

APROXIMACIÓN METODOLÓGICA CON PROPÓSITO ACADÉMICO PARA EL  
DESARROLLO DE DISPOSITIVOS WEARABLE PARA EXTREMIDADES  
INFERIORES DEL CUERPO HUMANO



YESID FELIPE TOMBÉ CASTILLO  
JUAN ESTEBAN BEDOYA RAMÍREZ

Director: MSc. Marlon Felipe Burbano Fernández  
Codirector: PhD. Gustavo Adolfo Ramírez González

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telemática  
Popayán, Agosto de 2018

APROXIMACIÓN METODOLÓGICA CON PROPÓSITO ACADÉMICO PARA EL  
DESARROLLO DE DISPOSITIVOS WEARABLE PARA EXTREMIDADES  
INFERIORES DEL CUERPO HUMANO



Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en  
Electrónica y Telecomunicaciones

YESID FELIPE TOMBÉ CASTILLO  
JUAN ESTEBAN BEDOYA RAMÍREZ

Director: MSc. Marlon Felipe Burbano Fernández  
Codirector: PhD. Gustavo Adolfo Ramírez González

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telemática  
Popayán, Agosto de 2018

## Página de Aceptación

NOTA DE ACEPTACIÓN \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Firma del director: \_\_\_\_\_

Firma del jurado: \_\_\_\_\_

Firma del jurado: \_\_\_\_\_

Popayán, Agosto de 2018

## AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a Dios por iluminar y guiar este camino de enseñanza y aprendizaje. A nuestro director MSc. Marlon Burbano y codirector PhD. Gustavo Ramírez por su tiempo, esfuerzo y dedicación en el desarrollo de este trabajo de grado. A los ingenieros Ricardo Lucano y Juan Pablo Ruiz por sus conocimientos y valiosa colaboración. Al grupo de baile *Élite dance* por su acompañamiento y experiencia aportada. Finalmente, a nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional facilitando la culminación de esta etapa profesional.

# CONTENIDO

<b>1. CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>3</b>
1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA . . . . .	3
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN . . . . .	5
1.2.1. Objetivo General . . . . .	5
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	5
1.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN . . . . .	5
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN . . . . .	5
<b>2. CAPÍTULO II. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO</b>	<b>9</b>
2.1. CONCEPTOS GENERALES . . . . .	9
2.1.1. Bluetooth Low Energy . . . . .	9
2.1.2. Acelerómetro . . . . .	10
2.1.3. Procesamiento Digital de Señales . . . . .	10
2.1.4. Filtros Digitales . . . . .	11
2.1.5. Sistema Operativo Android . . . . .	11
2.2. TRABAJOS RELACIONADOS . . . . .	12
2.3. CITESPACE . . . . .	16
2.4. ARTÍCULOS SELECCIONADOS . . . . .	18
2.5. CONCLUSIONES . . . . .	21
<b>3. CAPÍTULO III. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA</b>	<b>23</b>
3.1. EVOLUCIÓN DEL DIAGRAMA GENERAL . . . . .	23
3.2. ETAPA DE FUNCIONALIDAD . . . . .	28
3.2.1. Definición de Requisitos . . . . .	28
3.2.2. Revisión de Vigilancia Tecnológica . . . . .	30
3.2.3. Elementos Seleccionados . . . . .	33
3.2.4. Preprocesamiento en el Módulo Secundario Wearable . . . . .	34
3.2.5. Procesamiento en el Módulo Primario Wearable . . . . .	35
3.3. ETAPA DE BATERÍA . . . . .	36
3.3.1. Cálculo de Energía Consumida . . . . .	36
3.3.2. Opciones de Energía . . . . .	36
3.3.3. Selección de Batería . . . . .	37
3.4. ETAPA DE VESTIBILIDAD . . . . .	37
3.4.1. Definición de Parámetros de Vestibilidad . . . . .	37
3.4.2. Diseño de Carcasa . . . . .	40
3.5. ENTREGABLES DE CADA ACTIVIDAD . . . . .	40
3.6. CONCLUSIONES . . . . .	41

