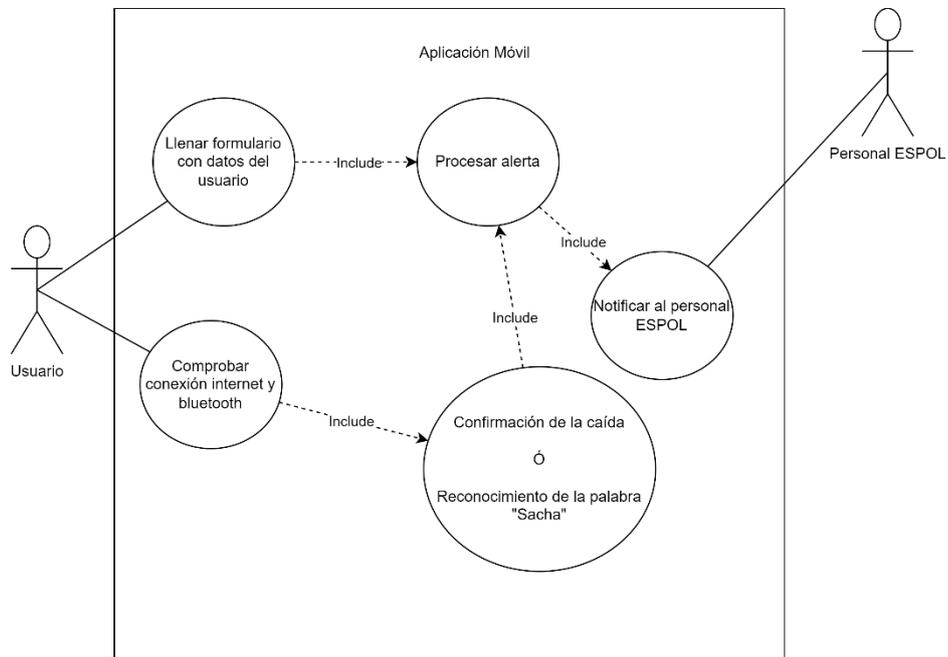


Nota. Autoría propia

En la Figura 10 se describe el caso de uso cuando el usuario abre la aplicación móvil. Primero, deberá llenar el formulario de registro, luego conectarse con el dispositivo, y al detectar una caída, se activará la alerta de emergencia que será enviada al personal correspondiente.

Figura 10

Caso de uso: Aplicación Móvil



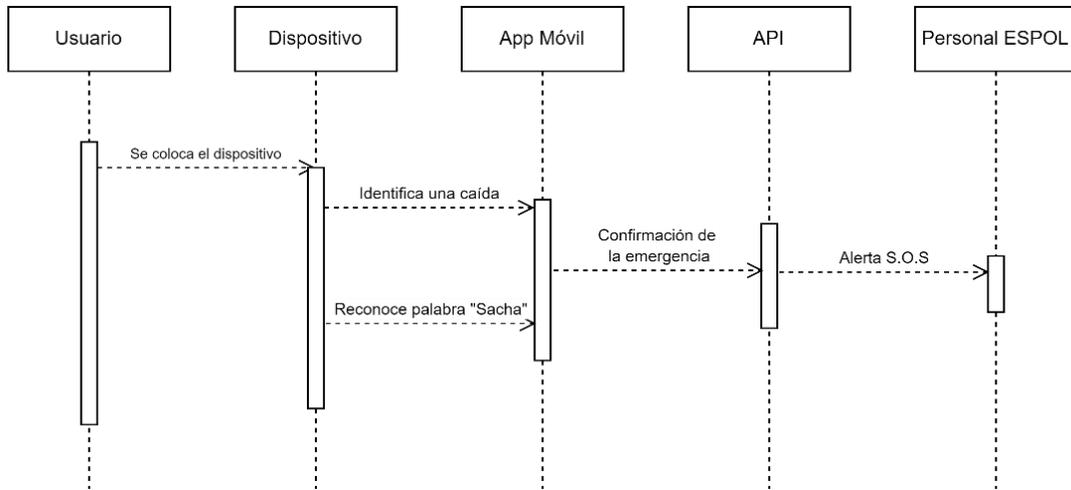
Nota. Autoría propia

- Diagrama de secuencia

En la Figura 11 se muestra el diagrama de secuencia que representa la interacción cronológica entre los objetos del sistema, desde la detección de la alerta hasta su recepción por parte del personal de emergencia.

