



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Implementación del método de umbrales para la  
detección de caídas utilizando sensores vestibulares

presentada por

**Ing. Manuel Erazo Valadez**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestría en Ciencias de la Computación**

Director de tesis

**Dr. Javier Ortiz Hernández**

Codirector de tesis

**Dr. María Yasmín Hernández Pérez**

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2022.



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
Departamento de Ciencias Computacionales

Cuernavaca, Mor., 22/06/2022

OFICIO No. DCC/056/2022  
Asunto: Aceptación de documento de tesis  
CENIDET-AC-004-M14-OFCIO

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. MANUEL ERAZO VALADEZ, con número de control M20CE059, de la Maestría en Ciencias de la Computación, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE UMBRALES PARA LA DETECCIÓN DE CAIDAS UTILIZANDO SENSORES VESTIBLES", y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

\_\_\_\_\_  
DR. JAVIER ORTIZ HERNÁNDEZ  
Director de tesis

\_\_\_\_\_  
DRA. MARÍA YASMIN HERNÁNDEZ PÉREZ  
Codirectora de Tesis

\_\_\_\_\_  
DRA. ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR  
Revisor 1

\_\_\_\_\_  
DR. JOAQUÍN PÉREZ ORTEGA  
Revisor 2

\_\_\_\_\_  
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.  
Expediente / Estudiante  
JCGS/lbm

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos  
Tel. 01 (777) 3627770, ext. 3201, e-mail: dcc@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



Cuernavaca, Mor., 30/junio/2022  
No. De Oficio: SAC/110/2022  
Asunto: Autorización de impresión de tesis

**MANUEL ERAZO VALADEZ  
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA COMPUTACIÓN  
P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE UMBRALES PARA LA DETECCIÓN DE CAIDAS UTILIZANDO SENSORES VESTIBLES", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
Excelencia en Educación Tecnológica®  
"Educación Tecnológica al Servicio de México"

  
**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



C. c. p. Departamento de Ciencias Computacionales  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/CHG

## **Dedicatoria**

A mi papá Oscar Manuel Erazo, que siempre será una de las personas más importantes en mi vida, que gracias a sus consejos y enseñanzas he llegado a cumplir cada uno de los objetivos que me he propuesto en la vida. Espero que desde el cielo pueda ver y este orgulloso de este objetivo que he cumplido. También este trabajo es dedicado para mi mamá y a mi hermano que son y siempre serán los pilares de mi vida y que sin ellos no hubiera alcanzado este objetivo.

## **Agradecimientos**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme una beca durante todos los meses que tomó el desarrollo de este proyecto y así permitirme poder enfocarme solo en desarrollar esta tesis.

También quiero agradecer al Tecnológico Nacional de México (TecNM/CENIDET), por permitirme realizar una Maestría en Ciencias de la computación y facilitarme en sus instalaciones todo lo necesario para poder desarrollar esta tesis.

A mis padres Oscar Erazo y Diana Valadez gracias por todo el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida, por impulsarme a realizar cada una de mis metas y por brindarme todo el amor que me han dado.

Muchas gracias, mamá por estar conmigo tanto en los momentos felices como en los momentos tristes. Este es un logro de los dos ya que aún recuerdo cada una de las desveladas hasta la madrugada que te quedabas conmigo para no me quedará solo haciendo mi tarea por eso y muchas cosas más gracias, mamá.

Agradezco a mi hermano Fernando Erazo por siempre estar a mi lado apoyándome y cuidándome en cada una de las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida. Gracias por estar ahí siempre para mí y en ocasiones dejando de lado tus cosas para poder estar conmigo y apoyarme.

También le agradezco a dos personas muy importantes en mi vida, a mis abuelitos Rosalio Valadez y Areopajita Pineda por estar siempre apoyándome a mí y a mi familia. Gracias por todo abuelitos, sobre todo por estar siempre y brindarme su apoyo en las ocasiones que lo he necesitado.

A mis tías Pajis, Bere y a mi tío Ulises gracias por su apoyo.

Al doctor Javier Ortiz Hernández por todo el apoyo que me brindo y por compartir sus conocimientos para la realización de esta tesis. Además, brindarnos su amistad incondicional y alentarme a seguir preparándome.

## Resumen

Actualmente se presenta el fenómeno del envejecimiento poblacional en todo el mundo, mientras la sociedad envejece se presentan problemas sociales y de salud que afectan principalmente a los sistemas de seguridad social y de salud de las comunidades.

La salud de los adultos mayores se ve afectada frecuentemente por las complicaciones que se les presentan después de haber sufrido una caída. Las complicaciones pueden ser físicas y psicológicas y se les atribuye un alto índice de mortalidad, por ello se ha declarado como uno de los principales problemas de salud pública.

Las caídas conforman uno de los síndromes geriátricos más tomados en cuenta, ya que tienen un alto índice de incidencia y de morbimortalidad. Se estima que un 7% de las visitas de los adultos mayores al hospital son consecuencia de alguna caída y de estas el 40% necesitan de una hospitalización.

Las lesiones más comunes que sufren los adultos mayores como consecuencia de una caída pueden ser muy diversos, pueden ser lesiones superficiales, contusiones simples, equimosis, laceraciones superficiales o profundas en distintas partes del cuerpo, luxaciones, fracturas y se pueden presentar consecuencias más graves que ponen en peligro la vida de la persona.

En este trabajo de tesis se busca desarrollar un prototipo que permita la detección de una caída sufrida por una persona y mandar una alerta a personas previamente establecidas, sobre el evento ocurrido.

## **Abstract**

Currently, the phenomenon of population aging is occurring throughout the world, and as society ages, social and health problems are arising that mainly affect the social security and health systems of communities.

The health of older adults is frequently affected by the complications they suffer after a fall. Complications can be physical and psychological and are attributed to a high mortality rate, which is why it has been declared one of the main public health problems.

Falls are one of the most frequently considered geriatric syndromes, since they have a high incidence and morbimortality rate. It is estimated that 7% of the visits of older adults to the hospital are the result of a fall and 40% of these require hospitalization.

The most common injuries suffered by older adults as a result of a fall can be very diverse, they can be superficial injuries, simple contusions, ecchymosis, superficial or deep lacerations in different parts of the body, dislocations, fractures and more serious consequences can occur that put the person's life in danger.

The purpose of this thesis work is to develop a prototype that allows the detection of a fall suffered by a person and to send an alert to previously established people about the event.

# Tabla de contenido

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1.	Introducción	2
1.2.	Planteamiento del problema	3
1.3.	Objetivo General	4
1.4.	Objetivos específicos	4
1.5.	Alcances	4
1.6.	Limitaciones	4
1.7.	Estructura de tesis	5
<b>Capítulo 2</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>6</b>
2.1.	Adulto mayor	7
2.2.	Algoritmo	7
2.3.	Caída	7
2.4.	Dispositivos vestibles	8
2.5.	Sensor	8
2.6.	Acelerómetro	9
2.7.	Teléfonos inteligentes	9
2.8.	Aceleración de la gravedad	10
<b>Capítulo 3</b>	<b>Estado del arte</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 4</b>	<b>Algoritmo para la detección de caídas</b>	<b>22</b>
4.1.	Métodos para la detección de las caídas	23
	Métodos de detección de caídas basados en monitoreo Ambiental	23
	Métodos de detección de caídas basados en dispositivos vestibles	23
4.2.	Principales Algoritmos basados en dispositivos vestibles	24
	1. Métodos de detección de caídas basados en umbrales	24
	2. Algoritmos basados en el aprendizaje automático	24
4.3.	Diseño del algoritmo	25
	Algoritmo	25
<b>Capítulo 5</b>	<b>Prototipo para la detección de caídas</b>	<b>28</b>
5.1.	Arquitectura propuesta	29
5.2.	Prototipo de la aplicación móvil	30
5.3.	Prototipo del dispositivo vestible	34
5.4.	Procesamiento de los datos	34



<b>Capítulo 6 Pruebas y resultados</b> .....	36
<b>6.1.    Diseño de la experimentación</b> .....	37
Objetivo de la experimentación .....	37
Condiciones previas.....	37
Selección de candidatos.....	39
Adquisición de datos de datos .....	40
<b>6.2.    Umbrales a utilizar en el algoritmo</b> .....	40
Umbrales experimentación 1 .....	41
Umbrales experimentación 2 .....	42
Umbrales experimentación 3 .....	42
Umbrales experimentación 4.....	43
Métricas de evaluación.....	47
<b>6.3.    Resultados</b> .....	49
Resultados experimentación 1 .....	49
Resultados experimentación 2 .....	50
Resultados experimentación 3 .....	52
Resultados experimentación 4.....	53
<b>Capítulo 7 Conclusiones y trabajo futuro</b> .....	56
<b>Referencias</b> .....	58
<b>Anexo A</b> .....	61
<b>Consentimiento informado</b> .....	61
<b>Anexo B</b> .....	63
<b>Pruebas de caminata</b> .....	63
<b>Pruebas de trote</b> .....	64
<b>Pruebas de caídas con el cuerpo estático</b> .....	65

# Lista de figuras

Figura 3.1: Diagrama de estados en la detección de caídas [29].....	16
Figura 3.2: Detección de los estados de la caída utilizando los cambios de aceleración .....	20
Figura 4.1: Diagrama de flujo del algoritmo de detección de caídas .....	27
Figura 5.1: Arquitectura del sistema .....	29
Figura 5.2: Pantalla principal del prototipo.....	30
Figura 5.3: Pantalla para seleccionar el dispositivo .....	31
Figura 5.4: Pantalla para seleccionar el dispositivo Bluetooth.....	32
Figura 5.5: Archivo CSV generado por la aplicación móvil.....	33
Figura 5.6: Notificación push de la detección de la caída.....	33
Figura 5.7: Prototipo de monitoreo .....	34
Figura 5.8: Proceso de los datos para poder detectar la caída .....	35
Figura 6.1: Posición para las pruebas de caídas .....	37
Figura 6.2: Colocación del dispositivo.....	38
Figura 6.3: Adquisición de los datos .....	40
Figura 6.4: Comparación de la aceleración de caminata y de reposo .....	46

# Lista de tablas

Tabla 2.1: Clasificación de sensores por el tipo de variable medida .....	9
Tabla 4.1: Comparación de los métodos de detección de caídas basados en dispositivos vestibles .....	25
Tabla 6.1: Características del dispositivo.....	37
Tabla 6.2: Características de las actividades .....	38
Tabla 6.3: características de los sujetos de prueba.....	39
Tabla 6.4: Umbrales experimentación 1 .....	41
Tabla 6.5: Rangos utilizados para generar los umbrales .....	42
Tabla 6.6: Umbrales obtenidos de manera aleatoria .....	42
Tabla 6.7: Sujetos de prueba seleccionados .....	42
Tabla 6.8: Umbrales utilizados en la experimentación 3 .....	43
Tabla 6.9: Valores máximos y mínimos obtenidos de las caídas .....	44
Tabla 6.10: Valores máximos y mínimos en la aceleración en etapa de reposo .....	45
Tabla 6.11: Valores máximos y mínimos en la aceleración de la caminata.....	45
Tabla 6.12: Resultados de la experimentación 3.....	47
Tabla 6.13: Estructura de la matriz de confusión.....	48
Tabla 6.14: Resultados de la experimentación 1 .....	49
Tabla 6.15: Matriz de confusión de la experimentación 1 .....	50
Tabla 6.16: Matriz de confusión de los resultados del conjunto uno de umbrales.....	51
Tabla 6.17: Matriz de confusión de los resultados del conjunto dos de umbrales .....	51
Tabla 6.18: Matriz de confusión de los resultados del conjunto dos de umbrales .....	52
Tabla 6.19: Resultados de la experimentación 3.....	52
Tabla 6.20: Matriz de confusión experimentación 3 .....	53
Tabla 6.21: Resultados de la experimentación 4.....	54
Tabla 6.22: Matriz de confusión de la experimentación 4 .....	54
Tabla 7.1: comparación de resultados de las pruebas .....	57

# **Capítulo 1**

# **Introducción**

## 1.1.Introducción

Las caídas se definen como hechos involuntarios que provocan que una persona pierda el equilibrio y como consecuencia el cuerpo termine en una superficie que lo detenga, comúnmente el suelo. Las caídas son la segunda causa de muerte por lesiones accidentales a nivel mundial. Se estima que durante un año suceden aproximadamente 37.3 millones de caídas que requieren atención médica, y a consecuencia de las caídas mueren 646,000 personas. La mayor morbilidad corresponde a adultos mayores de 65 años, a jóvenes entre 15 y 29 años y a menores de 15 años [1].

Estudios epidemiológicos arrojan como resultado que una de cada tres personas mayores de 65 años sufre una caída al año y la mitad de las personas que sufren una caída, se volverán a caer[2]. Las muertes como resultado de una caída de adultos mayores de 65 años representan tres cuartas partes de las muertes por caída en los Estados Unidos [3].

Varios estudios han demostrado que personas que consumen tres medicamentos o más, tienen mayor probabilidad de sufrir una caída [1], [2]. Los medicamentos que elevan la probabilidad de sufrir una caída en las personas de la tercera edad son los siguientes: drogas psicotrópicas, sedantes, hipnóticos, antidepresivos, benzodiazepinas y neurolépticos [3], [4].

Se han detectado una gran variedad de factores extrínsecos e intrínsecos que se han asociado a las caídas que sufre este grupo de la población. Los factores extrínsecos más comunes son los relacionados con el ambiente del hogar y los intrínsecos detectados son: las discapacidades, enfermedades crónicas agudizadas, caídas previas, cambios del cuerpo provocados por la edad y la medicación múltiple. La presencia de dos o más de estos factores está relacionado con la probabilidad de que ocurra una caída [5].

En este trabajo se presenta un prototipo para la detección de caídas, el cual utiliza un algoritmo de detección de caídas basado en umbrales. Para poder detectar las caídas utilizan los cambios de aceleración que experimenta el cuerpo de una persona en cada una de las etapas de la caída. Las mediciones de la aceleración son adquiridas utilizando el dispositivo Arduino nano 33 BLE, el cual es colocado en la cadera de las personas para poder realizar el monitoreo de las aceleraciones.

## 1.2.Planteamiento del problema

Las caídas se han convertido en una de las causas que provocan más muertes alrededor del mundo, convirtiéndose en la segunda causa de muerte por lesiones accidentales o no intencionales, provocando a nivel mundial 646,000 muertes al año [1].

El envejecimiento acelerado de la población ha provocado que se genere un nuevo problema de salud pública: las caídas de personas de la tercera edad [6]. Se estima que durante un año suceden aproximadamente 37.3 millones de caídas por adultos mayores, provocando lesiones graves en las personas que las sufrieron [1].

Estudios epidemiológicos han arrojado como resultado que una de cada tres personas mayores de 65 años, sufre una caída al año y la mitad de estas personas sufre más de una [2]. Las muertes como resultado de alguna caída de adultos mayores con edad de 65 años y mayores representan tres cuartas partes de las muertes por caída en los Estados Unidos [3].

La incidencia y la gravedad de los daños provocados por las caídas aumentan de acuerdo con la edad, ya que con la edad también se ve afectado el equilibrio y reacción de las personas de la tercera edad [7]. Las consecuencias provocadas por las caídas pueden ser físicas y psicológicas. Las consecuencias físicas más comunes son inflamaciones provocadas por el golpe y las fracturas se presentan en un 6% del total de las caídas. Mientras que las consecuencias psicológicas más comunes son la pérdida de la confianza en sí mismo y el miedo o ansiedad a sufrir de nuevo una caída [2].

Las personas con edad de 65 años y mayores están más propensas a sufrir caídas. Por cuestiones de la edad pueden presentar diversas enfermedades crónicas y/o degenerativas como lo son los problemas cardiovasculares, trastornos del sistema nervioso y la osteoporosis las cuales pueden influir en la dificultad para caminar, pérdida de equilibrio y movimiento [3], [4].

Varios estudios han demostrado que la polimedicación también influye en las caídas. Las personas que consumen tres medicamentos o más, tienen mayor probabilidad de sufrir una caída [1]–[3]. Los medicamentos que elevan la probabilidad de sufrir una caída en las personas de la tercera edad son los siguientes: drogas psicotrópicas, sedantes, hipnóticos, antidepressivos, benzodiacepinas y neurolépticos [3], [4].