<b>4. CAPÍTULO IV. PROTOTIPO FUNCIONAL OBTENIDO DE LA APROXIMACIÓN METODOLÓGICA</b>	<b>43</b>
4.1. FUNCIONALIDAD . . . . .	43
4.1.1. Definición de Requisitos . . . . .	43
4.1.2. Revisión de Vigilancia Tecnológica . . . . .	45
4.1.3. Elementos Seleccionados . . . . .	47
4.1.4. Preprocesamiento en el Módulo Secundario Wearable . . . . .	47
4.1.5. Procesamiento en el Módulo Primario Wearable . . . . .	55
4.2. BATERÍA . . . . .	69
4.2.1. Cálculo de Energía Consumida . . . . .	69
4.2.2. Opciones de Energía . . . . .	73
4.2.3. Selección de Batería . . . . .	73
4.3. VESTIBILIDAD . . . . .	74
4.3.1. Definición de Parámetros de Vestibilidad . . . . .	74
4.3.2. Diseño de Carcasa . . . . .	74
4.4. CONCLUSIONES . . . . .	76
<b>5. CAPÍTULO V. EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO FUNCIONAL</b>	<b>77</b>
5.1. PRUEBAS . . . . .	77
5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO . . . . .	81
5.2.1. Coeficiente de Correlación Pearson . . . . .	93
5.2.2. Tests de Normalidad . . . . .	94
5.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL . . . . .	95
5.3.1. Primera Hipótesis Nula . . . . .	95
5.3.2. Segunda Hipótesis Nula . . . . .	96
5.4. CONCLUSIONES . . . . .	101
<b>6. CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>103</b>
6.1. CONCLUSIONES . . . . .	103
6.2. TRABAJOS FUTUROS . . . . .	104

## LISTA DE FIGURAS

1.1.	Evolución del número de documentos wearable por período . . . . .	4
1.2.	Diagrama estratégico de análisis del período 2002 - 2017 . . . . .	6
2.1.	Proceso de digitalización de señales con filtrado . . . . .	10
3.1.	Primer diagrama general de la aproximación metodológica . . . . .	23
3.2.	Segundo diagrama general de la aproximación metodológica . . . . .	24
3.3.	Diagrama general nivel cero de la aproximación metodológica . . . . .	25
3.4.	Diagrama nivel uno de la etapa de Funcionalidad . . . . .	26
3.5.	Diagrama nivel uno de la etapa de Batería . . . . .	26
3.6.	Diagrama nivel uno de la etapa de Vestibilidad . . . . .	27
3.7.	Diagrama global nivel dos de la aproximación metodológica . . . . .	27
3.8.	Ejemplo del módulo secundario wearable . . . . .	34
3.9.	Tipos de módulo primario wearable . . . . .	35
3.10.	Áreas comunes para posicionar el wearable . . . . .	38
3.11.	Ejemplo de la guía forma de lenguaje correcto . . . . .	39
3.12.	Movimiento humano sin restricción por el uso de wearables . . . . .	39
4.1.	Sensores de dispositivos wearable extraídos de la vigilancia tecnológica . . . . .	45
4.2.	Tipos de batería de dispositivos wearable extraídos de la vigilancia tecnológica . . . . .	46
4.3.	Tecnologías de comunicación wearable extraídos de la vigilancia tecnológica . . . . .	46
4.4.	Composición del paquete de envío en BLE con datos de aceleración . . . . .	48
4.5.	Dispositivo YJ-16009-NRF51822 del módulo secundario wearable . . . . .	48
4.6.	Diagrama de bloques del chip nRF51822 . . . . .	50
4.7.	Diagrama de componentes de la unidad secundaria wearable . . . . .	51
4.8.	Diagrama de componentes de la aplicación en la unidad primaria wearable . . . . .	55
4.9.	Algoritmo de la clase BluetoothBleService.java . . . . .	56
4.10.	Algoritmo del cálculo de la magnitud de aceleración total . . . . .	57
4.11.	Algoritmo de la clase ServiceScanActivity.java . . . . .	58
4.12.	Algoritmo de la clase DeviceControlActivity.java. . . . .	59
4.13.	Algoritmo de funciones de los botones MAF, IOT y BMF . . . . .	60
4.14.	Algoritmo del histograma de los datos puros RAW . . . . .	61
4.15.	Algoritmo del histograma de los datos filtrados por MAF . . . . .	62
4.16.	Algoritmo del histograma de los datos filtrados por IOT . . . . .	63
4.17.	Algoritmo del histograma de los datos filtrados por BMF . . . . .	64
4.18.	Algoritmo de cálculo del filtro Moving Average Filter MAF . . . . .	65
4.19.	Algoritmo de cálculo del filtro Built.io IOT . . . . .	66
4.20.	Algoritmo de cálculo del filtro BlackMan Filter BMF . . . . .	67
4.21.	Lógica para el cálculo de un histograma . . . . .	68
4.22.	Lógica de solución Binned para histogramas . . . . .	68