Figura 11

Diagrama de secuencia



Nota. Autoría propia

- Diseño conceptual

En la Figura 12 muestra el diseño conceptual del sistema, donde el dispositivo detecta caídas y envía una señal a la aplicación móvil. La aplicación móvil procesa la información y activa una alerta que se comunica al personal de emergencia para una respuesta rápida.

Figura 12

Diagrama conceptual



Nota. Autoría propia

Capítulo

3. Resultado Y Análisis

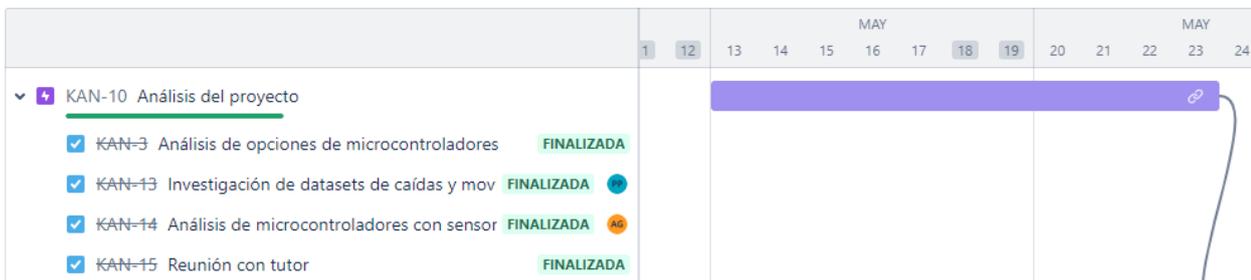
3.1 Plan de Implementación

El plan de ejecución se estructuró con un meticuloso planteamiento de la organización y priorización de las actividades clave del proyecto. Las tareas se desglosaron y programaron en fases específicas, lo que permitió un control detallado y eficiente de cada aspecto. Se establecieron hitos intermedios para evaluar los progresos y hacer los ajustes oportunos, garantizando así que todas las fases del proyecto se completaran dentro del plazo establecido. Esta rigurosa planificación facilitó la gestión de los recursos y la realización de los objetivos del proyecto.

En la Figura 13 se observa la fase de análisis se realizó un estudio de las diferentes opciones tecnológicas, como microcontroladores y sensores con el fin de seleccionar la más adecuada con en función a los objetivos del proyecto. Además, se analizaron conjuntos de datos relevantes para garantizar que la solución propuesta pudiera manejar los datos necesarios.

Figura 13

Fase de análisis del proyecto



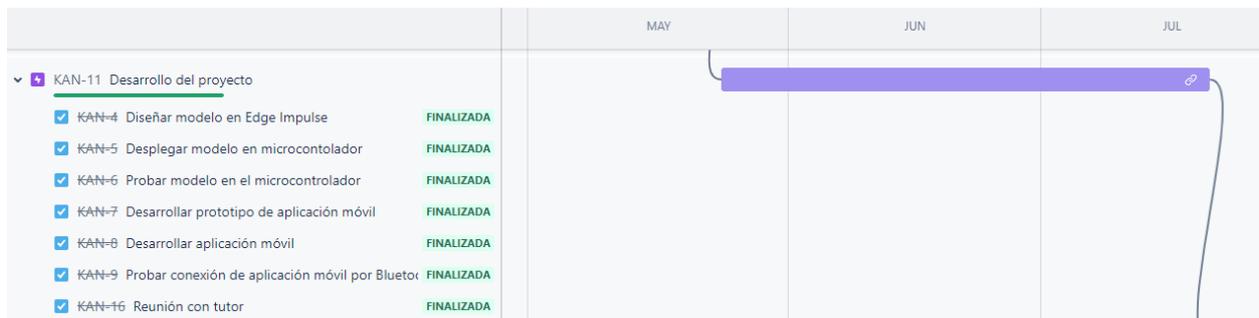
Nota. Autoría propia

La fase de desarrollo del proyecto representó la ejecución práctica de las ideas y análisis previamente realizados. Durante esta etapa, se llevaron a cabo diversas actividades clave, como el diseño, despliegue y prueba del modelo en la plataforma Edge Impulse y en un microcontrolador específico. Asimismo, se desarrolló un prototipo de la aplicación móvil, asegurando su correcta integración con el hardware a través de la conexión Bluetooth. Esta fase también incluyó reuniones

con el tutor y cliente para validar los progresos y realizar ajustes en caso de ser necesario, tal como se evidencia en la Figura 14.