La detección oportuna de las caídas de los adultos de la tercera edad se ha convertido en un factor muy importante, ya que el tiempo que transcurre desde la caída hasta el momento en que se recibe la atención médica es de vital importancia. Hay consecuencias producidas por una caída que necesitan tener una atención médica inmediata como puede ser una fractura que cause daño en los tejidos blandos o un traumatismo craneoencefálico [8]. La detección oportuna de una caída también puede evitar una deshidratación de los adultos mayores, ya que por la falta de movilidad no pueden levantarse y pasan demasiado tiempo en el suelo [9], [10].

### 1.3.Objetivo General

Implementar el método de umbrales para la detección de caídas utilizando sensores vestibles

### 1.4.Objetivos específicos

- Analizar y comparar los principales métodos de detección de caídas utilizados en la literatura
- Obtener los umbrales a través de la comprensión de las etapas de la caída en la experimentación
- Comparar diferentes métodos para generar los umbrales que son utilizados por el algoritmo
- Desarrollar un prototipo de aplicación móvil basado en el método de umbrales para la detección de caídas

### 1.5.Alcances

- Las pruebas del método se harán con personas de 3 complejiones diferentes.
- Se utilizarán sensores vestibles, no invasivos, ubicados en la cintura.
- Determinar los umbrales para detectar cada una de las etapas de la caída se realizará mediante un script en *Python* para graficar y analizar de los datos.
- La aplicación para el procesamiento de los datos para la detección y la notificación de la caída se hará en el mismo teléfono inteligente.
- La notificación será un aviso que desplegará la aplicación móvil en el mismo teléfono inteligente en el que se efectúen las pruebas.
- Una vez establecida la conexión entre el sensor y el teléfono inteligente todos los datos serán almacenados en el teléfono inteligente. Una vez almacenados los datos se tendrá la opción de convertirlos en formato CSV.

### 1.6.Limitaciones

- Las pruebas del funcionamiento del sistema se realizará mediante simulaciones de las caídas realizadas por personas jóvenes y sanas
- Los sensores utilizados no excederá el costo de 1000 pesos
- El estudio se enfocará en adultos mayores sin discapacidad motriz
- El método detectará caídas frontales solo en superficie plana

## **1.7. Estructura de tesis**

En esta sección se muestra la estructura con la que se organiza este documento.

### **Capítulo 2. Marco teórico**

En este capítulo se definen los conceptos básicos y esenciales que se utilizan a lo largo de la tesis.

### **Capítulo 3. Estado del arte**

En este capítulo se presentan los trabajos que fueron utilizados para como referencia para realizar la implementación del algoritmo de detección de caídas basado en umbrales.

### **Capítulo 4. Algoritmo para la detección de caídas**

En se presenta una explicación detallada sobre el método de detección de caídas seleccionado para esta tesis. Además de una descripción de del algoritmo implementado y el proceso con el que se obtuvieron los umbrales utilizados con el algoritmo.

### **Capítulo 5. Prototipo de detección de caídas**

En este capítulo se detalla el prototipo de software desarrollado para realizar la ejecución de pruebas del algoritmo, el cual es el encargado de obtener los datos y procesarlos para realizar la detección de la caída. También se describe el dispositivo utilizado para realizar la captación de los cambios de aceleraciones que se producen mientras una persona trae colocado el dispositivo.

### **Capítulo 6. Pruebas y resultados**

En este capítulo se presenta la descripción del entorno de experimentación, las pruebas realizadas y los resultados que se obtuvieron de los conjuntos de umbrales utilizados en la experimentación.

### **Capítulo 7. Conclusiones y trabajo futuro**

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir de las experimentaciones realizadas y de describen los trabajos futuros que podrían desarrollarse tomando en cuenta los resultados que se obtuvieron del algoritmo implementado.



# **Capítulo 2**

## **Marco teórico**

En este capítulo se definen los conceptos más importantes y relevantes para el desarrollo de esta investigación.

## **2.1. Adulto mayor**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define a un adulto mayor como una persona mayor de 60 años [11].

Los adultos mayores son considerados personas vulnerables por sus condiciones biológicas y sociales. Los adultos mayores pueden llegar a sufrir el impacto de una o más enfermedades crónicas como efecto de hábitos y costumbres que mantienen desde su juventud.

Las enfermedades más comunes en adultos mayores son las cardiopatías, accidentes cardiovasculares, discapacidad visual, pérdida de la audición y demencia.

La vulnerabilidad social que pueden sufrir se relaciona con el abandono, cuando se enfrenta a daños potenciales a su salud provocados por alguna enfermedad. También se pueden presentar violaciones a sus derechos por falta de recursos personales, sociales y legales [12].

## **2.2. Algoritmo**

En matemáticas, lógica, ciencias de la computación y en otras disciplinas relacionadas, un algoritmo es un conjunto prescrito de pasos para lograr solucionar un determinado problema, tomando en cuenta aspectos que afectan o condicionan el llegar al resultado deseado. Al seguir la consecuencia de pasos se debe de llegar al mismo resultado [13].

## **2.3. Caída**

La OMS considera que una caída es un acontecimiento involuntario que afecta a una persona que le provoque perder el equilibrio y golpee el suelo u otra superficie que lo detenga [14].

Para que un algoritmo pueda detectar si ha existido una caída se necesita definir las etapas que experimenta el cuerpo de la persona al sufrir una. Para esta investigación se tomaran en cuenta tres etapas: caída libre, impacto y reposo. Cada una de estas etapas genera un cambio de aceleración diferente, siendo la caída libre la etapa en la cual se presenta la aceleración más baja, mientras que el impacto es el que presenta el valor de la aceleración más alto y por último el reposo es la etapa en la que la aceleración se mantiene con un valor prácticamente estático [15].

Las etapas se caracterizan por:

1. Caída libre: Es la etapa que hace referencia al momento en el cual inicia la caída, en donde el cuerpo se dirige hacia el suelo y experimenta una aceleración vertical

similar a la gravedad. En esta etapa el vector de magnitud disminuye su valor aproximándose a 0 g.

2. Impacto: Representa la segunda etapa de la caída y hace referencia al momento donde el cuerpo choca contra. En esta etapa el vector de magnitud eleva su valor debido a la elevada desaceleración que experimenta el cuerpo.
3. Reposo: Después de sufrir una caída, el cuerpo se mantiene inmóvil durante un tiempo. Este tiempo puede ser largo si el sujeto que sufrió la caída se encuentra inconsciente.

## 2.4. Dispositivos vestibles

El término dispositivo vestible, hace referencia a las tecnologías que pueden acoplarse a prendas de vestir o como accesorios que utilizan las personas (pulseras, relojes, bandas para la cabeza, etc.). Estos dispositivos pueden llegar a realizar funciones que tienen los teléfonos móviles y computadoras portátiles. Son utilizados para recabar información de la persona que los utiliza [16], [17].

Estos dispositivos cuentan con sensores que pueden reconocer el entorno de una persona o su estado de salud. Cada uno está diseñado para realizar una o varias tareas específicas, como son *the fitness bands* (bandas para medir el estado físico de una persona), otros para recibir notificaciones como los denominados *Smartwatches* (relojes inteligentes) o los *Smart rings* (anillos inteligentes), los cuales notifican la llegada de mensajes, correos, etc.

Comúnmente los dispositivos vestibles establecen comunicación con otros dispositivos, dicha comunicación puede realizarse vía Internet o Bluetooth. En algunas ocasiones la comunicación se realiza con el objetivo de informar la actividad física de la persona (ritmo cardíaco, temperatura, oxigenación, etc.). No todos están diseñados para el monitoreo de la salud de las personas, hay algunos capaces de interactuar con otros teléfonos inteligentes, televisores, carros, entre otros [16].

## 2.5. Sensor

Los sensores son dispositivos que imitan la capacidad de percepción con la que cuentan los seres humanos. Es por esto por lo que es muy sencillo poder encontrarlos en la mayoría de las áreas tecnológicas. Los sensores están relacionados con los distintos sentidos de los humanos: vista, oído y tacto, por lo tanto, nos proporcionan información de ciertos aspectos que nos rodean para así poder procesarlos [18]. Los sensores envían señales eléctricas, ya sean analógicas o digitales, debido a que el dominio físico es el más utilizado en los sistemas de medida [19].

Los sensores pueden clasificarse de distintas formas, pero las más comunes son por el tipo de variable a medir o por el tipo de transducción utilizado [19]. En la tabla 2.1 se muestra la clasificación por el tipo de variable a medir la cual será tomada en cuenta a lo largo de esta investigación:

Tabla 2.1: Clasificación de sensores por el tipo de variable medida

<b>Clasificación de los sensores según la variable física a medir</b>	<b>De posición, velocidad y aceleración</b>
	De nivel y proximidad
	De humedad y temperatura
	De fuerza y deformación
	De flujo y presión
	De color, luz y visión
	De gas y pH
	Biométricos
	De corriente

## 2.6. Acelerómetro

Los acelerómetros son dispositivos que miden la aceleración, estos son dispositivos electromecánicos que detectan las fuerzas de aceleración. Estas pueden ser estáticas o dinámicas; las fuerzas estáticas incluyen la gravedad, mientras que las fuerzas dinámicas pueden incluir vibraciones y movimiento. El sistema internacional de unidades indica que las aceleraciones se miden en metros por segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ) o por la fuerza G (g) que mide la aceleración de la gravedad, para realizar estas mediciones se hace uso de diferentes ejes que pueden ser de una, dos o tres dimensiones (X, Y, Z) [20], [21].

## 2.7. Teléfonos inteligentes

Un teléfono inteligente es un dispositivo que cuenta con una gran capacidad de procesamiento, comunicación y almacenamiento. Estos dispositivos facilitan el manejo de contenidos multimedia y proporcionan una facilidad para poder conectarse a redes inalámbricas. Los teléfonos inteligentes integran un gran conjunto de sensores que son utilizados para la detección de señales físicas (aceleración, sonido, proximidad, campo magnético, entre otros) [22].

Para denominar un teléfono móvil como inteligente se deben cumplir las siguientes cualidades:

- Pantalla táctil
- Sistema operativo
- Conexión a internet ya sea por Wifi o Red de telefonía móvil
- Capacidad multitarea
- Teclado virtual [23]

## 2.8. Aceleración de la gravedad

La aceleración de la gravedad o también conocida como aceleración gravitacional se define como la intensidad del campo gravitatorio de la Tierra. La aceleración de la gravedad es la atracción universal que impulsa los cuerpos hacia el centro de la tierra, es la fuerza que determina el peso de los cuerpos [24].

La aceleración de la gravedad se identifica con la letra  $g$  y se define como el incremento constante de la velocidad por unidad de tiempo que se ejerce en un cuerpo en caída libre. El sistema internacional de unidades (SI) define que la magnitud de la aceleración de la gravedad se mide en unidades de  $m/s^2$  y su valor aproximado en la superficie terrestre es de  $9.8 m/s^2$  [24], [25].

# **Capítulo 3**

## **Estado del arte**

En este capítulo se presentan los trabajos de investigación que se tomaron en cuenta para el desarrollo de esta investigación. Estos trabajos abordan el tema de la detección de caídas, en los cuales se describen los métodos utilizados, las tecnologías utilizadas, la ubicación de colocación del dispositivo de monitoreo y los resultados que se obtuvieron.

En esta sección se describen cada uno de los criterios utilizados para describir cada una de las investigaciones relacionadas con la detección de caídas. Los criterios utilizados son los siguientes:

- **Descripción general:** Se describen de manera general los aspectos más relevantes de cada una de las investigaciones.
- **Tecnologías utilizadas:** Se describen las tecnologías y algoritmos más relevantes utilizados en cada una de las investigaciones
- **Resultados obtenidos:** Describe los resultados obtenidos en las investigaciones, como el margen de error, la exactitud de la detección y la manera en que funcionó el algoritmo implementado.
- **Conclusiones:** Describen las conclusiones o las ventajas y desventajas que se identificaron de los componentes utilizados, que serán de utilidad para el tema de investigación.

### **Título: Detección de caídas usando teléfonos inteligentes para mejorar la seguridad de los adultos mayores en el hogar**

#### **Descripción general:**

En [26] se evalúa el potencial que tienen los teléfonos inteligentes para ser utilizados en proyectos de detección de caídas. Los teléfonos inteligentes ofrecen ventajas como la rentabilidad y su fácil disponibilidad hacen que sea sencillo el proceso de despliegue de los sistemas de detección de caídas.

En esta investigación la detección de caídas se realizó mediante los cambios de aceleración, el algoritmo utilizado fue el ACFDA, el cual es un algoritmo que está basado en umbrales. El algoritmo utiliza los cambios de aceleración para generar un resultado. Fue puesto a prueba utilizando dos conjuntos de datos que fueron recopilados con ayuda de dos teléfonos inteligentes que fueron el Google Nexus 4 y el ZTE Nubia NX511j.

Para esta investigación los datos se recopilaron colocando el teléfono inteligente en el bolsillo cerca del muslo izquierdo de un hombre de 27 años y una altura de 175 cm. Para determinar los umbrales que utiliza el algoritmo, se requiere recopilar datos de diferentes sujetos de investigación. La literatura sugiere un promedio de 17 sujetos de experimentación para la detección de caídas.

### **Tecnologías utilizadas:**

La recopilación de los datos se hizo mediante los sensores internos que componen el teléfono inteligente. En esta investigación solo se tomó en cuenta la información de los acelerómetros de cada uno de los celulares. Después de recopilar los datos de la aceleración, se normalizaron con la unidad de gravedad (g), la normalización se realizó con ayuda de la aplicación *Physics Toolbox Accelerometer* instalada en los teléfonos inteligentes utilizados.

Para realizar las pruebas con los dos conjuntos de datos que fueron recopilados se utilizó el algoritmo ACFDA basado en umbrales. El algoritmo se implementó mediante el lenguaje de programación Python.

### **Resultados obtenidos:**

Los umbrales determinados para el algoritmo probado varían con cada teléfono inteligente utilizado en la experimentación.

Los resultados mostraron que para lograr puntajes altos en sensibilidad, especificidad y exactitud es necesario recopilar datos de más sujetos de información, esto para lograr mejores resultados y disminuir los falsos positivos que arrojó el algoritmo durante la experimentación. La literatura indica que se debe tomar en cuenta un promedio de 17 sujetos de experimentación para mejorar la obtención de los umbrales a utilizar.

### **Conclusiones:**

El hallazgo importante de esta investigación es que los umbrales que son utilizados para el cambio de aceleración en el eje vertical varían según el dispositivo con el que se realice la detección de la caída. Para poder evaluar el funcionamiento del algoritmo de detección de caídas es indispensable realizar la calibración de los sensores, lo cual no es posible con los sensores de un teléfono inteligente, lo cual limita el uso de estos dispositivos para la detección de caídas.



## **Título: Detector automático de caídas y monitorización de actividad para personas mayores**

### **Descripción general:**

En [27] se presenta un dispositivo que provee la ubicación del usuario, la detección automática de caídas y el monitoreo de actividades que realiza el usuario diariamente, el dispositivo puede ser utilizado tanto en interiores como en exteriores. Este proyecto toma en cuenta un centro de llamadas donde se gestiona la información de las situaciones de emergencia.

El dispositivo se debe colocar en el cinturón de la persona que será monitoreada. Se eligió esa ubicación como la más discreta, tomando en cuenta el tamaño y peso del dispositivo. El módulo móvil cuenta con un botón accesible para poder cancelar una falsa alarma y también permite activarla voluntariamente. Cuenta con señales luminosas y auditivas para notificar el estado del módulo móvil.

El trabajo menciona que la detección de caídas se lleva a cabo en tiempo real, mientras el usuario realiza sus actividades del día. El algoritmo detecta el momento en que se produce una caída utilizando patrones de caídas, de esta manera el sistema diferencia entre las actividades físicas y las caídas. Al realizar dicha diferenciación se disminuyen los falsos positivos.

### **Tecnologías utilizadas:**

Los algoritmos para el seguimiento de la actividad y la detección de caídas utilizados en este trabajo necesitan la información en tiempo real de la actividad cinemática del usuario para funcionar. Por lo cual se utilizó un acelerómetro biaxial para detectar los movimientos que realiza el usuario en sus actividades diarias.

El algoritmo utilizado para la detección de las caídas está basado en la comparación de datos instantáneos provenientes del acelerómetro. Reconoce patrones y parámetros de actividad y es capaz de diferenciar entre actividades físicas y caídas. El algoritmo está diseñado para detectar la mayoría de los tipos de caídas (de frente, de espaldas, lateralmente y pérdida de conocimiento) y diferenciarlas de diversas actividades tales como: sentarse, subir o bajar escaleras, correr, etc.