4.23. Lógica para el cálculo del valor medio y desviación estándar . . . . .	69
4.24. Dispositivo INA219 DC Current Sensor . . . . .	70
4.25. Conexión del sensor de corriente con el módulo secundario wearable . . . . .	70
4.26. Diagrama de conexión del sensor INA219 DC Current Sensor . . . . .	71
4.27. Datos de corriente en tiempo real mostrados en el monitor serial . . . . .	72
4.28. Comportamiento de corriente en el dispositivo wearable . . . . .	73
4.29. Base cóncava de la carcasa adaptada al tobillo en milímetros . . . . .	75
4.30. Ancho, alto y largo de la carcasa en milímetros . . . . .	75
4.31. Ancho y largo interno de la carcasa en milímetros . . . . .	75
4.32. Amarre para la tapa de la carcasa en milímetros . . . . .	76
4.33. Sujetadores del amarre de la carcasa en milímetros . . . . .	76
5.1. Usuarios quienes realizan las pruebas . . . . .	78
5.2. Posicionamiento del wearable en el cuerpo del usuario . . . . .	79
5.3. Caracterización del movimiento paso lateral . . . . .	80
5.4. Caracterización del movimiento paso adelante-atrás . . . . .	80
5.5. Caracterización del movimiento paso atrás-atrás . . . . .	81
5.6. Magnitud de aceleración total en una ventana. 1er movimiento . . . . .	82
5.7. Magnitud de aceleración total en el tiempo completo. 1er movimiento . . . . .	82
5.8. Magnitud de aceleración total en una ventana. 2do movimiento . . . . .	83
5.9. Magnitud de aceleración total en el tiempo completo. 2do movimiento . . . . .	83
5.10. Magnitud de aceleración total en una ventana. 3er movimiento . . . . .	84
5.11. Magnitud de aceleración total en el tiempo completo. 3er movimiento . . . . .	84
5.12. Media y desviación estándar de señal bruta por ventana. 1er movimiento . . . . .	85
5.13. Histograma con media y desv. estándar de señal bruta. 1er movimiento . . . . .	86
5.14. Media y desviación estándar de señal bruta por ventana. 2do movimiento . . . . .	86
5.15. Histograma con media y desv. estándar de señal bruta. 2do movimiento . . . . .	87
5.16. Media y desviación estándar de señal bruta por ventana. 3er movimiento . . . . .	87
5.17. Histograma con media y desv. estándar de señal bruta. 3er movimiento . . . . .	88
5.18. Magnitud total de aceleración con filtro MAF. 1er movimiento . . . . .	89
5.19. Magnitud total de aceleración con filtro MAF. 2do movimiento . . . . .	89
5.20. Magnitud total de aceleración con filtro MAF. 3er movimiento . . . . .	90
5.21. Resultados análisis de Corr. Pearson para todos usuarios en el 2do movimiento . . . . .	94
5.22. Resultados p-value del test U de Mann Whitney entre usuarios . . . . .	96
5.23. Valores de significancia del usuario 1 . . . . .	99
5.24. Valores de significancia del usuario 2 . . . . .	99
5.25. Valores de significancia del usuario 3 . . . . .	100