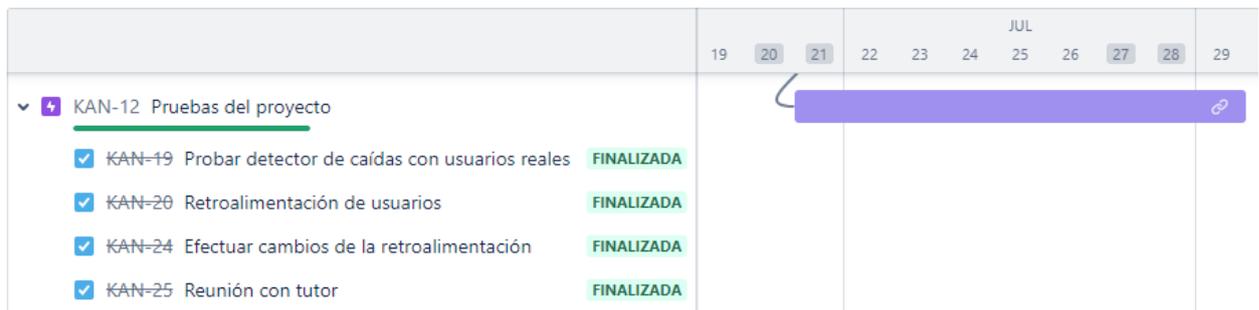
Figura 14

Fase de desarrollo del proyecto



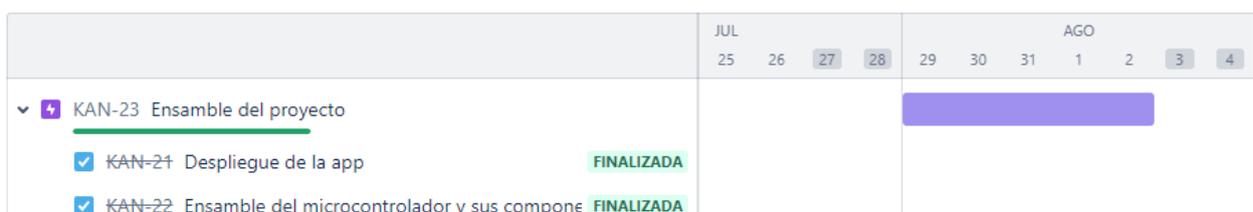
Nota. Autoría propia

En la Figura 15 se muestra la fase de pruebas es fundamental para validar la funcionalidad y efectividad del proyecto en un entorno real. En esta etapa, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas del detector de caídas utilizando usuarios reales, lo que permitió evaluar el rendimiento del sistema en condiciones de uso cotidiano. La retroalimentación obtenida de los usuarios fue esencial para identificar posibles áreas de mejora y hacer ajustes necesarios en el sistema. Esta interacción directa con los usuarios permitió refinar tanto el hardware como el software, asegurando que la solución fuera no solo técnicamente robusta, sino también práctica y fácil de usar.

Figura 15***Fase de pruebas del proyecto***

Nota. Autoría propia

En la fase de ensamble, tal como se observa en la Figura 16, se llevó a cabo el despliegue final de la aplicación móvil, asegurando que estuviera completamente funcional y lista para ser utilizada en un entorno real. Además, se diseñó y creó una carcasa personalizada para el dispositivo, lo que permitió convertirlo en un sistema portátil y práctico para los usuarios. Esta carcasa no solo protegió los componentes electrónicos, sino que también mejoró la ergonomía y la usabilidad del dispositivo, haciéndolo adecuado para su uso cotidiano. Con la culminación de esta fase, el proyecto quedó listo para su implementación final, combinando funcionalidad, portabilidad y estética.