### **Resultados obtenidos:**

Durante las pruebas del sistema intervinieron cincuenta personas con una edad de 60 años o más. Las personas que participaron en las pruebas manifestaron que las funciones que proporciona el sistema son adecuadas y se ajustan a sus necesidades, y se mostraron satisfechos con respecto a la fiabilidad y la seguridad del sistema.

### **Conclusiones:**

El trabajo muestra el prototipo de un sistema para la detección de caídas, el cual cuenta con diversas funcionalidades que lo hacen apto para el uso de los adultos mayores, ya que no afecta las actividades que realizan a lo largo de su día. En una versión comercial se deberá considerar reducir el tamaño y peso del dispositivo sensor, ya que puede llegar a ser muy cansado para el adulto mayor portarlo durante el día.

La información presentada en el trabajo muestra que una posición del cuerpo que se debe de considerar para colocar un dispositivo de detección de caídas puede ser la cintura del adulto mayor, porque en esa posición puede llegar a ser imperceptible y más cómodo para una persona mayor. Además, se menciona lo importante que es tener una opción para enviar una alerta de manera manual y de fácil acceso en caso de sufrir una caída que no sea detectada o se presente alguna emergencia en la cual el adulto mayor necesite de la ayuda de algún cuidador o familiar.

### **Título: *Sistema de detección de caídas humanas basado en teléfonos inteligentes***

#### **Descripción general:**

En [28] se presenta un trabajo que sirve para la detección de caídas usando el acelerómetro y giroscopio que se encuentran incluidos en los teléfonos inteligentes. Dicho trabajo se divide en tres componentes de software, el primer componente se encarga de detectar en qué posición del cuerpo del usuario se encuentra el dispositivo (bolsillo de pecho de la camisa o en el bolsillo lateral del pantalón). El segundo componente es el encargado de detectar las caídas mediante el uso de umbrales que se determinan de acuerdo con la posición del dispositivo. El último componente es el encargado de actualizar constantemente los valores mientras los algoritmos realizan su función.

Este trabajo tiene como objetivo resolver algunos problemas expuestos en otros trabajos analizados y busca proporcionar los siguientes beneficios:

- Proporcionarle al usuario más opciones para utilizar su teléfono inteligente.
- El usuario solo requiere de los sensores integrados en su teléfono inteligente.
- Utilizar las capacidades del mismo teléfono inteligente del usuario, no requiriendo de un dispositivo extra.
- Sin costos adicionales para el usuario (suponiendo que el usuario ya cuenta con un teléfono inteligente).

#### **Tecnologías utilizadas:**

En este trabajo los datos son adquiridos mediante los sensores (acelerómetro y giroscopio) integrados en los teléfonos inteligentes, para este proyecto se utilizó un teléfono Android Nexus 5, que utiliza la versión 4.4.2 del sistema operativo.

El algoritmo propuesto detecta la caída cuando se cumplen tres factores desencadenantes. El primer factor (ST1) se activa cuando se detecta un pico anormal en la amplitud pico, el segundo factor (ST2) se activa cuando el promedio actual de la señal se estabiliza en cero y el último factor se activa cuando un periodo de inactividad es constante durante una ventana de tiempo predefinido. La ilustración 3.1 muestra el diagrama de estados del algoritmo para detectar la caída.

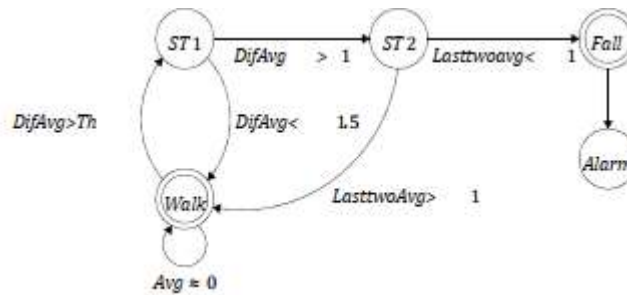


Figura 3.1: Diagrama de estados en la detección de caídas [28]

### Resultados obtenidos:

Se realizaron diferentes experimentos para evaluar las detecciones que determina cada uno de los algoritmos utilizados en este trabajo, en total se realizaron 180 experimentos, 36 sobre la selección de la ubicación del dispositivo, 36 para la detección de caídas y 108 de actividades que se realizan comúnmente durante el día.

Los resultados arrojados por la experimentación sobre la exactitud de los algoritmos fueron del 72% en el caso del algoritmo para la selección de la ubicación del dispositivo, para el algoritmo de detección de caídas fue de 81.3% dando como resultado que la mejor posición para detectar una caída es cuando se está leyendo o escribiendo un mensaje.

### Conclusiones:

La información presentada en este trabajo es de gran utilidad, ya que ofrece datos sobre las mejores posiciones para colocar el dispositivo de detección y además muestra los problemas que se cometen al realizar trabajos de este tipo, como el de anclar al usuario a utilizar el dispositivo de una sola manera. El algoritmo utilizado muestra buenos resultados y se considera de interés este tipo de algoritmos para realizar la detección de caídas.

## **Título: *PerFallID*: Sistema generalizado de detección de caídas utilizando teléfonos móviles**

### **Descripción general:**

En [29] se propone utilizar los teléfonos móviles como plataforma de desarrollo para sistemas de detección de caídas. Consideran que los teléfonos móviles pueden funcionar en cualquier parte, facilitando la implementación de los sistemas ya que todos los componentes necesarios ya están integrados y proporcionan la comunicación en caso de una caída.

El algoritmo utilizado está diseñado para funcionar con teléfonos móviles. La detección de caídas se realiza utilizando los datos de aceleración proporcionados. Los acelerómetros de un teléfono móvil suelen proporcionar los datos de aceleración de los ejes  $x$ -,  $y$ - y el eje  $z$ -, cada una de las direcciones se representan como  $A_x$ ,  $A_y$  y  $A_z$  la aceleración total del cuerpo del teléfono se calcula con la ecuación 1.

$$|AT| = \sqrt{|A_x|^2 + |A_y|^2 + |A_z|^2} \quad (1)$$

Las interfaces del sistema que se propone están diseñadas especialmente para facilitar el uso del sistema a los adultos mayores siguiendo las ideas de diseño *Jitterbug*. El sistema cuenta con las siguientes características de interfaz: los botones son grandes e iluminados para poder diferenciar entre los botones, el color de la pantalla muestra todo con claridad y no se implementaron menús que provoquen confusión para los usuarios y puedan ingresar a todas las opciones que presenta el sistema.

### **Tecnologías utilizadas:**

El experimento se realizó utilizando un teléfono móvil G1 con sistema Android que cuenta con una CPU de doble núcleo basada en ARM, 98 MB de RAM y 70 MB de almacenamiento interno.

El algoritmo utilizado se basa en los valores de aceleración, que se detecta en el dispositivo móvil, si la diferencia de aceleración dentro de una ventana de tiempo de activación excede el umbral, se activa el reconocimiento de patrón para verificar la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la aceleración si esta diferencia es menor que otro umbral se considera la caída detectada.

### **Resultados obtenidos:**

El rendimiento del algoritmo se midió en términos de falsos negativos (FN) y falsos positivos (FP). El falso negativo sucede cuando ocurre una caída y el sistema no la detecta. El falso positivo ocurre cuando el sistema emite la alarma de caída cuando no sucedió. Cuanto menor sea el número de FN y FP, mejor será el rendimiento del algoritmo de detección.

Después de seleccionar los valores de los umbrales que logran el mejor equilibrio entre FN y FP, se descubrió que se obtienen diferentes rendimientos cuando el dispositivo se coloca en diversas posiciones y dando como resultado que la mejor posición para la

detección de caídas con este algoritmo es sujetar el teléfono a la cintura, con el rendimiento del valor promedio de FN de 2.67% y el valor de FP de 8.7%.

### **Conclusiones:**

La información presentada en este trabajo es de interés porque se demuestra que al ubicar el dispositivo de detección en la cintura del adulto mayor se mejora el rendimiento del algoritmo basado en umbrales. Además, se dan las bases para realizar el diseño de una interfaz que facilite la interacción del adulto mayor con el sistema. Si los umbrales se definen de manera correcta el rendimiento del algoritmo será mejor.

### **Título: Comparación de algoritmos de detección de caídas de baja complejidad para acelerómetros conectados al cuerpo**

#### **Descripción general:**

En [30] se presenta una investigación que tiene como objetivo evaluar distintos algoritmos de baja complejidad utilizados para la detección de caídas, utilizando acelerómetros triaxiales colocados en distintas partes del cuerpo (cintura, muñeca y cabeza). Se investigaron tres algoritmos que utilizan dos o más etapas de la caída para realizar la detección: comienzo de la caída, velocidad, impacto y la postura de la persona después de sufrir la caída.

El algoritmo 1 utiliza dos etapas de la caída: el impacto y la postura de la persona después de haber sufrido la caída.

El algoritmo 2 utiliza tres etapas de la caída: el comienzo de la caída, el impacto y la postura de la persona después de haber sufrido la caída.

El algoritmo 3 utiliza cuatro etapas de la caída: el comienzo, la velocidad, el impacto y la postura de la persona después de haber sufrido la caída.

#### **Tecnologías utilizadas:**

Las aceleraciones de las caídas se midieron sincrónicamente en la cintura, muñeca y cabeza con ayuda de acelerómetros triaxiales, cada uno construido con tres acelerómetros capacitivos uniaxiales. Cada acelerómetro se conectó a un registrador de datos separado y cada uno de los tres ejes se calibró estáticamente en relación con la gravedad (g).

El procesamiento de los datos se realizó cargando los datos en una computadora, para que fueran convertidos en unidades gravitacionales con ayuda de un programa hecho a la medida en MATLAB. El procesamiento de datos, el análisis y la simulación de las caídas se realizaron con un programa en LabView utilizando un formato de datos de punto flotante.

#### **Resultados obtenidos:**

Sensor en la cabeza:

El algoritmo 1 detectó entre el 97% y el 98% de las caídas independientemente de los parámetros utilizados para la detección de impactos. La sensibilidad del algoritmo 2 fue

menor en comparación con la sensibilidad del algoritmo 1, detectando caídas hacia el frente de manera eficiente en comparación con las caídas hacia atrás y hacia los lados. El algoritmo 3 detectó menos de la mitad de las caídas.

Sensor en la muñeca:

Los impactos asociados a las caídas se detectaron de manera eficiente utilizando el algoritmo 1 teniendo una sensibilidad moderada (53% - 84%). Para el algoritmo 2 la sensibilidad estuvo entre el 41% y el 73% entre las direcciones de la caída. El algoritmo 3 tuvo una sensibilidad en general de 37%.

Sensor en la cintura:

La sensibilidad de la detección de caídas de los diferentes algoritmos en la cintura estuvo entre el 76% y el 97%. Las caídas fueron mejor conocidas con el algoritmo 1. Las caídas se detectaron con buenos resultados, pero las caídas hacia atrás solo se detectaron el 76%.

En general el algoritmo 1 y el algoritmo 2 detectaron las caídas hacia adelante y los laterales de mejor manera que las caídas que son hacia atrás. Mientras el algoritmo 3 tuvo una sensibilidad promedio del 76%.

### **Conclusiones:**

En el presente trabajo los autores realizan la comparación de tres diferentes algoritmos utilizados para realizar la detección de caídas. El trabajo es de gran ayuda para el desarrollo de la tesis porque muestra tres opciones de algoritmos y demuestran los diferentes resultados obtenidos al colocar los sensores en diferentes partes del cuerpo. Aunque se utilizan los mismos algoritmos al cambiar de posición el sensor se presentan resultados que pueden llegar a variar bastante.

### **Título: Detección de caídas humanas con un acelerómetro digital de 3 ejes**

#### **Descripción general:**

En[15] el objetivo de este trabajo es proponer una nueva solución para la detección de caídas utilizando un acelerómetro de tres ejes ADXL345. En este trabajo se utiliza un algoritmo que utiliza los estados por los que pasa una persona al sufrir una caída para realizar la detección de las caídas.

Las personas mayores al tener un movimiento comparativamente lento, hace que los cambios de aceleración mientras caminan no sean significativos para ser tomados en cuenta como un problema que pueda afectar el desempeño en la detección de las caídas. El cambio de aceleración más significativo que se puede presentar durante las actividades diarias de las personas mayores es mientras se sientan.

El algoritmo utilizado para realizar la detección de las caídas toma en cuenta cuatro estados de la caída. A continuación, se mencionan estos estados:

1. Caída libre: Este estado hace referencia al momento en el que inicia todo tipo de caída, donde el cuerpo se aproxima hacia el suelo con una aceleración vertical semejante a la gravedad. Por lo tanto, esta es la primera base para

determinar el estado de caída que podría ser detectado por la interrupción FREE\_FALL del ADXL345.

2. Impacto: Este estado se refiere al momento en el que el cuerpo choca contra el suelo u otros objetos. Este estado es detectado por la función de interrupción de actividad que es proporcionada por ADXL345.
3. Reposo: Este estado toma en cuenta el tiempo de reposo que se presenta después de haber sufrido una caída.
4. Posición Horizontal: En este estado se verifica la posición del cuerpo antes y después de haber sufrido una caída.

En la ilustración 3.2 se muestran los 4 estados y cambios de aceleración por los que pasa una persona en la caída.

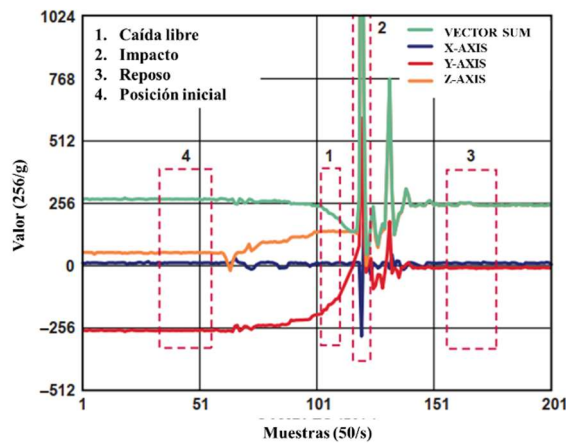


Figura 3.2: Detección de los estados de la caída utilizando los cambios de aceleración

### Tecnologías utilizadas:

En este trabajo se utilizó un acelerómetro triaxial ADXL345 que cuenta con una salida digital. Este sensor cuenta con una variedad de funciones en las que se incluyen la detección de estado de movimiento e interrupciones flexibles, estas funciones facilitan la implementación del algoritmo planteado para realizar la detección de la caída.

En el trabajo se aprovechan las características con las que cuenta el dispositivo, esto hace que la complejidad de la implementación del algoritmo se reduzca, provocando que se necesiten pocos requisitos para poder acceder a los valores reales del acelerómetro o para poder realizar cualquier cálculo.

### Resultados obtenidos:

En el trabajo no se presentan los resultados obtenidos sobre el funcionamiento del algoritmo propuesto para realizar la detección de la caída. Como resultado obtenido se presenta que el sensor ADXL345 es un acelerómetro potente y que cuenta con las funciones necesarias para facilitar la implementación de un algoritmo para la detección de las caídas, en gran parte se debe a la facilidad que tiene para acceder a los datos de la medición y a la baja complejidad que presenta para realizar la implementación del algoritmo.

**Conclusiones:**

En este trabajo se utiliza un algoritmo basado en umbrales y se describe cada una de las etapas de la caída que pueden ser utilizadas por un algoritmo para realizar la detección de una caída. Se muestra de manera gráfica como se puede identificar cada una de las etapas de la caída.



# **Capítulo 4**

## **Algoritmo para la detección de caídas**

En este capítulo se mencionan los diferentes métodos de detección de caídas que existen y las ventajas y desventajas de utilizar cada uno de ellos. También se muestran las opciones de algoritmos que se podían elegir tomando en cuenta las características del proyecto y por último se describe el algoritmo seleccionado para ser utilizado en esta investigación.

#### **4.1.Métodos para la detección de las caídas**

Los métodos de detección de caídas son la propuesta para utilizar una determinada técnica para poder detectar y caracterizar el fenómeno de la caída.

##### **Métodos de detección de caídas basados en monitoreo Ambiental**

En esta categoría se incluyen los sistemas de detección que utilizan sensores los cuales son instalados alrededor del entorno del usuario y son los encargados de monitorear las actividades que realizan las personas diariamente. Las tecnologías más utilizadas en este tipo de detectores son los sensores infrarrojos y los que utilizan cámaras para el monitoreo [27].