## LISTA DE TABLAS

2.1.	Ejemplos de campos de estudio de filtros digitales en DSP . . . . .	11
2.2.	Aportes y carencias de los artículos del estado del arte . . . . .	15
2.3.	Cadenas de búsqueda utilizadas para el análisis con Citespace . . . . .	18
2.4.	Documentos utilizados para el diseño de la aproximación metodológica . .	20
3.1.	Perfil de usuario objetivo . . . . .	28
3.2.	Descripción de parámetros de actividades físicas a estudiar . . . . .	29
3.3.	Características estadísticas de las señales . . . . .	30
3.4.	Descripción de las variables de actividad física esperadas . . . . .	30
3.5.	Resultados de la revisión de vigilancia tecnológica . . . . .	33
3.6.	Herramientas seleccionadas para el desarrollo del proyecto . . . . .	34
3.7.	Especificaciones de la batería seleccionada . . . . .	37
3.8.	Parámetros de vestibilidad para el diseño de la carcasa . . . . .	40
3.9.	Lista de entregables de cada actividad de la aproximación metodológica . .	41
4.1.	Perfil de usuario objetivo del proyecto prototipo wearable . . . . .	43
4.2.	Descripción de las actividades físicas a estudiar del prototipo wearable . . .	44
4.3.	Variables de actividad física esperadas del proyecto prototipo wearable . .	45
4.4.	Herramientas seleccionadas para el desarrollo del proyecto prototipo wearable	47
4.5.	Características del chip NRF51822 de Nordic Semiconductor . . . . .	49
4.6.	Parámetros de medición del sensor de corriente utilizado . . . . .	71
4.7.	Especificaciones de la batería Sony CR2032 . . . . .	73
4.8.	Parámetros para el diseño de la carcasa del proyecto prototipo wearable . .	74
5.1.	Características de los usuarios que realizan las pruebas . . . . .	78
5.2.	Valores de la media de aceleración bruta. 1er movimiento . . . . .	90
5.3.	Valores de desviación estándar de aceleración bruta. 1er movimiento . . . .	90
5.4.	Valores de la media de aceleración bruta con filtro MAF. 1er movimiento .	91
5.5.	Valores de desv. estándar de aceleración bruta con filtro MAF. 1er movimiento	91
5.6.	Valores de la media de aceleración bruta con filtro BUILT.IO. 1er movimiento	91
5.7.	Valores desv. estándar de aceleración con filtro BUILT.IO. 1er movimiento	92
5.8.	Valores de la media de aceleración bruta con filtro BMF. 1er movimiento .	92
5.9.	Valores desv. estándar de aceleración bruta con filtro BMF. 1er movimiento	92
5.10.	Kurtosis y Skewness del paso adelante-atrás para el usuario 1 . . . . .	94
5.11.	Test de normalidad del paso adelante-atrás para el usuario 1 . . . . .	95
5.12.	Resultados p-value del test U de Mann Whitney para el usuario 1 . . . . .	97
5.13.	Resultados p-value del test U de Mann Whitney para el usuario 2 . . . . .	98
5.14.	Resultados p-value del test U de Mann Whitney para el usuario 3 . . . . .	98