Figura 16***Fase de finalización del proyecto***

Nota. Autoría propia

3.2 Pruebas

3.2.1 Pruebas de movimiento:

Se realizaron pruebas con 10 personas para validar la capacidad del dispositivo de distinguir actividades normales de posibles caídas. Cada participante realizó 5 ejemplos que incluían caminar, correr, saltar y subir escaleras. Se esperaba que el dispositivo no enviara señales de alarma durante estas actividades normales. De las 50 pruebas realizadas, la alarma solo se activó en 7 ocasiones, lo que demuestra una alta precisión del dispositivo en no generar falsas alarmas durante el movimiento normal.

3.2.2 Pruebas de reposo:

En esta prueba, se evaluó la capacidad del dispositivo para distinguir estados de reposo que no son caídas. Se validó con 10 personas, cada una realizando 5 ejemplos que incluyeron estar sentados, levantarse de una silla, quedarse de pie, y realizar movimientos ligeros como mover las manos o hablar. De las 50 pruebas realizadas, la alarma solo se activó en 2 ocasiones, indicando que el modelo es eficaz en reconocer situaciones de reposo sin generar alarmas innecesarias.

3.2.3 Pruebas de caída:

Para esta prueba, se evaluó la precisión del dispositivo en la detección de caídas reales. Participaron 10 personas, cada una realizando 5 ejemplos que simulaban caídas controladas en diferentes escenarios. Las actividades previas a la caída incluyeron caminar, tropezar, y después de la caída, permanecer en el suelo por un breve período de tiempo. Estos escenarios fueron diseñados para imitar situaciones comunes donde podrían ocurrir caídas, permitiendo al dispositivo demostrar su capacidad para identificar correctamente una caída y diferenciarla de otros movimientos bruscos. De las 50 pruebas realizadas, la alarma se activó en 38 ocasiones, lo

que indica que el dispositivo es altamente sensible en la detección de caídas, aunque hay margen para mejorar la diferenciación entre caídas y otros movimientos bruscos.

3.2.4 Pruebas de alcance con obstáculos:

Se realizaron pruebas para evaluar el alcance de la conexión Bluetooth entre la placa XIAO Seeed nRF52840 y la aplicación Detfall en un entorno con obstáculos. En un lugar amplio con paredes intermedias, el dispositivo mostró un alcance efectivo de 10 metros, lo que sugiere que el rendimiento de la señal se ve afectado por la presencia de obstáculos físicos.

3.2.5 Pruebas de alcance sin obstáculos:

Se probó el alcance del dispositivo en un espacio abierto sin obstáculos. En estas condiciones, la conexión Bluetooth mantuvo un alcance de 15 metros, mostrando un rendimiento adecuado para entornos amplios sin barreras físicas que interfirieran con la señal.

3.2.6 Pruebas de interacción del usuario con la aplicación Detfall:

Se evaluó la facilidad de uso de la aplicación Detfall con 10 usuarios. Ninguno de ellos tuvo dificultades para entender y probar el funcionamiento de la aplicación. La interfaz y las instrucciones resultaron claras, permitiendo una interacción fluida y efectiva.

3.2.7 Pruebas de tiempo de envío:

Se verificó el tiempo de respuesta de la aplicación Detfall para enviar una alerta al centro de emergencias de ESPOL una vez que ha pasado el minuto sin que el usuario descarte la alarma. Se comprobó que la alerta se envía en menos de 5 segundos después de transcurrido el minuto, asegurando una respuesta rápida para la asistencia del usuario en caso de emergencia.