Ventajas:

- La persona no porta ningún tipo de dispositivo de detección de caídas, puede que incluso no se entere que está siendo monitoreada.
- Los dispositivos instalados se alimentan de manera continua, no dependen de baterías.

Desventajas:

- Los muebles del lugar, personas u otros objetos pueden afectar la precisión de la detección de la caída
- Es necesario instalar diversas tecnologías para evitar puntos ciegos dentro de cada una de las habitaciones
- Costo elevado de implementación

##### **Métodos de detección de caídas basados en dispositivos vestibles**

En esta categoría se incluyen los sistemas de detección que utilizan sensores que puede llevar una persona sin afectar las actividades de la vida diaria. Estos sistemas utilizan generalmente los sensores integrados en equipos móviles tales como Smartphones, pulseras inteligentes, dispositivos portables, etc. [27]. En este estudio sólo se consideraron trabajos que utilizan como dispositivo sensor acelerómetros integrados de 2 y 3 ejes.

Ventajas:

- Se puede realizar el monitoreo en múltiples espacios, abiertos o cerrados
- Monitoreo constante en diversos espacios
- Un solo dispositivo de detección puede ofrecer un grado adecuado de precisión
- Los muebles, personas u otros objetos no son un obstáculo para su funcionamiento.
- Al preinstalarse los sensores en la instalación puede asegurarse su suministro constante de energía eléctrica
- Pueden instalarse diversos tipos de sensores para el monitoreo

Desventajas:

- La autonomía del dispositivo depende del respaldo de la batería.
- El usuario debe de recordar colocarse el dispositivo correctamente.

- El usuario puede dañar el dispositivo voluntaria o involuntariamente impidiendo su funcionalidad.

## **4.2. Principales Algoritmos basados en dispositivos vestibles**

Después de haber analizado la ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de detección de caídas y tomando en cuenta los requisitos y el tiempo de desarrollo para esta investigación, se optó por utilizar el método basado en dispositivos vestibles.

### **1. Métodos de detección de caídas basados en umbrales**

Estos algoritmos utilizan límites (umbrales) para detectar las distintas etapas de la caída, generalmente los límites superiores, que al ser alcanzados o rebasados desencadenan acciones para analizar y verificar que ha sucedido una caída.

Ventajas:

- Bajo consumo de recursos computacionales
- Utiliza cálculos aritméticos simples para realizar la detección de la caída [31].

Desventajas:

- Es difícil determinar el umbral que brinda mejores resultados
- Una mala elección en los umbrales puede ocasionar que se presenten detecciones de caídas erróneas
- No existe un estándar para definir los umbrales
- La mayoría de las investigaciones realizadas, se han probado solo en ambientes controlados [32]

### **2. Algoritmos basados en el aprendizaje automático**

#### **2.1. Algoritmos de detección de caídas basados en redes neuronales**

Los algoritmos de redes neuronales imitan el comportamiento del pensamiento humano, que pasa información entre neuronas para obtener un resultado. Se componen por neuronas que a su vez están dentro de una capa y se comunican mediante enlaces llamados pesos. Los pesos pueden aumentar o inhibir la activación de las neuronas con las que se comunica.

Ventajas:

- Este tipo de algoritmos puede diferenciar entre actividades de la vida diaria y caídas
- Al tomar en cuenta la naturaleza de varias actividades evita errores

Desventajas:

- Es necesario contar con un dispositivo extra como una computadora para realizar el entrenamiento de la red
- La aplicación necesita entrenarse antes de utilizarse
- Consume mayores recursos computacionales
- Un mal entrenamiento de la red puede influir en la eficacia de la detección de caídas.

#### **2.2. Algoritmos de detección de caídas basados en árboles de decisión**

Estos tipos de algoritmos utilizan las comparaciones que están presentes en los árboles de decisión generados. Los árboles de decisión son generados utilizando los puntos mínimos y máximos en la aceleración tomando en cuenta actividades de la vida diaria y diferentes tipos de caídas. Una vez teniendo los árboles se

genera el algoritmo, utilizando comparaciones de los cambios en la aceleración para determinar si se trata de alguna actividad de la vida diaria o de algún tipo de caída.

Ventajas:

- Implementación sencilla.
- Bajo consumo de recursos computacionales
- Este tipo de algoritmos puede diferenciar entre actividades de la vida diaria y caídas

Desventajas:

- Se deben de realizar distintas experimentaciones para obtener los datos que servirán para generar los árboles de decisión
- Una mala experimentación en la medición de las caídas puede influir en la eficacia en la detección de la caída.
- Se necesita contar con una gran cantidad de datos para generar el árbol de decisión y otro para probar el funcionamiento.

### 4.3. Diseño del algoritmo

Una vez analizados los métodos de detección de caídas que están basados en dispositivos vestibles, se eligió usar un algoritmo basado en umbrales. Este algoritmo se adapta al proyecto porque al necesitar bajos recursos computacionales para su funcionamiento puede utilizarse dentro de un teléfono inteligente sin afectar su funcionamiento. En la tabla 4.1 se muestra la comparación de los algoritmos.

*Tabla 4.1: Comparación de los métodos de detección de caídas basados en dispositivos vestibles*

Método de detección de caídas	Requisitos de procesamiento	Requisitos de configuración
Umbrales	Bajo	Bajo
Redes neuronales	Alto	Alto
Árboles de decisión	Bajo	Alto

#### Algoritmo

El algoritmo elegido toma en cuenta tres etapas de la caída (caída libre, impacto y el reposo), el algoritmo tiene como entrada los tres ejes (X, Y y Z) del acelerómetro, ya con los valores de los ejes de calcula el vector de magnitud y por último el algoritmo compara los datos del vector de magnitud con los umbrales seleccionados para cada una de las etapas de la caída tomadas en cuenta. A continuación de describe cada uno de los pasos que sigue el algoritmo para poder detectar una caída y el diagrama de flujo generado del algoritmo.

Entradas:

- Umbral de caída libre:
- Umbral de impacto:
- Umbral de reposo:
- Los ejes x, y y z del acelerómetro

Inicio

1. Obtener los valores de los 3 ejes del acelerómetro
2. Calcular el vector de magnitud
3. Verificar si el valor del vector de magnitud es igual o menor que el umbral de caída libre

Si el valor del vector de magnitud es igual o menor al umbral de caída libre

Se continua al paso 4

Si no

Se regresa al paso 1

4. Se monitorea la aceleración en un lapso de tiempo máximo de 2 segundos para verificar si el vector de magnitud es igual o mayor el umbral del impacto

Si el valor del vector de magnitud es igual o mayor al umbral de impacto

Se continua al paso 5

Si no

Se regresa al paso 1

5. Se espera un tiempo de 1 segundo para evitar que se tomen en cuenta los revotes de la caída
6. Se monitorea que el valor del vector de magnitud se mantenga entre el umbral inferior y el umbral superior durante un tiempo de 2 segundos

Si se mantiene dentro del rango durante los 2 segundos

Se detecta la caída

Si no

Se regresa al paso 1

Fin

## Diagrama de flujo

En la ilustración 4.1 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado.

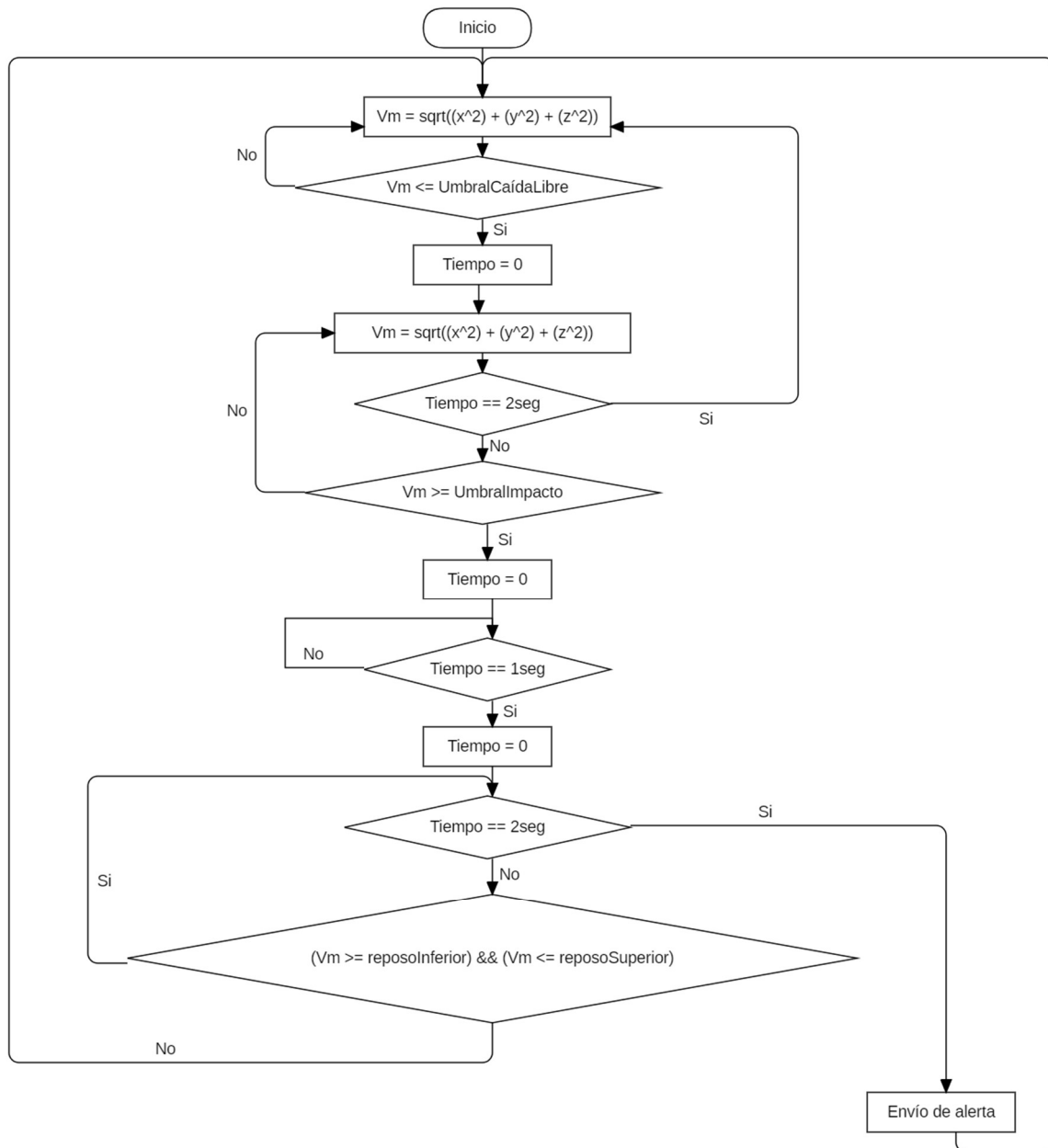


Figura 4.1: Diagrama de flujo del algoritmo de detección de caídas

# **Capítulo 5**

## **Prototipo para la detección de caídas**

En este capítulo se describe el prototipo que fue desarrollado para poder obtener los datos del acelerómetro del dispositivo de monitoreo y para implementar el algoritmo de detección de caídas seleccionado para esta investigación. Este capítulo contiene tres secciones: Arquitectura propuesta, el prototipo de la aplicación móvil, el prototipo del dispositivo vestible que se desarrolló y el procesamiento de los datos que se realiza en el dispositivo móvil.

### 5.1.Arquitectura propuesta

La arquitectura de software es una vista del sistema que incluye los componentes principales, la interacción que hay entre ellos y como se coordinan para que el sistema pueda lograr el objetivo por el que fue desarrollado. La vista arquitectónica es una vista que proporciona una abstracción del sistema a un alto nivel de comprensión, lo que permite que un usuario sin conocimiento especializado pueda comprender el funcionamiento del sistema. La ilustración 5.1 muestra la arquitectura propuesta para el desarrollo del prototipo.

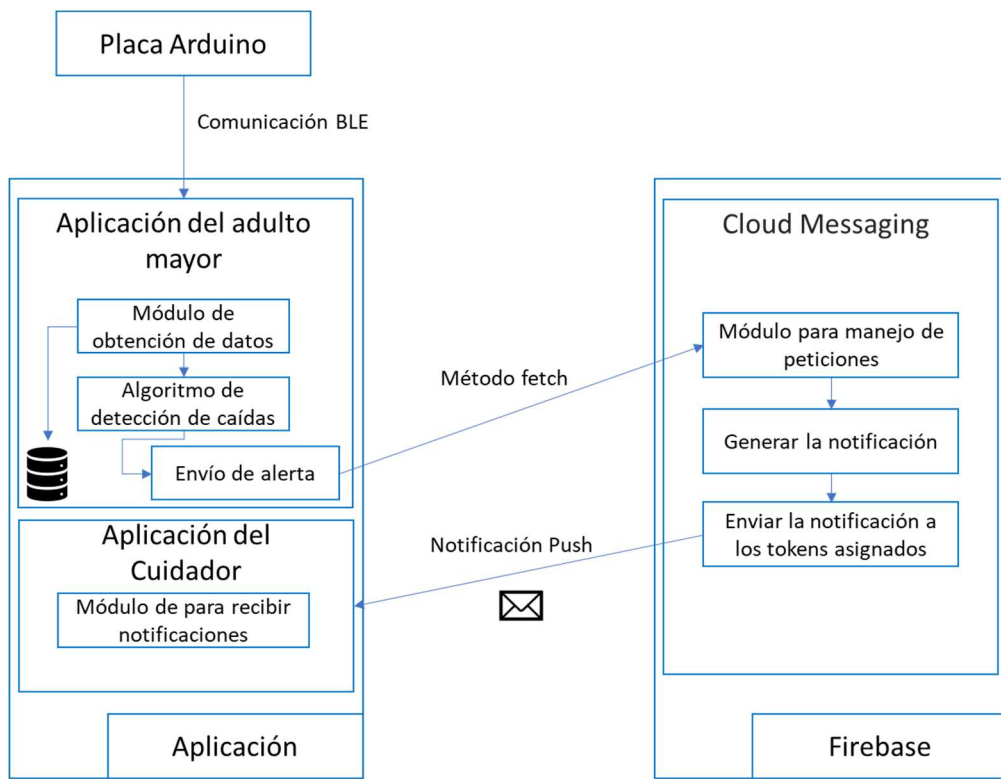


Figura 5.1: Arquitectura del sistema



## 5.2. Prototipo de la aplicación móvil

El desarrollo de la aplicación móvil fue realizado con *React Native*, el cual es un Framework para el desarrollo de aplicaciones nativas en Android y iOS en el lenguaje JavaScript. El *Framework* permite la compilación del código a una instancia nativa para el dispositivo móvil [33].

La aplicación móvil para la captación de datos permitió una conexión entre el prototipo de la placa Arduino nano 33 BLE y el dispositivo móvil, los datos capturados por el prototipo fueron almacenados localmente, para una posterior exportación aun archivo en formato CSV.

La figura 5.2 muestra la pantalla principal de la aplicación móvil, dentro de ella se encuentran dos secciones la primera compuesta por un Input para ingresar el nombre de la experimentación para la detección de caídas. La segunda sección consiste en una lista desplegable de los experimentos realizados.

La segunda sección es una lista desplegable que muestra las experimentaciones que se han realizado anteriormente, en donde cada una de ellas tiene dos opciones. La primera opción tiene como función eliminar la experimentación de la base de datos local y se identifica con un icono de eliminación. La segunda posible acción para cada una de las experimentaciones es para guardar los datos de la experimentación en un formato CSV.