## LISTA DE ACRÓNIMOS

- ATT** *Attribute Protocol*, Protocolo de Atributo
- BLE** *Bluetooth Low Energy*, Bluetooth de Bajo Consumo
- CAD** *Computer-Aided Design*, Diseño Asistido por Computadora
- FSR** *Force-Sensing Resistor*, Resistencia Sensible a la Fuerza
- GAP** *Generic Access Profile*, Perfil de Acceso Genérico
- GATT** *Generic Attribute Profile*, Perfil de Atributos Genérico
- HAR** *Human Activity Recognition*, Reconocimiento de Actividad Humana
- I2C** *Inter-Integrated Circuit*, Circuito Interintegrado
- RAM** *Random Access Memory*, Memoria de Acceso Aleatorio
- RIS** *Research Information Systems Citation*, Sistemas de Información de Investigaciones
- SPI** *Serial Peripheral Interface*, Interfaz de Periféricos Serie
- SVM** *Supported Vector Machine*, Máquina de Vector Soporte
- UUID** *Universally Unique Identifier*, Identificador Único Universal
- WPAN** *Wireless Personal Area Network*, Red Inalámbrica de Área Personal

## RESUMEN

El desarrollo de la tecnología en el mundo, se ve reflejado con la aparición de nuevos dispositivos en la vida cotidiana de las personas. En la actualidad es común encontrar personas que utilizan prendas o accesorios en su cuerpo que tienen como finalidad mejorar la calidad de vida en ámbitos como el deporte, la salud, el entretenimiento, entre otros. A estos elementos que adaptan pequeños dispositivos electrónicos, incluyendo un microprocesador, los cuales se incorporan en alguna parte del cuerpo e interactúan constantemente con el usuario u otros sistemas con el fin de realizar una tarea específica, se denominan *Wearables* [1].

Hace miles de años, en China, las personas usaban un ábaco alrededor del cuello, que, en cierto sentido, era una computadora portátil. Podría decirse que la primera computadora portátil de los últimos tiempos era un dispositivo fácil de ocultar, del tamaño de una caja de cigarrillos. Este dispositivo incluía muchas de las características importantes que ahora se encuentran en la última ola de tecnología portátil: era relativamente pequeña, portátil y estaba diseñada para brindar a sus usuarios acceso asistido por computadora en el mundo físico. Alrededor de la década de 1980, se han intentado agregar funcionalidad avanzada de la computadora a los dispositivos existentes, como el reloj de pulsera. Muchas de las características de esos primeros dispositivos se han plegado en teléfonos inteligentes y otros dispositivos conectados a Internet, que proporcionan herramientas para registrar una creciente gama de información personalizada del usuario, así como para comunicarse con otras tecnologías cercanas [2].

En este contexto se plantea una aproximación metodológica la cual describe un modelo de referencia para el diseño y posterior desarrollo de dispositivos wearable enfocados en las partes inferiores del cuerpo humano, es decir, desde la cintura hasta los pies. Su elaboración se basa principalmente en la recolección de información relevante de investigaciones académicas, artículos científicos y aportes experimentales acerca de la creación de tecnología wearable. Por tanto, este trabajo pretende establecer una guía de uso académico con el fin de promover el estudio, la investigación y el desarrollo de este tipo de tecnología dentro de la academia.

Este documento se divide en seis capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo I. Establece la problemática de la investigación, su alcance y justificación. Además, delimita y describe la solución de manera clara y precisa.

Capítulo II. Presenta los conceptos generales y un análisis bibliométrico realizado con el software CiteSpace, relacionado con temas wearable, para la estructuración de la aproximación metodológica.

Capítulo III. Describe la elaboración de la aproximación metodológica, a partir de información relevante de documentos procedentes de este análisis.

Capítulo IV. Expone el desarrollo de un prototipo funcional con base en las actividades dispuestas en la propuesta metodológica construida previamente.

Capítulo V. Detalla las pruebas realizadas para la evaluación del prototipo. Además, muestra los resultados obtenidos de un análisis estadístico descriptivo e inferencial.

Capítulo VI. Brinda las conclusiones del proyecto y sus posibles trabajos futuros.