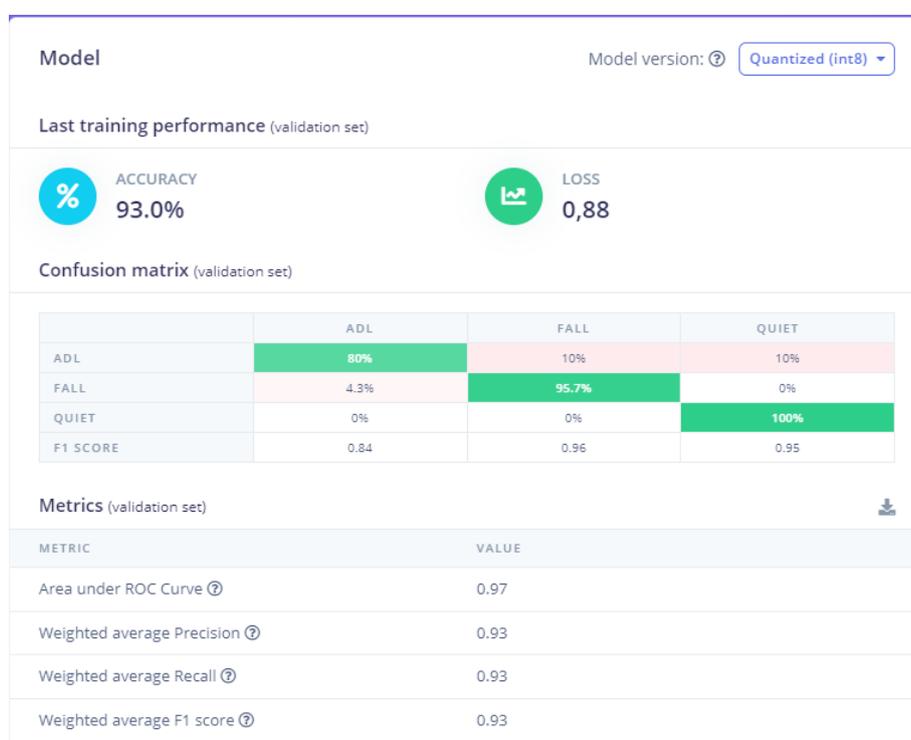
3.2.8 Pruebas de duración de la batería

Se realizaron pruebas para evaluar la duración de la batería del dispositivo en condiciones de uso continuo. La batería del dispositivo, que es extraíble y recargable mediante un puerto USB, mostró una duración de 1 hora y 30 minutos antes de necesitar ser recargada. Este tiempo de funcionamiento es adecuado para sesiones de uso moderadas, aunque puede ser necesario mejorar la autonomía para actividades que requieran un uso más prolongado.

3.3 Resultados

Figura 17

Resultados del modelo para detección de caídas



Nota. Autoría propia

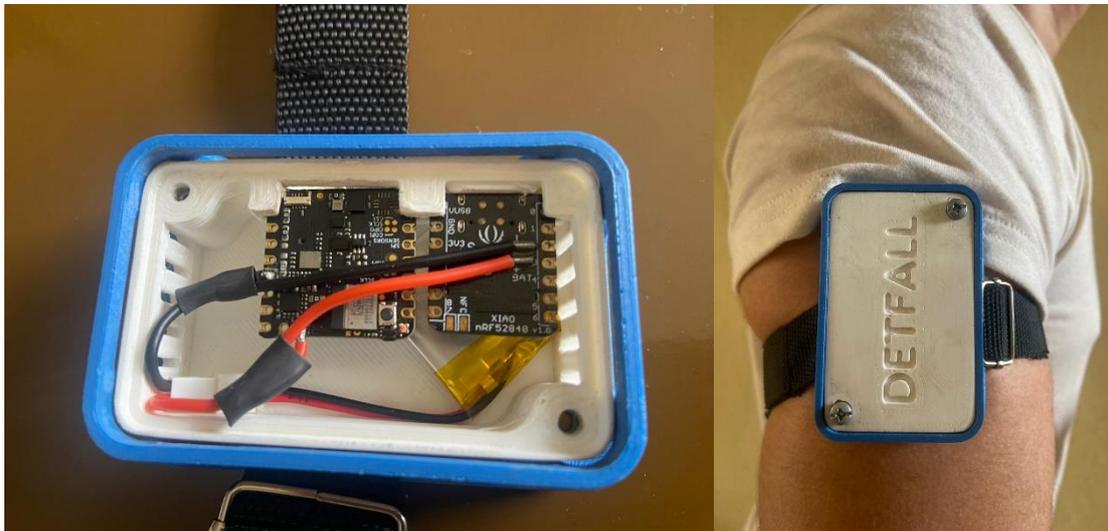
Se desarrolló un modelo de detección de caídas mediante Edge Impulse, capaz de clasificar tres categorías: actividades diarias (ADL), caídas (Fall) y reposo (Quiet). En la Figura 17 se

presenta la matriz de confusión generada por la plataforma Edge Impulse, junto con las métricas obtenidas de la evaluación sobre la precisión y el rendimiento del modelo.