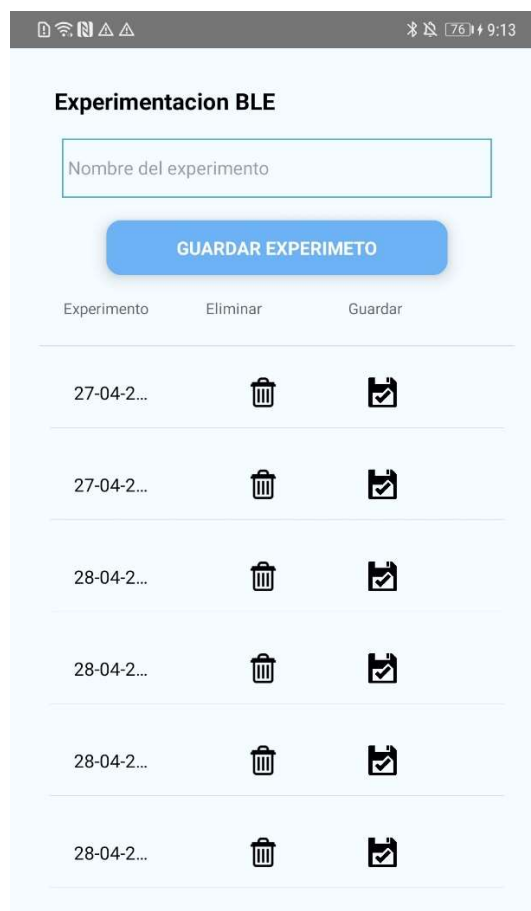


Figura 5.2: Pantalla principal del prototipo

Después de poner el nombre del experimento y se oprime el botón de “Guardar experimento”, la siguiente pantalla es donde se debe de seleccionar el dispositivo Bluetooth que estará enviando los datos del acelerómetro. Para poder visualizar los dispositivos disponibles el usuario debe de oprimir el botón “Buscar dispositivos”, con esto se realiza un escaneo de los dispositivos cercanos y se muestra una lista para que el usuario pueda seleccionar el dispositivo que quiera utilizar. En la ilustración 5.3 se muestra la pantalla de la aplicación después de realizar el escaneo de los dispositivos.

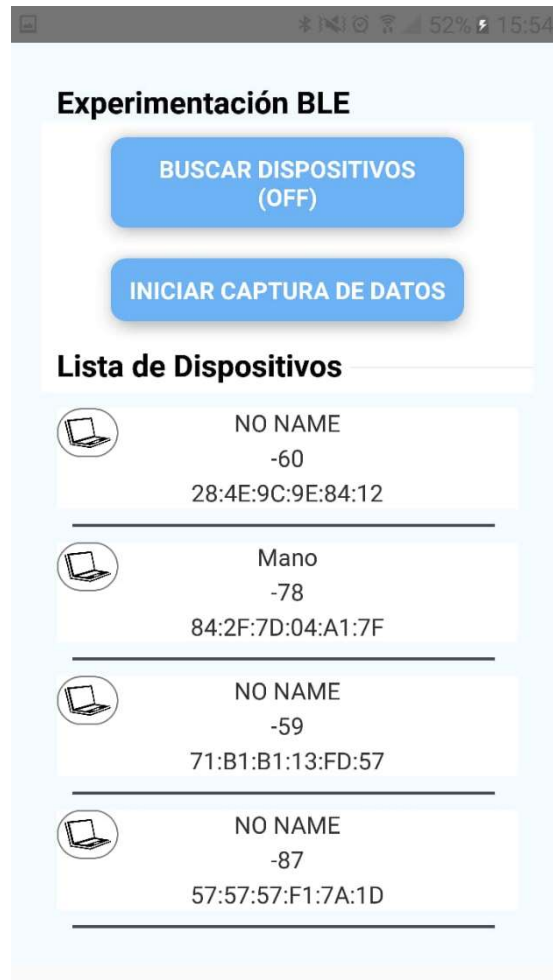


Figura 5.3: Pantalla para seleccionar el dispositivo

Una vez desplegado los diferentes dispositivos, el usuario debe el dispositivo para recuperar los datos del acelerómetro, al seleccionar alguno de los dispositivos se deberá dar clic sobre el botón “Iniciar captura de datos”. Cuando se haya terminado la aplicación del experimento el usuario deberá seleccionar la opción de terminar el experimento y será redirigido a la pantalla de inicio de la aplicación.

El funcionamiento de la aplicación depende de una comunicación con el prototipo de dispositivo vestible mediante el protocolo Bluetooth Low Energy (BLE) y específicamente con la librería *react-native-ble-manager*, esta biblioteca permite la conexión con un dispositivo que contenga el protocolo BLE. Los datos son enviados desde el dispositivo con una encriptación base 64, debido a esto se hace uso de una

función de descryptación para transformar la cadena encriptada en una cadena legible. Una vez descryptados los datos se presentan en una cadena de texto dividida por comas. En la ilustración 5.4 se muestra la pantalla con el dispositivo ya seleccionado para comenzar a captar los datos del dispositivo.

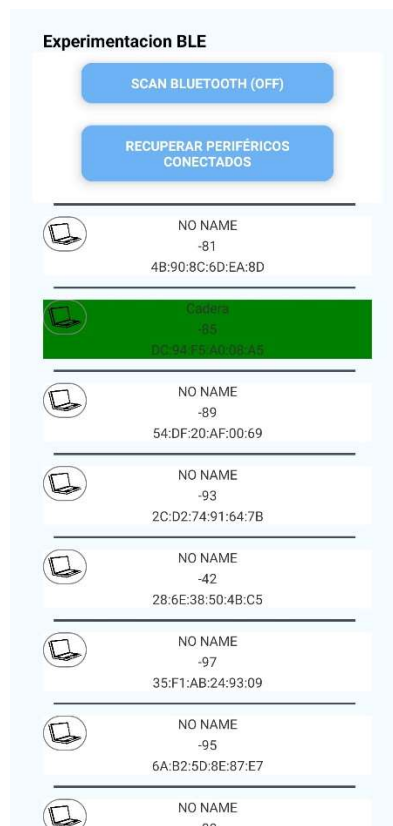


Figura 5.4: Pantalla para seleccionar el dispositivo Bluetooth

Finalmente, al terminar el experimento el usuario oprime el botón “Terminar experimento”, lo que hace que la aplicación regrese a la pantalla principal, se muestren las experimentaciones realizadas y el usuario pueda seleccionar la acción que quiera realizar con los datos de la experimentación. En la ilustración 5.5 se muestra la forma en la que está compuesto el archivo CSV que contiene los datos de los ejes del acelerómetro que fueron recuperados durante la experimentación, la fecha y hora en que se realizó, el dispositivo de monitoreo y el nombre del experimento que se llevó a cabo.

X-acele	Y-acele	Z-acele	Fecha	Dispositivo	Experimento
-0.706	-9.354	2.473	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-0.768	-9.387	2.459	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-0.768	-9.387	2.459	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-0.797	-9.378	2.428	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-0.903	-9.397	2.447	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-0.903	-9.397	2.447	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-0.934	-9.356	2.432	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-1.027	-9.321	2.384	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-1.027	-9.321	2.384	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-1.044	-9.352	2.384	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-1.101	-9.354	2.428	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-1.101	-9.354	2.428	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-1.099	-9.321	2.401	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-1.027	-9.316	2.391	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-1.027	-9.316	2.391	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-1.01	-9.304	2.394	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-0.917	-9.349	2.432	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-0.917	-9.349	2.432	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1
-0.905	-9.394	2.442	2021-12-17_02:39:36_pm	28:71:C2:D5:7F:E1no se detecto	ErazoCaidaFrontal1

Figura 5.5: Archivo CSV generado por la aplicación móvil

Si durante el desarrollo de la experimentación se detectó una caída se envía la petición a la plataforma *firebase* por medio del método *fetch* para que se envíe las notificaciones a la aplicación del cuidador. En la ilustración 5.6 muestra la notificación *push* que se envía a la aplicación del cuidador.

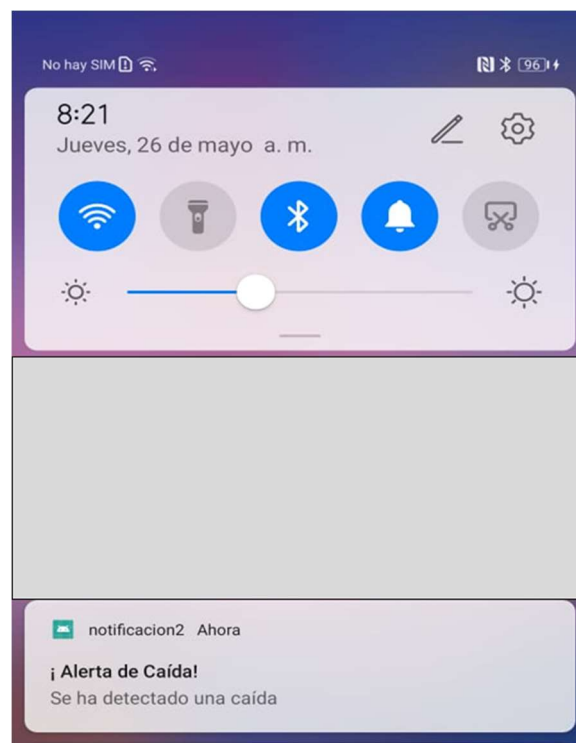


Figura 5.6: Notificación push de la detección de la caída

### 5.3. Prototipo del dispositivo vestible

El dispositivo utilizado fue el Arduino nano 33 BLE para el desarrollo del prototipo. El dispositivo fue programado mediante el IDE de Arduino, en este se hizo uso de dos librerías. La primera de ellas fue la biblioteca ArduinoBLE, la cual permite activar los servicios BLE del dispositivo, así como definir los servicios para él envío de datos [34]. La segunda biblioteca es Arduino\_LSM9DS, la cual permite interactuar con la IMU del dispositivo (LSM9DS) y obtener los datos del acelerómetro, así como definir la frecuencia de muestreo en una cantidad específica de Hz [35].

La construcción del dispositivo consistió en:

- Una placa protoboard mini la cual permitía el soporte del dispositivo.
- Una batería de litio de la marca motorola con 1200 miliamperios (mAh).
- Una segunda placa de conversión de voltaje WH la cual obtenía la energía mediante dos cables de alimentación de la batería, para ser enviada a la placa, la razón por la cual se utilizó la segunda placa fue para evitar picos en el voltaje.
- Un cable de alimentación de USB a Microusb.

Las partes del dispositivo pueden verse en la figura 5.7, los componentes fueron unidos mediante cinta doble cara y el dispositivo final fue sujetado al cuerpo del usuario con una correa de velcro.

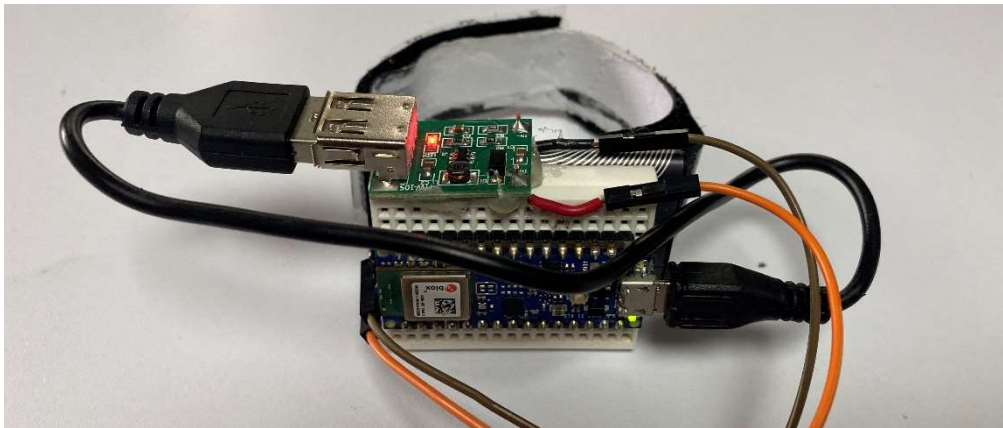


Figura 5.7: Prototipo de monitoreo

### 5.4. Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos es un punto esencial para realizar la detección de las caídas, el manejo de los datos es importante para poder detectar cada una de las etapas de la caída. El algoritmo implementado toma en cuenta tres etapas las cuales son: caída libre, impacto y el reposo. La ilustración 5.8 muestra el proceso por el cual pasan los datos para poder realizar la detección de la caída.

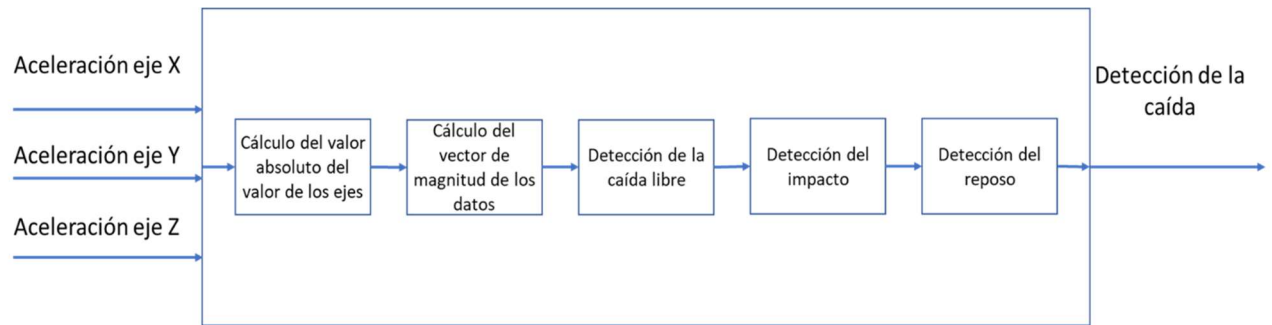


Figura 5.8: Proceso de los datos para poder detectar la caída

Al llegar los datos recuperados a la aplicación pasan por distintas etapas para poder realizar la detección de la caída.

- Cálculo del valor absoluto de los ejes: Este cálculo se realiza para evitar valores negativos en las aceleraciones de los ejes, para evitar que la orientación del dispositivo de monitoreo afecte la detección de cada una de las etapas.
- Cálculo del vector de magnitud: Para el cálculo del vector de magnitud se utiliza la ecuación 1 donde se contemplan los tres ejes del acelerómetro.
- Detección de las etapas de la caída: Los datos del vector de magnitud se utilizan para detectar cada una de las tres etapas de la caída, al detectarse todas las etapas el algoritmo mandaría la alerta de que se detectó una caída.

# Capítulo 6

## Pruebas y resultados

## 6.1. Diseño de la experimentación

### Objetivo de la experimentación

Obtener datos de caídas y poner a prueba el algoritmo de detección de caídas basado en umbrales que se implementó en un prototipo de aplicación móvil para realizar la experimentación.

### Condiciones previas

Las experimentaciones se realizarán en un ambiente controlado y en un lugar al aire libre en donde los sujetos de prueba puedan simular las caídas dejándose caer sobre una colchoneta. La colchoneta se utiliza como método de amortización tiene como objetivo evitar que las personas que realicen las caídas puedan resultar heridas.

Amortiguar la caída es muy importante, ya que puede provocar rebotes en los datos que provoquen que los datos obtenidos resulten erróneos y no puedan ser utilizados. Además, de provocar que el algoritmo no realice de manera correcta la detección de las caídas. La ilustración 1 muestra la colchoneta que se utilizará durante las pruebas y la posición del sujeto de prueba que simulara la caída.

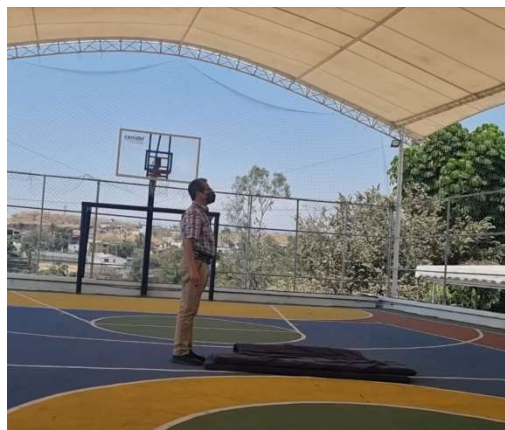


Figura 6.1: Posición para las pruebas de caídas

El dispositivo seleccionado para estas pruebas fue el Arduino nano 33 BLE. En la tabla 6.1 se muestran las configuraciones que serán utilizadas para para el dispositivo:

Tabla 6.1: Características del dispositivo

Dispositivo	Lugar de colocación	Frecuencia de muestreo
Arduino nano 33 BLE	Cadera lateral derecha	55 Hertz

El dispositivo encargado de realizar la obtención de los datos de las caídas será colocado con ayuda de un cinturón en la cadera de los sujetos de prueba. Para mantener el dispositivo encendido se utilizará una batería portátil que se colocará dentro de la bolsa



del pantalón de las personas. La ilustración 6.2 muestra la manera en que se coloca el dispositivo.