# 1. CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este capítulo comprende todo lo relacionado con el problema de investigación que debe ser resuelto con el desarrollo de este trabajo. Por lo tanto, se identifica el problema, se establecen los objetivos, se limita su alcance y se presenta la justificación con el fin de dar solución a la pregunta de investigación planteada.

## 1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La tecnología wearable<sup>1</sup> es una herramienta primordial para el acompañamiento de la vida diaria. Constantemente aparecen nuevos dispositivos que satisfacen necesidades y deseos, facilitando la realización de tareas y aumentando así la calidad de vida de las personas.

Dentro de este contexto, nacen los dispositivos wearable como “*un conjunto de aparatos y dispositivos portátiles que se incorporan en alguna parte del cuerpo del individuo, principalmente en la muñeca, los pies o la cintura, y que poseen una serie de sensores con capacidad computacional con lo que pueden calcular datos simples*” [4]. Estos dispositivos se hallan en diferentes campos como la salud, el deporte, la comunicación, el entretenimiento.

Haciendo un recuento bibliográfico la Figura 1.1 muestra un incremento significativo en el número de documentos relacionados con tecnología wearable, la cual surge en el mundo actual debido a los beneficios que conlleva su uso en las técnicas de evaluación de la actividad física [5]. Es concluido entonces que las personas que investigan y hacen desarrollos en dispositivos hardware han centrado su atención en este tipo de tecnología. Es importante resaltar que la información dispuesta en la Figura 1.1 y Figura 1.2 fue obtenida mediante los 4118 artículos consultados de la base de datos IEEE X-plore enfocados en la cadena de búsqueda “*wearable design*” y efectuando el análisis con SciMat versión 1.1.04 [6].

A raíz de la vinculación de la tecnología wearable con dispositivos móviles [7], muchos desarrolladores trabajan estos proyectos. Sin embargo, según la literatura realizada no se encontró ninguna clase de metodología o marco metodológico que les brinde una guía para optimizar el proceso de desarrollo, lo que implica obstáculos a la hora de decidir cómo iniciar y desarrollar un proyecto de estos. En vista de ello, son evidenciados inconvenientes como: determinación de parámetros, búsqueda de dispositivos semejantes, análisis de sensores, tecnologías de comunicación, usabilidad, entrega y procesamiento de datos. Siendo más específicos, el desarrollo de la tecnología wearable viene enfocada a superar retos como: uso de batería, refrigeración, networking, interoperabilidad, comunicación y privacidad [8, 9].

---

<sup>1</sup>La tecnología wearable refiere a aquellos productos que deben ser usados en el cuerpo del usuario por un período extendido de tiempo, mejorando la experiencia del usuario [3].

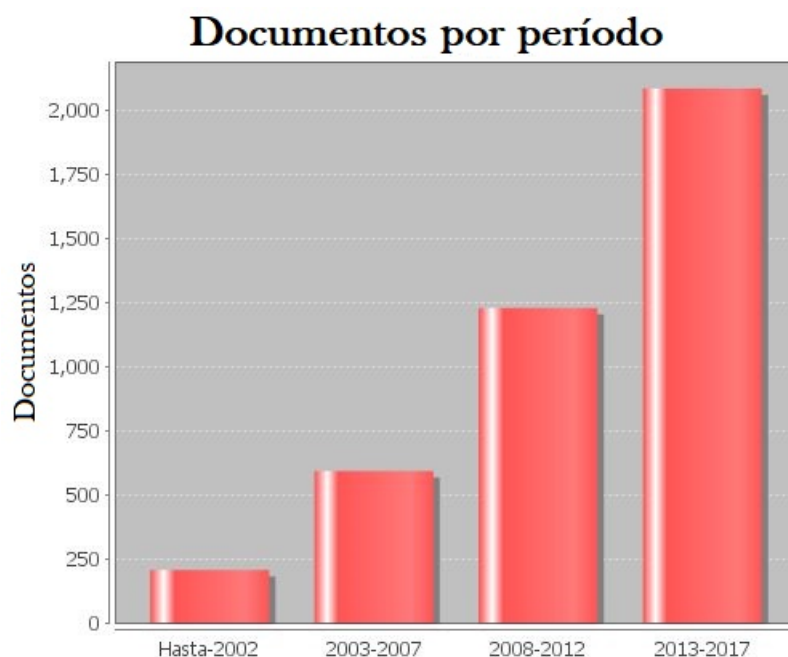


Figura 1.1: Evolución del número de documentos wearable por período. Fuente: SciMat