La matriz de confusión muestra que el modelo logró una precisión general del 93.0%, con una pérdida de 0.88 en el conjunto de validación. Específicamente, el modelo clasificó correctamente el 80% de las actividades diarias, el 95.7% de las caídas, y el 100% de los casos de reposo. Sin embargo, se observan algunas confusiones: el 10% de las actividades diarias fueron clasificadas incorrectamente como caídas o reposo, y el 4.3% de las caídas fueron clasificadas como actividades diarias.

En términos de métricas de rendimiento, el modelo alcanzó un valor de 0.97 en el área bajo la curva ROC, lo que indica una excelente capacidad de discriminación entre las categorías. Las precisiones, los recalls, y las puntuaciones F1 ponderadas también fueron altas, con valores de 0.93, 0.93, y 0.93 respectivamente, lo que refleja un equilibrio sólido entre la precisión y la sensibilidad del modelo.

El F1 Score es una métrica que combina la precisión (la proporción de verdaderos positivos entre todos los positivos predichos) y el recall (la proporción de verdaderos positivos entre todos los positivos reales) en una sola métrica, mediante la media armónica de ambas. Es especialmente útil en casos donde hay un desequilibrio en las clases. En este modelo, los F1 Scores para cada categoría fueron 0.84 para ADL, 0.96 para caídas, y 0.95 para reposo, lo que sugiere que el modelo tiene un buen rendimiento equilibrado para cada clase.

Figura 18*Versión final del dispositivo*

Nota. Autoría propia

Posteriormente, el modelo fue subido al dispositivo XIAO Seeed nRF52840 y almacenado en una carcasa protectora impreso en 3D. Este dispositivo se colocó en el brazo del usuario y se realizaron pruebas para evaluar su rendimiento en la detección de caídas, como se observa en la Figura 18. Durante las pruebas, se envió la señal a la aplicación móvil DetFall, que alertaba sobre la emergencia. Se pidió a 10 usuarios que simularan una caída al dejarse caer sobre un colchón colocado en el piso, repitiendo esta acción en 5 ocasiones cada uno. En total, se registraron 50 caídas, de las cuales 38 fueron correctamente alertadas, lo que resultó en una efectividad del 76%.

3.4 Análisis de Costos

3.4.1 Desglose de costos

En la Tabla 13 muestra un desglose detallado de los costos incurridos en el desarrollo de la solución, los cuales suman un total de \$146,00.

Tabla 13
Desglose de costos

Nicla Voice	\$82
XIAO Seed	\$29
Carcasa impresión 3D	\$20
Batería 200 mAh	\$10
Ensamble	\$5
Total	\$146

Nota. Autoría propia

Capítulo 4

4. Conclusiones Y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se recopiló alrededor de 270 muestras de movimientos cotidianos incluyendo caídas para la construcción del conjunto de datos.
- Se diseñó y desarrolló un modelo de inteligencia artificial capaz de reconocer patrones de aceleración específicos asociados con diferentes tipos de movimientos, incluyendo las caídas.
- El modelo fue entrenado utilizando el conjunto de datos creado. A través de múltiples iteraciones y ajustes, se mejoró la capacidad del modelo para distinguir entre movimientos cotidianos y caídas, asegurando un alto nivel de exactitud en la identificación de eventos críticos.
- El modelo entrenado fue exitosamente desplegado en el microcontrolador XIAO Seed nrf52840, permitiendo la detección de caídas en tiempo real.
- Se desarrolló una aplicación móvil que facilita la comunicación con el dispositivo. La aplicación permite no solo la recepción de señal en tiempo real, sino también el envío de alertas al personal de emergencia de ESPOL en caso de detectar una emergencia.
- Se llevaron a cabo pruebas exhaustivas para validar el funcionamiento del dispositivo en condiciones reales. Los resultados de las pruebas confirmaron que el sistema es confiable y eficiente en la detección de caídas, cumpliendo con los objetivos del proyecto.
- Se integró el modelo de inteligencia artificial Sacha en un microcontrolador adicional para reconocer palabras clave. Este modelo se implementó en un Arduino Nicla Voice, el cual incluye un micrófono integrado que permite activar el envío de alertas mediante el reconocimiento de voz.