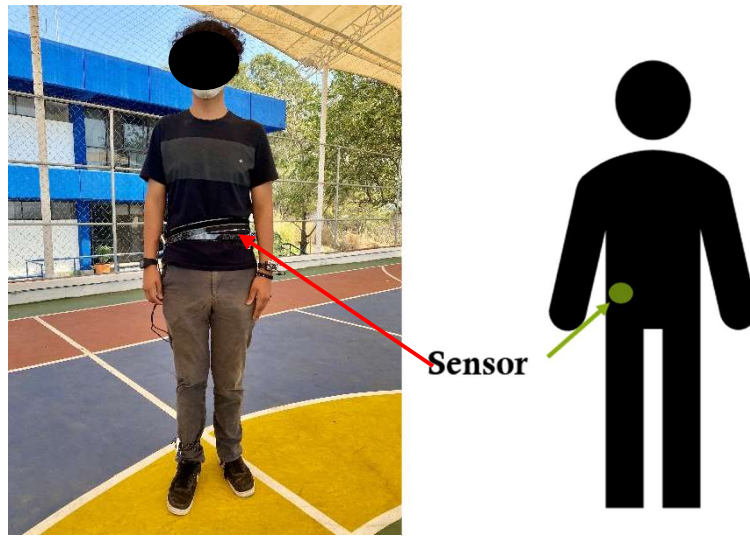


Figura 6.2: Colocación del dispositivo

Para las pruebas se consideraron las experimentaciones realizadas por otros investigadores, tomando como referencia trabajos similares [31] y [36]. Las actividades que serán tomadas en cuenta para ser realizadas durante las pruebas se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Características de las actividades

Actividad	Indicaciones	Duración	amortización (ninguna, baja, media, alta)	Duración del reposo
Caminar	Realizar la actividad a una velocidad cómoda para el sujeto de prueba	Diez minutos	Ninguna	Ninguno
Trotar	Realizar la actividad a una velocidad cómoda para el sujeto de prueba	Tres minutos	Ninguna	Ninguno
Caídas que inician con el cuerpo estático (Hacia el frente)	Estar en un estado de inmovilidad y dejarse caer sobre la colchoneta	Sin tiempo	Baja	Un minuto

Caídas caminando	Caminar a una velocidad aproximada de tres kilómetros por hora y dejarse caer simulando un tropiezo	Sin tiempo	Baja	Un minuto
------------------	---	------------	------	-----------

Las velocidades a las que serán realizadas las actividades fueron determinadas del compendio de actividades físicas [37], [38].

### Selección de candidatos

La selección de los candidatos que realizarán las pruebas es una de las tareas más importantes durante la experimentación, esto debido a que los participantes pueden contar con características (enfermedades, capacidades diferentes, etc.) que puedan influir en la decisión de si pueden o no realizar las actividades de la experimentación.

Para esta experimentación se seleccionaron diez participantes masculinos. Lo que se busca es que los voluntarios tengan diferencias en características como el peso y la altura, lo anterior con el objetivo de verificar si se produce alguna diferencia en los resultados de la detección de las caídas. Los voluntarios antes de realizar las actividades de la experimentación deberán contestar un cuestionario donde se verificará si padecen de alguna enfermedad o algún problema físico que provoque que no puedan realizar la experimentación.

Finalmente, se les entregó un documento de consentimiento informado para ser leído y firmado. En dicho documento se les hace de su conocimiento que los datos generados serán utilizados solo para este estudio y su información personal no será distribuida ni difundida. El documento de consentimiento informado se encuentra en el anexo A.

Las características que se consideraron de cada uno de los voluntarios son: edad, altura y el peso (Kilogramos). La Tabla 6.3 muestra las características de cada uno de los voluntarios.

Tabla 6.3: características de los sujetos de prueba

Sujeto de prueba	Edad	Altura (m)	Peso (Kg)
1	23	1.74	109.90
2	30	1.70	93.85
3	23	1.66	79.30
4	26	1.85	117.20

5	19	1.75	94.70
6	19	1.84	81.40
7	19	1.72	78.20
8	61	1.72	68.10
9	26	1.69	77.50
10	25	1.70	63.25

### Adquisición de datos de datos

La adquisición de los datos de las aceleraciones se realizará utilizando un prototipo desarrollado en *React Native*. El prototipo obtendrá los datos del dispositivo que portan los candidatos mientras realizan las simulaciones de las caídas, una vez que se termine con las pruebas los datos se almacenan en una base de datos para que posteriormente se pueda acceder a los datos mediante la generación de archivos CSV.

Los archivos CSV contienen los datos de la aceleración obtenida por cada uno de los ejes del acelerómetro, la fecha en la que se realizó la experimentación y el nombre de la prueba a la que pertenecen los datos. El objetivo principal de poder almacenar estos archivos es para que puedan ser consultados por un tercero en forma de *datasets*.

La ilustración 6.3 muestra la forma en que se comunica el sensor con el teléfono inteligente utilizando Bluetooth Low Energy (BLE)

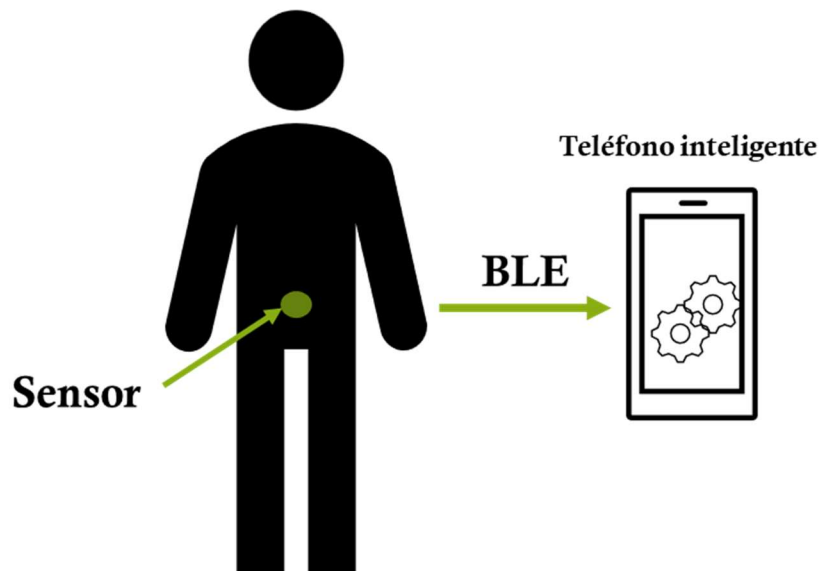


Figura 6.3: Adquisición de los datos

## 6.2. Umbral a utilizar en el algoritmo

Los umbrales son la parte más importante del algoritmo porque con ayuda de estos se pueden detectar cada una de las etapas de las caídas. Los umbrales son números reales

que están ligados con los cambios de aceleración y funcionan como límites para detectar cada una de las etapas de la caída. El algoritmo que se utiliza en este proyecto requiere de tres umbrales distintos:

- Umbral de caída libre: Se utiliza para detectar el momento en el cual la aceleración se aproxima a 0g. Debido a que el cuerpo del sujeto toma una aceleración semejante a la gravedad de la tierra (ingravidez).
- Umbral del impacto: Se utiliza para detectar un aumento inmediato en el vector de magnitud debido a la gran desaceleración que se presenta al momento en el que el cuerpo choca contra el suelo u otra superficie.
- Umbral de reposo: Para detectar esta etapa se utilizan dos umbrales un umbral superior y uno inferior, para detectar esta etapa la aceleración se debe de mantener dentro de ese rango durante un tiempo ya establecido.

### Umbrales experimentación 1

Para esta experimentación se utilizarán los umbrales que se encontraron reportados en la literatura [17]. En el trabajo se utilizan los umbrales en la unidad de medida de la aceleración metro/segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ) y se realizó la conversión a la unidad de medida de aceleración de la gravedad (g) utilizando la ecuación 1.

$$Aceleración\ en\ g = \frac{Aceleración\ en\ m/s^2}{Aceleración\ de\ la\ gravedad\ (9.807)} \quad (1)$$

La tabla 6.4 muestra los umbrales utilizados para esta experimentación. Los umbrales que se tomaron en cuenta son los que se reportaron en el trabajo [17], se eligió utilizarlos por los resultados que se presentan y el algoritmo toma en cuenta las mismas etapas de la caída.

Tabla 6.4: Umbrales experimentación 1

<b>Umbral para detectar la caída libre</b>	El valor utilizado para este umbral es de 0.6g, si el valor de la aceleración del vector de magnitud es menor que 0.6g se detectaría la caída libre.
<b>Umbral para detectar el impacto</b>	Este umbral es utilizado para detectar el impacto en la aceleración, si el vector de magnitud supera un valor de 1.5g después de haberse detectado la caída libre se estaría detectando un impacto.
<b>Umbral para el reposo</b>	Después de haberse detectado las dos etapas anteriores la aceleración del vector de magnitud debe de quedarse en un rango de -0.5g y 0.5g durante un tiempo establecido para que sea detectado el reposo.

## Umbrales experimentación 2

Después de haberse analizado los resultados de la experimentación 1, se decidió realizar una nueva experimentación para obtener unos nuevos umbrales que puedan mejorar el desempeño del algoritmo de detección de caídas.

En esta experimentación se utilizó un programa desarrollado en Python para generar de manera aleatoria tres conjuntos diferentes de umbrales (umbral de caída libre, umbral de impacto y umbral de reposo). Los límites que se utilizaron para generar cada uno de los umbrales se obtuvieron analizando los valores de la aceleración que se alcanzaron en la detección de cada una de las etapas de la caída en las pruebas que se realizaron en la experimentación anterior. En la tabla 6.5 se muestran los límites utilizados para generar cada umbral.

Tabla 6.5: Rangos utilizados para generar los umbrales

Rango umbral de caída libre	Rango umbral de impacto	Rango umbral de reposo
0.1g – 0.9g	2.0g – 7.0g	Umbral inferior: 0.3g – 0.6g Umbral superior: 1.2g – 1.6g

En la tabla 6.6 se muestran los tres conjuntos de umbrales que se obtuvieron.

Tabla 6.6: Umbrales obtenidos de manera aleatoria

Umbral de caída libre	Umbral de impacto	Umbral de reposo
0.30g	4.50g	0.45g – 1.20g
0.50g	3.00g	0.50g – 1.50g
0.45g	6.50g	0.27g – 1.45g

Una vez que se obtuvieron los conjuntos de umbrales se decidió tomar un conjunto aleatorio de cuatro sujetos de los diez que participaron en la experimentación anterior. Los sujetos seleccionados fueron las encargadas de realizar las pruebas con cada uno de los conjuntos de umbrales que se generaron anteriormente. En la tabla 6.7 se muestran los cuatro sujetos que realizaron las pruebas.

Tabla 6.7: Sujetos de prueba seleccionados

Sujeto de prueba	Edad	Altura (m)	Peso (Kg)
1	23	1.74	109.90
2	30	1.70	93.85
3	23	1.66	79.30

## Umbrales experimentación 3

Para esta experimentación se utilizaron los umbrales que obtuvieron que obtuvieron el mejor resultado en las pruebas de la experimentación anterior. El objetivo de esta experimentación es poder contar con el mismo número de pruebas que en la

experimentación 1, para poder realizar una comparación de los resultados de las métricas con los obtenidos en la experimentación.

Las pruebas que se realizaron son caminata, trote, caídas frontales con el cuerpo estático y las pruebas de caídas caminando en las cuales se simula un tropiezo. Estas pruebas fueron realizadas por los diez sujetos de pruebas que se tomaron en cuenta en la experimentación 1.

En la tabla 6.8 se muestra el conjunto de umbrales que fueron utilizados en esta experimentación.

Tabla 6.8: Umbrales utilizados en la experimentación 3

<p><b>Umbral para detectar la caída libre</b></p>	<p>El valor utilizado para este umbral es de 0.5g, si el valor de la aceleración del vector de magnitud es menor que 0.5g se detectaría la caída libre.</p>
<p><b>Umbral para detectar el impacto</b></p>	<p>Este umbral es utilizado para detectar el impacto en la aceleración, si el vector de magnitud supera un valor de 3.0g después de haberse detectado la caída libre se estaría detectando un impacto.</p>
<p><b>Umbral para el reposo</b></p>	<p>Después de haberse detectado las dos etapas anteriores la aceleración del vector de magnitud debe de quedarse en un rango de 0.5g y 1.5g durante un tiempo establecido para que sea detectado el reposo.</p>

#### Umbrales experimentación 4

La experimentación 4 tuvo como objetivo obtener nuevos umbrales para mejorar los resultados obtenidos en las experimentaciones 1 y 3. Para esta experimentación se buscó tomar en cuenta los datos obtenidos en todas las pruebas de las experimentaciones anteriores. Lo primero que se realizó fue tomar en cuenta las pruebas de caídas estáticas y obtener los valores máximos y los valores mínimos de la aceleración.

El objetivo de obtener los valores mínimos de las caídas es poder obtener los valores en los que se presentó la caída libre en cada una de las pruebas. Los valores máximos de la aceleración se tomaron en cuenta por que es donde se presenta el impacto, ya que es donde la aceleración alcanza su punto más alto durante la caída.

Después de obtener los valores de todas las pruebas realizadas hasta el momento se calculó el promedio de las aceleraciones, el propósito de utilizar el promedio es obtener umbrales que tomen en cuenta los distintos niveles de aceleraciones que se obtuvieron en cada una de las etapas de la caída. También se propone utilizar el promedio para tomar

en cuenta los datos obtenidos en las pruebas que realizaron personas con distintas complejiones, esperando que los umbrales funcionen de la misma manera en personas con alturas y pesos diferentes.

En la tabla 6.9 se muestran algunos registros de los valores en donde se detectaron las etapas de caída libre y la etapa de impacto.

Tabla 6.9: Valores máximos y mínimos obtenidos de las caídas

Sujeto de prueba	Valores de impacto	Valores de caída libre
1	5.090097g	0.285228g
2	4.471511g	0.367489g
3	4.729291g	0.466128g
4	5.648605g	0.229587g
5	4.696696g	0.298706g
6	3.570486g	0.466159g
7	5.687567g	0.276589g
8	3.860331g	0.139048g

Para los últimos umbrales se obtuvieron los datos de la etapa de reposo de cada una de las pruebas realizadas en las experimentaciones anteriores. Para obtener los umbrales también se realizó el cálculo de los valores máximos y mínimos que se presentaron durante el reposo y por último se promediaron los valores con la finalidad de tomar en cuenta las variaciones de aceleración que se presentaron durante los reposos de las pruebas. En la tabla 6.10 se muestran algunos registros del cálculo de los valores mínimos y máximos del reposo.

Tabla 6.10: Valores máximos y mínimos en la aceleración en etapa de reposo

Prueba	Valor máximo de la aceleración de reposo	Valor mínimo de la aceleración de reposo
1	1.03546g	0.924503g
2	1.043129g	0.976882g
3	1.055957g	0.931087g
4	1.004543g	0.98788g

El mismo proceso de obtener el rango de los valores máximos y mínimos se utilizó en las pruebas de caminata, para poder comparar si los valores de la caminata podrían ser confundidos con los valores del reposo. Al comparar los datos del reposo y de la caminata se pudo concluir que los umbrales obtenidos tienen una gran diferencia con los datos de la caminata y así evitar la confusión de la caminata con el reposo. En la tabla 6.11 se muestran algunos registros de los valores mínimos y máximos de la caminata.

Tabla 6.11: Valores máximos y mínimos en la aceleración de la caminata

Prueba	Valor máximo en la aceleración	Valor mínimo en la aceleración
1	2.649824g	0.285414g
2	2.994162g	0.276718g
3	2.767087g	0.375863g
4	1.868076g	0.393707g
5	2.274007g	0.458075g
6	2.213596g	0.40831g
7	2.002139g	0.309844g



8	1.715888g	0.540138g
9	2.129759g	0.277407g
10	2.024223g	0.56352g
11	1.913079g	0.542066g
12	1.661584g	0.474096g

En la ilustración 6.6 se muestra una comparación de las gráficas del vector de magnitud entre una prueba de caminata y una prueba de reposo. La comparación de estas pruebas se realizó para poder detectar si la caminata de una persona podría ser confundida con el reposo. Al analizar los datos de manera gráfica se tuvo como resultado que la caminata no se mantiene dentro del rango del reposo, por lo que se determinó que no habrá una confusión entre la caminata y el reposo.

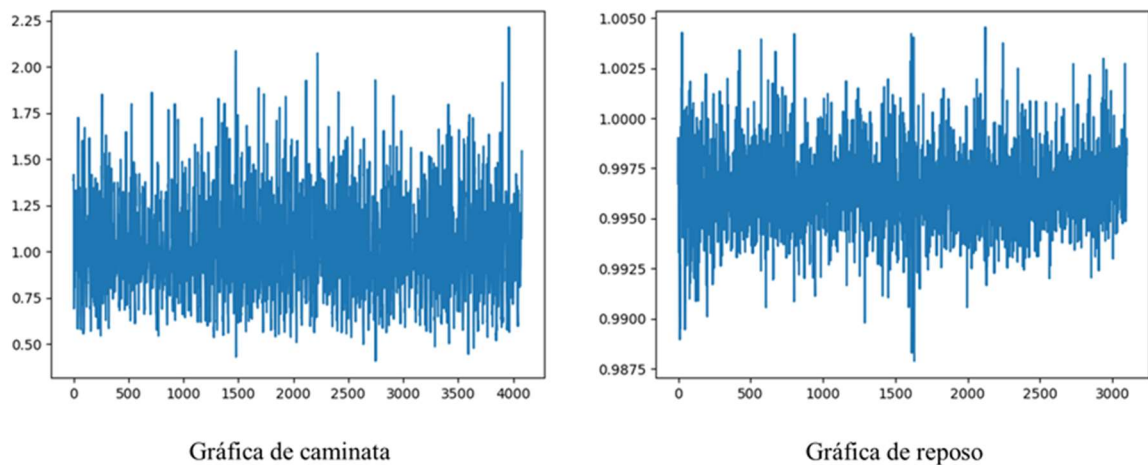


Figura 6.4: Comparación de la aceleración de caminata y de reposo

En la tabla 6.12 se muestran los umbrales utilizados para detectar cada una de las etapas de la caída.

Tabla 6.12: Resultados de la experimentación 3

<b>Umbral para detectar la caída libre</b>	El valor utilizado para este umbral es de 0.31g, si el valor de la aceleración del vector de magnitud es menor que 0.31g se detectaría la caída libre.
<b>Umbral para detectar el impacto</b>	Este umbral es utilizado para detectar el impacto en la aceleración, si el vector de magnitud supera un valor de 4.7g después de haberse detectado la caída libre se estaría detectando un impacto.
<b>Umbral para el reposo</b>	Después de haberse detectado las dos etapas anteriores la aceleración del vector de magnitud debe de quedarse en un rango de 0.90 y 1.05g durante un tiempo establecido para que sea detectado el reposo.

### Métricas de evaluación

Las métricas de análisis de los resultados son muy importantes porque ofrecen información general del funcionamiento del sistema sobre la detección de caídas. Para poder evaluar el funcionamiento del algoritmo elegido se tomarán en cuenta los posibles resultados de las pruebas, el algoritmo puede tener cuatro posibles resultados:

- Verdaderos positivo (TP, por sus siglas en inglés): representa cuando ocurre una caída y el algoritmo la detecta correctamente
- Falsos positivos (FP, por sus siglas en inglés): representa cuando se realiza una actividad de la vida diaria (AD) y el algoritmo la detecta como una caída
- Verdaderos negativos (TN, por sus siglas en inglés): representa cuando se realiza una AD y el sistema no la detecta como una caída
- Falsos negativos (FN, por sus siglas en inglés): representa cuando ocurre una caída y el algoritmo no la detecta

Se utilizará la matriz de confusión como herramienta para evaluar el desempeño del algoritmo de detección de caídas en cada una de las experimentaciones. Esta herramienta dará una mejor idea de cómo está realizando el algoritmo la clasificación, a partir de un conteo de los aciertos y de los errores de las clases en la clasificación, de esta manera se puede comprobar si el algoritmo está realizando la clasificación de buena o de mala manera.

En la matriz de confusión se colocan los valores de TP, FP, TN y FN. Estos valores tienen una posición específica dentro de la matriz, la tabla 6.13 muestra la estructura de la matriz de confusión.

Tabla 6.13: Estructura de la matriz de confusión

<b>Verdaderos Positivos (TP)</b>	<b>Falsos Negativos (FN)</b>
<b>Falsos Positivos (FP)</b>	<b>Verdaderos Negativos (TN)</b>

Para este trabajo se seleccionaron las siguientes métricas: el Accuracy, la especificidad, la sensibilidad y precisión. A continuación se presentan las fórmulas utilizadas considerando TP, TN, FP y FN.

La ecuación 2 se utiliza para calcular el Accuracy.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

Para calcular la especificidad se utiliza la ecuación 3

$$Especificidad = \frac{TN}{TN + FP} \quad (3)$$

La ecuación 4 se utiliza para calcular la sensibilidad obtenida en cada una de las experimentaciones

$$Sensibilidad = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

La ecuación 5 se utiliza para calcular la precisión en los resultados del algoritmo

$$Precisión = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

### 6.3.Resultados

#### Resultados experimentación 1

Después de realizar las pruebas de caminata, trotar, caída con el cuerpo estático y caída caminando, se clasificaron los resultados de manera que se pueda apreciar el número de pruebas en las que se detectó la caída y en las que no se detectó. La tabla 6.14 muestra los resultados que se obtuvieron en cada tipo de prueba.

Tabla 6.14: Resultados de la experimentación 1

Actividad	Se detectó caída	No se detectó caída
Caminata	4	6
Trote	6	4
Caída frontal con el cuerpo estático	9	1
Caída frontal con caminata	8	2

En la tabla 6.14 se puede observar que las caídas se detectan de buena manera pero en las actividades de trotar y de caminar algunas de las pruebas se detectaron como caídas cuando no tenía que ser así.

Con los datos de la tabla anterior se generó una matriz de confusión para analizar el desempeño que tuvo el algoritmo con los umbrales de la experimentación 1. La tabla 6.15 muestra la matriz de confusión resultante.

Tabla 6.15: Matriz de confusión de la experimentación 1

		Predicción	
		Caída	No caída
Observación	Caída	17	3
	No caída	10	10

Una vez que se tienen los valores de la matriz de confusión se procede a calcular las métricas que serán utilizadas para evaluar el funcionamiento del algoritmo.

$$Accuracy = \frac{17 + 10}{17 + 10 + 10 + 3} = 0.675$$

$$Especificidad = \frac{10}{10 + 10} = 0.5$$

$$Sensibilidad = \frac{17}{17 + 3} = 0.85$$

$$Precisión = \frac{17}{17 + 10} = 0.629$$

### Resultados experimentación 2

Los cuatro sujetos realizaron las mismas actividades de la experimentación uno, utilizando cada uno de los conjuntos de umbrales que se obtuvieron. En la tabla 6.16 se muestra la matriz de confusión con los resultados obtenidos con el primer conjunto de umbrales.

Tabla 6.16: Matriz de confusión de los resultados del conjunto uno de umbrales

		Predicción	
		Caída	No caída
Observación	Caída	2	4
	No caída	3	3

En la tabla 6.17 se muestra la matriz de confusión con los resultados obtenidos con el segundo conjunto de umbrales.

Tabla 6.17: Matriz de confusión de los resultados del conjunto dos de umbrales

		Predicción	
		Caída	No caída
Observación	Caída	5	1
	No caída	2	4

En la tabla 6.18 se muestra la matriz de confusión con los resultados obtenidos con el ultimo conjunto de umbrales.

Tabla 6.18: Matriz de confusión de los resultados del conjunto dos de umbrales

		Predicción	
		Caída	No caída
Observación	Caída	3	3
	No caída	4	2

Al analizar los resultados de las experimentaciones para cada conjunto de umbrales se determinó que los umbrales del conjunto dos son los que tuvieron un mejor desempeño con el algoritmo.

### Resultados experimentación 3

Después de obtener los resultados de la experimentación 2 se decidió realizar más pruebas con los umbrales que obtuvieron un mejor desempeño. En la tabla 6.19 se muestran los resultados para cada una de las pruebas en las cuales se aprecia el número de pruebas en las que algoritmo detectó alguna caída y en las que no la detecto.

Tabla 6.19: Resultados de la experimentación 3

Actividad	Se detectó caída	No se detectó caída
Caminata	2	8
Trote	5	5
Caída frontal con el cuerpo estático	9	1
Caída frontal con caminata	7	3

En la tabla 6.19 se puede observar que mejoró el rendimiento del algoritmo en las pruebas de las actividades de la vida diaria. Esto se puede apreciar en la cifra de falsos positivos que se presentaron a lo largo de esta experimentación.

Con los datos de la tabla anterior se generó una matriz de confusión para analizar manera gráfica el desempeño que tuvo el algoritmo con los umbrales. La tabla 6.20 muestra la matriz de confusión resultante.

Tabla 6.20: Matriz de confusión experimentación 3

		Predicción	
		Caída	No caída
Observación	Caída	16	4
	No caída	7	13

Una vez que se tienen los valores de la matriz de confusión se procedió a calcular las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del algoritmo.

$$Accuracy = \frac{16 + 13}{16 + 13 + 7 + 4} = 0.725$$

$$Especificidad = \frac{13}{13 + 7} = 0.65$$

$$Sensibilidad = \frac{16}{16 + 4} = 0.8$$

$$Precisión = \frac{16}{16 + 7} = 0.695$$

#### Resultados experimentación 4

Después de realizar las pruebas de caminata, trotar, caída con el cuerpo estático y caída caminando se clasificaron los resultados de manera que se pueda apreciar el número de pruebas en las que se detectó la caída y en las que no se detectó. La tabla 6.21 muestra los resultados que se obtuvieron en cada tipo de prueba.



Tabla 6.21: Resultados de la experimentación 4

Actividad	Se detectó caída	No se detectó caída
Caminata	1	9
Trote	2	8
Caída frontal con el cuerpo estático	10	0
Caída frontal con caminata	9	1

Con los datos de la tabla anterior se generó una matriz de confusión para visualizar de manera gráfica el desempeño que tuvo el algoritmo con los umbrales de la experimentación 1. La tabla 6.22 muestra la matriz de confusión resultante.

Tabla 6.22: Matriz de confusión de la experimentación 4

		Predicción	
		Caída	No caída
Observación	Caída	19	1
	No caída	3	17

Una vez que se tienen los valores de la matriz de confusión se procede a calcular las métricas que serán utilizadas para evaluar el funcionamiento del algoritmo.

$$Accuracy = \frac{19 + 17}{19 + 17 + 3 + 1} = 0.9$$

$$Especificidad = \frac{17}{17 + 3} = 0.85$$

$$Sensibilidad = \frac{19}{19 + 1} = 0.95$$

$$\textit{Precisión} = \frac{19}{19 + 3} = 0.863$$

# **Capítulo 7**

## **Conclusiones y trabajo futuro**

El diseño de la experimentación fue de gran ayuda para poder realizar las diferentes experimentaciones, y que cada una de ellas se realizará en condiciones de experimentación similares como el entorno, la configuración del dispositivo de monitoreo y los sujetos de prueba. Se decidió contar con sujetos de prueba que tuvieran distintas alturas y complejiones de cuerpo para evaluar el funcionamiento del algoritmo e identificar si alguna característica de los sujetos podría influir en su desempeño.

Después de llevar a cabo cada una de las experimentaciones y obtener sus resultados, se optó por utilizar varias métricas para evaluar el desempeño del algoritmo con los distintos umbrales que se utilizaron. En la tabla 7.1 se muestra una tabla comparativa de las métricas obtenidas en cada una de las experimentaciones.

Tabla 7.1: comparación de resultados de las pruebas

Experimentación	Accuracy	Especificidad	Sensibilidad	Precisión
1	0.675	0.50	0.85	0.629
3	0.725	0.65	0.80	0.695
4	0.90	0.85	0.95	0.863

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la experimentación 4 de pruebas es la que obtuvo mejores resultados para cada una de las métricas consideradas. La métrica más importante para este proyecto es la sensibilidad, porque es la que nos indica que el algoritmo detecta las caídas cuando deben de ser detectadas. Mientras que la especificidad se utiliza para analizar el comportamiento al momento de detectar los verdaderos negativos.

Se seleccionó la sensibilidad como la métrica más importante, porque es la que nos asegura la detección de las caídas cuando efectivamente ocurren. Esta métrica representa la probabilidad de que el algoritmo detecte correctamente las caídas. Mientras que la especificidad es la probabilidad de que el algoritmo no envíe una falsa alerta de caída.

Con los resultados obtenidos se puede decir que el método propuesto y utilizado en la experimentación 4 podría ser utilizado en investigaciones futuras que utilicen algoritmos basados en umbrales. En las pruebas no se detectó alguna característica de los sujetos que influyera en el desempeño del algoritmo en la detección de las caídas.

# Referencias

- [1] J. R. Silva-Fhon, R. Partezani-Rodrigues, K. Miyamura, and W. Fuentes-Neira, "Causas y factores asociados a las caídas del adulto mayor Causes and factors associated to falls among the Elder Causas e fatores associados a quedas no idoso," *Enfermería Universitaria*, vol. 16, no. 1, 2019.
- [2] F. Varas-Fabra, E. Castro Martín, L. Á. Pérula De Torres, M. J. Fernández Fernández, R. Ruiz Moral, and I. Enciso Berge, "Caídas en ancianos de la comunidad: Prevalencia, consecuencias y factores asociados," *Atencion Primaria*, vol. 38, no. 8, pp. 450–455, 2006, doi: 10.1157/13094802.
- [3] L. Z. Rubenstein and K. R. Josephson, "The epidemiology of falls and syncope," *Clinics in Geriatric Medicine*, vol. 18, no. 2, pp. 141–158, 2002, doi: 10.1016/S0749-0690(02)00002-2.
- [4] A. Zorrilla and G. Dahily, "Aspectos sociodemográficos de las caídas en ancianos atendidos por un Grupo Básico de Trabajo," *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, vol. 44, no. 8, p. 51, 2011, doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.
- [5] S. P. De, S. Hernández, A. Moctezuma, G. Rodrigo, G. Ortega, and R. María, "Caídas en el adulto mayor. Factores intrínsecos y extrínsecos," *Revista Medica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, vol. 40, no. 6, pp. 489–493, 2002.
- [6] Z. A. da Silva-Gama and A. Gómez-Conesa, "Factores de riesgo de caídas en ancianos : revisión sistemática Risk factors for falls in the elderly :," *Rev Saúde Pública*, vol. 42, no. 5, pp. 946–956, 2008.
- [7] P. Kannus *et al.*, "Fall-Induced Injuries and Deaths Among Older Adults," vol. 281, no. 20, pp. 1895–1899, 2014.
- [8] V. M. Balbás Liaño and A. F. Gómez Laso, "Proceso de atención de enfermería en las caídas del paciente geriátrico," *Proceso de Atención de Enfermería en los Síndromes Geriátricos*, vol. Modulo II, pp. 1–110, 2010.
- [9] D. E. Hernández-Herrera and J. Ferrer-Villegas, "Prevención de caídas en el adulto mayor: Intervenciones de enfermería," *Revista de Enfermería del Instituto Mexicano del Seguro Social*, vol. 15, no. 1, pp. 47–50, 2007.
- [10] L. Terra Jonas, K. Vitorelli Diniz Lima, M. Inácio Soares, M. A. Mendes, J. V. da Silva, and P. M. Ribeiro, "Evaluación del riesgo de caídas en las personas mayores: ¿cómo hacerlo?," *Gerokomos*, vol. 25, no. 1, pp. 13–16, 2014, doi: 10.4321/s1134-928x2014000100004.
- [11] L. F. Varela Pinedo, "Health and quality of life in the elderly," *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, vol. 33, no. 2, pp. 199–201, 2016, doi: 10.17843/rpmesp.2016.332.2196.
- [12] N. Guerrero-R and M. C. Yépez-Ch, "Factores asociados a la vulnerabilidad del adulto mayor con alteraciones de salud," *Universidad y Salud*, vol. 17, no. 1, pp. 121–131, 2015.