Finalmente, es importante destacar que la aplicación móvil necesita estar conectada a la red de ESPOL para enviar alertas de emergencia. Asimismo, debe tener acceso a Bluetooth para conectarse con el detector de caídas. Además, se recomienda colocar el detector a la altura del bíceps para garantizar una detección precisa de las caídas.

4.2 Recomendaciones

Por último, se debe tomar en consideración las siguientes recomendaciones recopiladas a lo largo del desarrollo del proyecto con el objetivo de mejorar iteraciones futuras. A continuación, se detallan las siguientes:

- Incrementar el conjunto de datos para el entrenamiento con el objetivo de robustecer el modelo de inteligencia artificial de reconocimientos de caídas.
- Integrar en un único microcontrolador los modelos de inteligencia artificial, tanto el de detección de caídas como el de Sacha, en lugar de utilizar dos microcontroladores separados.
- Elegir una batería de mayor duración para mejorar la usabilidad del dispositivo.
- Aplicar arquitectura limpia dentro del desarrollo de la aplicación móvil para facilitar su escalabilidad y masificación en la producción, asegurando su rendimiento y eficiencia en diferentes entornos.
- Probar el detector de caídas en diferentes entornos y condiciones (interiores, exteriores, superficies irregulares) para garantizar la robustez y precisión del modelo en situaciones reales.
- Rediseñar la carcasa del dispositivo para hacerlo más cómodo y discreto de llevar, mejorando así la experiencia del usuario.
- Implementar un mecanismo que verifique el estado de funcionamiento del dispositivo, alertando al usuario en caso de fallos o necesidad de mantenimiento.
- Implementar un interruptor para la activación y desactivación del dispositivo detector de caídas.
- Implementar sistema de carga de batería por medio del microcontrolador.

En conclusión, las recomendaciones propuestas para el proyecto del detector de caídas buscan fortalecer tanto la eficacia como la usabilidad del dispositivo. Al incrementar el conjunto de datos para el entrenamiento del modelo de inteligencia artificial, se logrará una mayor precisión en la detección de caídas, mientras que la integración de modelos en un único microcontrolador optimiza el rendimiento y reduce costos. La elección de una batería de mayor duración y la implementación de arquitectura limpia en la aplicación móvil contribuyen a una experiencia de usuario más satisfactoria y la posibilidad de incorporar nuevas funcionalidades. Además, la optimización del consumo energético, la mejora de la ergonomía, y la incorporación de actualizaciones remotas y sistemas de seguridad robustecen el dispositivo en su totalidad. Estas recomendaciones no solo aumentan la confiabilidad del detector de caídas, sino que también garantizan una integración efectiva en el entorno cotidiano del usuario, promoviendo así una mayor seguridad y comodidad.

Referencias

- [1] «Caídas». Accedido: 11 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/falls>
- [2] A. Salvà, I. Bolívar, G. Pera, y C. Arias, «Incidence and consequences of falls among elderly people living in the community», *Med. Clin. (Barc.)*, vol. 122, n.º 5, pp. 172-176, feb. 2004, doi: 10.1016/s0025-7753(04)74184-6.
- [3] «Evaluación del riesgo de caídas en las personas mayores: ¿cómo hacerlo?» Accedido: 28 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1134-928X2014000100004
- [4] J. D. López Hincapie y J. F. Vargas Bonilla, «SisFall : A Fall and Movement Dataset», 2017, doi: 10.3390/s17010198.
- [5] «Dispositivo detector de caídas - Neat | Miray Consulting». Accedido: 31 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mirayconsulting.com/dispositivo-detector-de-caidas-neat/>
- [6] L. Pandell, «Descubre cómo funcionan los detectores de caídas», 13 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.aarp.org/espanol/hogar-familia/tecnologia/info-2022/detectores-de-caidas.html>
- [7] L. L. Alejandro, M. M. Gulpric, C. J. F. Lanon, F. M. A. Macalalag, y R. M. A. Placio, «ICFY (I Care For You): An IOT Based Fall Detection and Monitoring Device using ESP32-CAM and MPU 6050 Sensors», en *2023 8th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR)*, may 2023, pp. 1009-1013. doi: 10.1109/ICBIR57571.2023.10147586.
- [8] «PICmicro® MCU Estudio - ¿qué es un microcontrolador?», *Electronica Estudio*. Accedido: 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.estudioelectronica.com/que-es-un-microcontrolador/>
- [9] «esp32_datasheet_en.pdf». Accedido: 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [10] «ABX00061-datasheet.pdf». Accedido: 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00061-datasheet.pdf>
- [11] «Seeed-Studio-XIAO-Series-SOM-Datasheet.pdf». Accedido: 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://files.seeedstudio.com/wiki/XIAO/Seeed-Studio-XIAO-Series-SOM-Datasheet.pdf>
- [12] «MPU-6000-Datasheet1.pdf». Accedido: 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- [13] H. Mera, «¿Qué es TinyML?», *TodoMaker*. Accedido: 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://todomaker.com/blog/que-es-tinyml/>
- [14] «TinyML Book - Benefits of TinyML». Accedido: 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thetinymlbook.com/resources/benefits-of-tinyml>
- [15] «Edge Impulse». Accedido: 17 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://edgeimpulse.com/>
- [16] C. S. Asanza Romero y L. A. Rodríguez Chávez, «Desarrollo de una solución tecnológica para el envío de notificaciones instantáneas mediante el procesamiento de señales de audio», 2023, Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/58458>