- [13] E. Gomez and N. Salgado, *Logica de Algoritmos- Un enfoque Practico- Programación en Lenguaje C*, 1st ed., no. 1. Quito - Ecuador, 2016. doi: 10.13140/RG.2.1.2280.9367.
- [14] E. R. Durán, G. F. R. Camarero, and E. H. Martínez-Esparza, "Incidencia y características de las caídas en un hospital de cuidados intermedios de Barcelona," *Gerokomos*, vol. 28, no. 2, pp. 78–82, 2017.
- [15] N. Jia, "Accelerometer, Detecting Human Falls with a 3-Axis Digital," *Analog Dialogue*, pp. 3–9, 2011.
- [16] C. Vélez Martínez, "Dispositivos vestibles," [http://www2.iingen.unam.mx/ES-MX/PUBLICACIONES/GACETA/ELECTRONICA/GACETAAGOSTO2015/Paginas/Dispositivos vestibles.aspx](http://www2.iingen.unam.mx/ES-MX/PUBLICACIONES/GACETA/ELECTRONICA/GACETAAGOSTO2015/Paginas/Dispositivos%20vestibles.aspx).
- [17] S. C. A. Murray Toledo, "DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA DE MONITOREO DE CAÍDAS EN DOMICILIO PARA ADULTOS MAYORES," Universidad de Valparaíso de Chile, 2020.
- [18] A. Serna Ruiz, F. A. Ros García, and J. C. Rico Noguera, *Guía Práctica de Sensores, Creaciones*. España, 2010.
- [19] L. G. Corona Ramírez, G. S. Abarca Jiménez, and J. Mares Carreño, *Sensores y Actuadores Aplicaciones con Arduino*, GRUPO EDIT. México, 2014.
- [20] 5Hertz Electrónica, "ABC DEL ACELEROMETRO." [https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&tutorial\\_id=2#:~:text=Los acelerómetros son dispositivos electromecánicos,uno%20dos o tres ejes.](https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&tutorial_id=2#:~:text=Los%20acelerómetros%20son%20dispositivos%20electromecánicos,uno%20dos%20o%20tres%20ejes.)
- [21] A. Thompson and B. N. Taylor, "Use of the International System of Units (SI)," 2008.
- [22] J. Organista-Sandoval, L. McAnally-Salas, and G. Lavigne, "El teléfono inteligente (smartphone) como herramienta pedagógica," *Apertura*, vol. 5, no. 1, pp. 6–19, 2013.
- [23] J. Wahlström, I. Skog, and P. Händel, "Smartphone-based vehicle telematics: A ten-year anniversary," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 10, pp. 2802–2825, 2017.
- [24] F. Zapata, "Aceleración de la gravedad: qué es, cómo se mide y ejercicios," <https://www.lifeder.com/aceleracion-gravedad/>, May 20, 2019.
- [25] A. A. Echavarría Mejía, O. Plata Lobo, and O. M. García López, "Consideraciones acerca de la fuerza gravitacional y la aceleración de gravedad: una diferenciación conceptual para el contexto de la enseñanza," 2016.
- [26] H. Nguyen, F. Zhou, F. Mirza, and M. A. Naeem, "Fall Detection Using Smartphones to Enhance Safety and Security of Older Adults at Home," *2018 11th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network, ICMU 2018*, pp. 4–5, 2019, doi: 10.23919/ICMU.2018.8653613.
- [27] G. Pérolle and I. Etxeberria Arritxabal, "Detector automático de caídas y monitorización de actividad para personas mayores," *Revista Española de Geriatria y Gerontología*, vol. 41, no. Supl 2, pp. 33–41, 2006, doi: 10.1016/s0211-139x(06)73006-2.

- [28] L. Valcourt, Y. de La Hoz, and M. Labrador, "Smartphone-based Human Fall Detection System," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 1011–1017, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7437252.
- [29] J. Dai, X. Bai, Z. Yang, Z. Shen, and D. Xuan, "PerFallD: A pervasive fall detection system using mobile phones," *2010 8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PERCOM Workshops 2010*, pp. 292–297, 2010, doi: 10.1109/PERCOMW.2010.5470652.
- [30] M. Kangas, A. Konttila, P. Lindgren, I. Winblad, and T. Ja, "Comparison of low-complexity fall detection algorithms for body attached accelerometers," vol. 28, pp. 285–291, 2008, doi: 10.1016/j.gaitpost.2008.01.003.
- [31] L. Tong, W. Chen, Q. Song, and Y. Ge, "A research on automatic human fall detection method based on wearable inertial force information acquisition system," *International Conference on Robotics and Biomimetics*, Dec. 2009.
- [32] M. Vallejo, C. v. Isaza, and J. D. Lopez, "Artificial Neural Networks as an alternative to traditional fall detection methods," *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, no. 1, pp. 1648–1651, 2013, doi: 10.1109/EMBC.2013.6609833.
- [33] Inc. Facebook, "React Native," <https://reactnative.dev/>.
- [34] Arduino, "ArduinoBLE library." <https://www.arduino.cc/en/Reference/ArduinoBLE>
- [35] FemmeVerbeek, "LSM9DS1 library." [https://github.com/FemmeVerbeek/Arduino\\_LSM9DS1](https://github.com/FemmeVerbeek/Arduino_LSM9DS1)
- [36] E. Carnuccio *et al.*, "Desarrollo de un Prototipo detector de caídas utilizando la placa Intel Galileo Generación I y el sensor MPU6050," 2017.
- [37] Semana, "¿A qué velocidad debería caminar para tener buena salud?," <https://www.semana.com/vida-moderna/articulo/los-beneficios-de-caminar-rapido-para-la-salud/645732/>, Dec. 20, 2019.
- [38] B. E. Ainsworth *et al.*, "Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities," *Med Sci Sports Exerc*, vol. 32, no. 9; SUPP/1, pp. S498–S504, 2000.

# **Anexo A**

## **Consentimiento informado**

### **Introducción**

El presente documento tiene como objetivo dar a conocer los lineamientos, protocolos, pruebas y riesgos que se puedan presentar durante las pruebas de experimentación de la tesis “Sistema para la detección de caídas en adultos mayores utilizando sensores vestibles”. El cual tiene como objetivo implementar el método de umbrales para la detección de caídas en adultos mayores utilizando sensores vestibles.

El objetivo de las pruebas que se realizarán en la cancha de usos múltiples ubicada en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), es obtener datos de caídas y poder poner a prueba el algoritmo de detección de caídas basado en umbrales que se implementó en un prototipo de aplicación móvil para poder realizar la experimentación.

### **Descripción del estudio**

Durante la experimentación se le colocará al participante el dispositivo Arduino 33 BLE para obtener la información de las aceleraciones que se presenten durante las simulaciones de las caídas. Los datos obtenidos en cada una de las pruebas serán almacenados en archivos CSV con ayuda de un teléfono inteligente.

Los participantes deberán de realizar simulaciones de dos distintos tipos de caídas.

1. Caídas que inician con el cuerpo estático (Hacia el frente): Estar en un estado de inmovilidad y dejarse caer sobre la colchoneta
2. Caídas caminando: Caminar a una velocidad aproximada de tres kilómetros por hora y dejarse caer o simulando un tropiezo

Los participantes también deberán realizar actividades de la vida diaria con el objetivo de evaluar que el algoritmo no detecta caídas cuando no se presentan.

1. Caminar: Realizar la actividad a una velocidad cómoda para el sujeto de prueba
2. Trotar: Realizar la actividad a una velocidad cómoda para el sujeto de prueba

### **Riesgos y beneficios de la prueba**

Durante la prueba se pueden presentar inconvenientes como caídas, tropiezos o lesiones provocadas por simular las caídas, por razones como estas se les pidió con anticipación a los participantes portar ropa cómoda y tenis para realizar actividades. La participación de los sujetos de estudio permitirá la validación del prototipo realizado.

### **Derechos**

Los participantes pueden retirarse en cualquier momento de la prueba sin ningún inconveniente o penalización. La participación es voluntaria.

### **Confidencialidad**



Los datos obtenidos de las actividades realizadas solo serán utilizados para la tesis de “Sistema para la detección de caídas en adultos mayores utilizando sensores vestibles” y se mantendrá una plena confidencialidad de los datos personales de los participantes.

Estoy en conocimiento que los datos no me serán entregados y que no habrá retribución por la participación en este estudio, sé que esta información podrá beneficiar de manera indirecta y por lo tanto tiene un beneficio para la sociedad dada la investigación que se está llevando a cabo. Asimismo, sé que puedo negar la participación o retirarme en cualquier etapa de la investigación, sin expresión de causa ni consecuencias para mí. Sí. Acepto voluntariamente participar en este estudio y he recibido una copia del presente documento.

---

Firma participante:

Fecha:

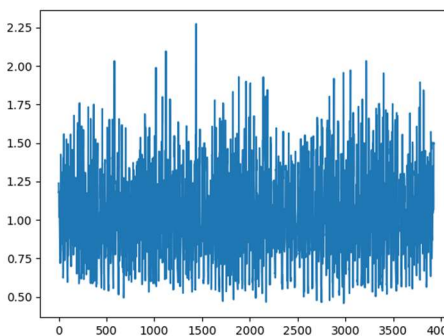
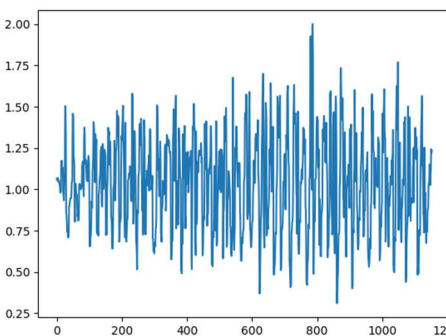
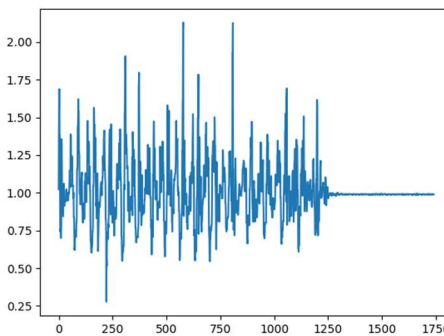
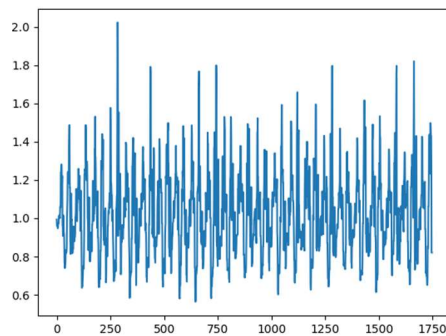
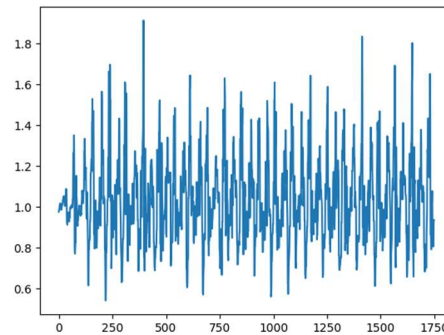
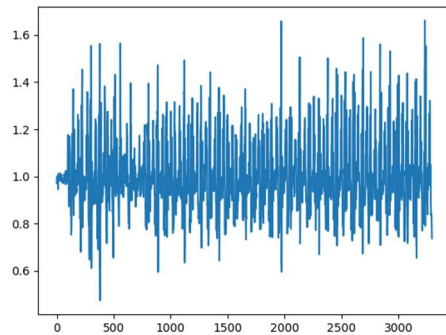
Lugar:

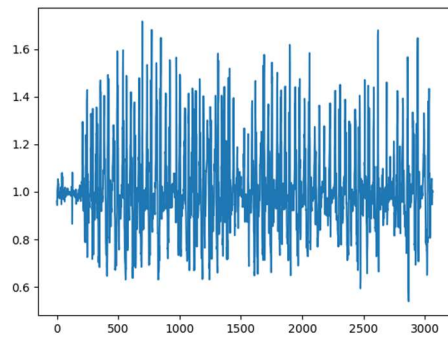
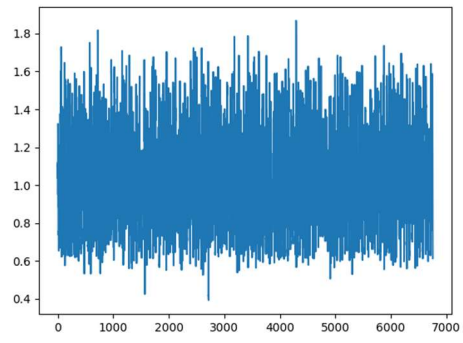
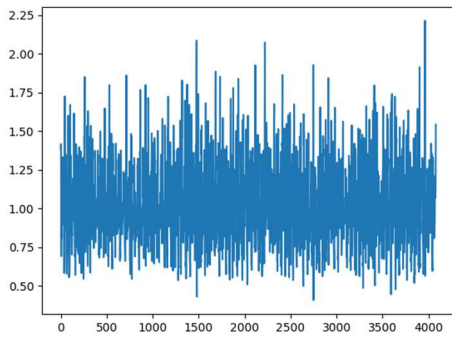
## Anexo B

En esta sección se muestran las gráficas generadas y utilizadas en la experimentación 2. Cada una de las gráficas pertenece a una prueba realizada por un sujeto, en las gráficas muestran los cambios de aceleraciones del vector de magnitud.

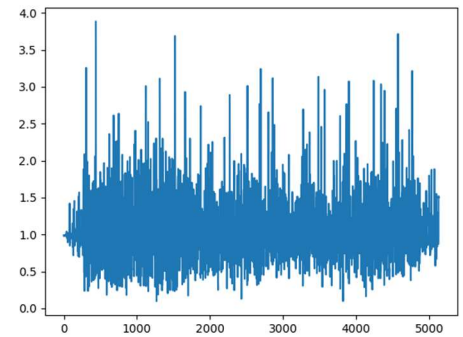
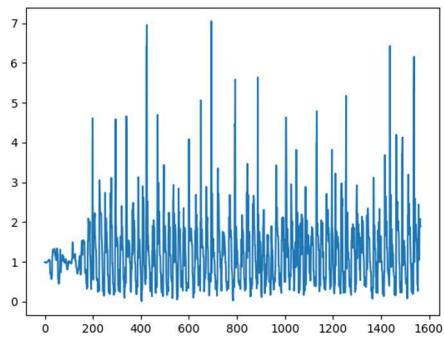
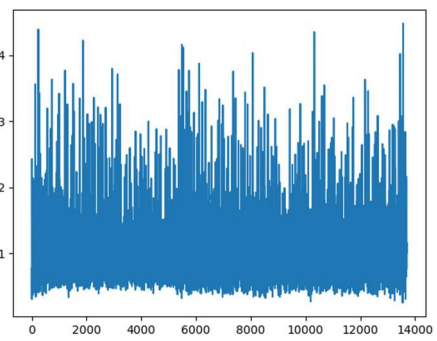
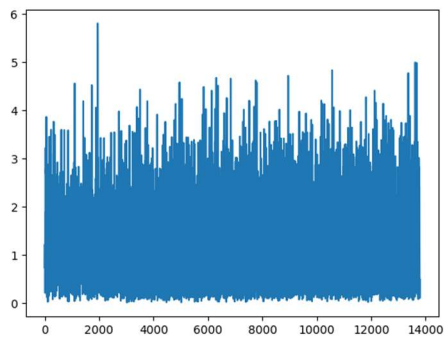
En las gráficas el eje X pertenece al número de datos de las pruebas que se están graficando, mientras que el eje Y representa el valor de la aceleración representada en valores de la aceleración de la gravedad (g).

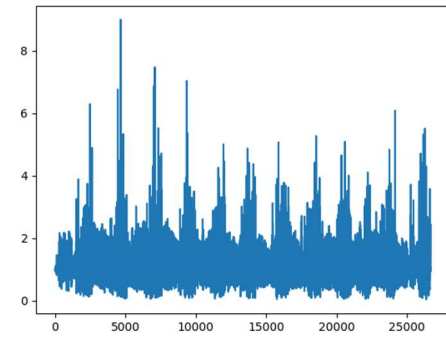
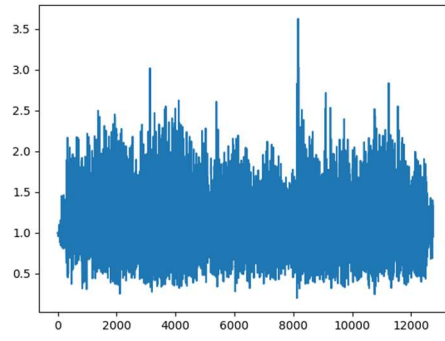
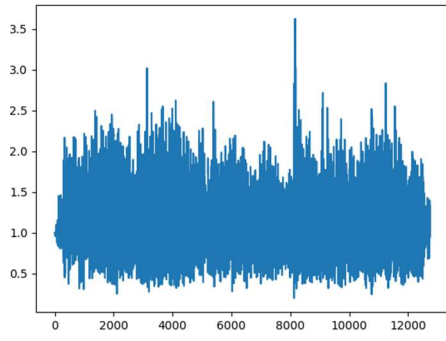
### Pruebas de caminata





## Pruebas de trote





## Pruebas de caídas con el cuerpo estático