APÉNDICE

Manual de usuario

Se debe colocar el dispositivo a la altura del bíceps ajustándolo lo suficiente para que no se deslice, como se observa en la Figura 1.

Figura A1

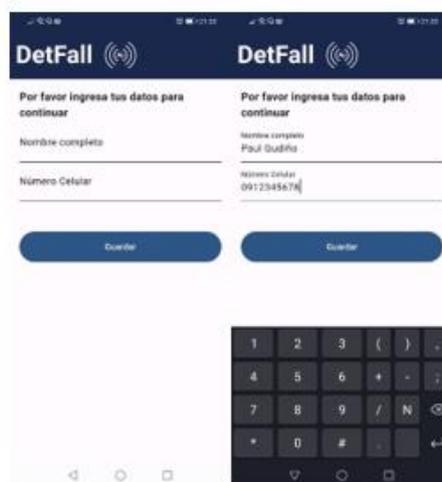
Posición del dispositivo



Se debe instalar la aplicación móvil “DetFall”, en donde deberá rellenar el formulario con nombre y número celular como se observa en la Figura 2.

Figura 2

Pantalla del formulario de datos del usuario



Luego, aparecerá la pantalla inicial de la aplicación como se visualiza en la Figura 3 donde se aprecia los sensores encendidos del dispositivo DetFall y un botón en la parte inferior para realizar la conexión.

Figura 3

Pantalla para enlazar aplicación móvil con el dispositivo



Se muestra la pantalla de carga para precisar la conexión como se puede observar en la Figura 4.

Figura 4

Pantalla de cargando



Una vez cargada la conexión, aparece la pantalla en donde se muestra los sensores conectados y que realizan el seguimiento tanto de movimientos como de voz, según la disponibilidad, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

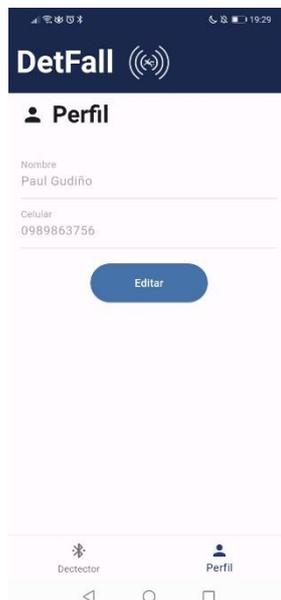
Pantalla de home



En la sección de perfil aparece los datos ingresados inicialmente. Además, de encontrarse un botón en la parte inferior para editar los datos, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Pantalla de perfil



Se puede aceptar los cambios o descartarlos, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Pantalla de perfil editando



Cuando se detecta una señal de emergencia enviada por el dispositivo, se enciende la notificación de la aplicación junto a un sonido de alerta y también una *card* con un temporizador de 60 segundos para descartar la emergencia en caso de que el usuario se encuentre bien, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Pantalla de detección de caída



En caso de que no se haya descartado la emergencia y haya transcurrido los 60 segundos, se procede a enviar la señal de alerta al personal de emergencias de ESPOL, y se envía una señal indicando el envío exitoso, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Notificación de aplicación móvil