Evidentemente, esta tecnología está penetrando cada vez más en la vida cotidiana por su utilidad, comodidad y portabilidad; esto implica la necesidad de desarrollar dispositivos wearable, superando algunos retos y generando conocimiento que permita ir al ritmo de la evolución tecnológica en el mundo.

Por tal razón, de los resultados del análisis con SciMat de la Figura 1.1 y Figura 1.2 los cuales reflejan el interés en el área de los wearables y como no se encontró una metodología para su realización, se hace necesaria una herramienta útil para el desarrollo de estos dispositivos con el fin de lograr una mayor eficiencia en la asignación de recursos financieros, físicos, humanos y de tiempo de trabajo. Para abordar este problema es planteada una recopilación y análisis de documentos de investigación basados en el diseño hardware y/o software que contribuyan a la mejora de este proceso.

Teniendo en cuenta el escenario descrito, la siguiente pregunta de investigación es planteada: *¿Cómo desarrollar una aproximación metodológica apropiada para el desarrollo de dispositivos wearable con propósito académico<sup>2</sup> para extremidades inferiores del cuerpo humano?*

---

<sup>2</sup>El propósito académico hace referencia a la promoción de actividades científicas, de investigación o desarrollo encaminadas a motivar a las personas dentro de la academia en la construcción de dispositivos wearables acorde a las tendencias actuales. Además, es enfocado en la academia por razones de alcance del proyecto.

## 1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.2.1. Objetivo General

- Elaborar una aproximación metodológica<sup>3</sup>, con propósito académico, para el desarrollo de dispositivos wearable para extremidades inferiores del cuerpo humano.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

1. Establecer la línea de base de la propuesta metodológica, para el desarrollo de dispositivos wearable, tomando como referente el análisis bibliométrico.
2. Diseñar la aproximación metodológica fundamentada en los lineamientos del objetivo específico 1.
3. Desarrollar un prototipo funcional de un dispositivo wearable utilizando la propuesta metodológica establecida en el objetivo específico 2.
4. Seleccionar parámetros de validación<sup>4</sup> basándose en la aproximación metodológica y aplicarlos al prototipo desarrollado.

## 1.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Diseñar una aproximación metodológica basada en experiencias recolectadas de los documentos, libros y/o proyectos de investigación obtenidos con el uso de la herramienta CiteSpace y demás información útil encontrada. Esta aproximación es evaluada con el diseño de un producto wearable capaz de recolectar, almacenar, filtrar y documentar movimientos básicos del ser humano<sup>5</sup>. Seguidamente, se realiza un análisis estadístico de los estudios de caso y se procede a concluir el comportamiento de las señales captadas.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Tomando como referencia la memoria de tesis “*SciMat: Herramienta Software para el Análisis de la Evolución del Conocimiento Científico. Propuesta de una Metodología de Evaluación*” [11] se efectúa el análisis de cinco períodos de tiempo diferentes variando algunos parámetros. De lo anterior se obtiene la Figura 1.2 concluyendo lo siguiente:

---

<sup>3</sup>Aproximación metodológica: propuesta para hacer de forma explícita y estructural una tarea determinada.

<sup>4</sup>La validación se realiza desde el ámbito experimental y estadístico.

<sup>5</sup>Los movimientos básicos generales del ser humano según el modelo clínico pueden ser: abducción, aducción, flexión, extensión, rotación, entre otros [10].

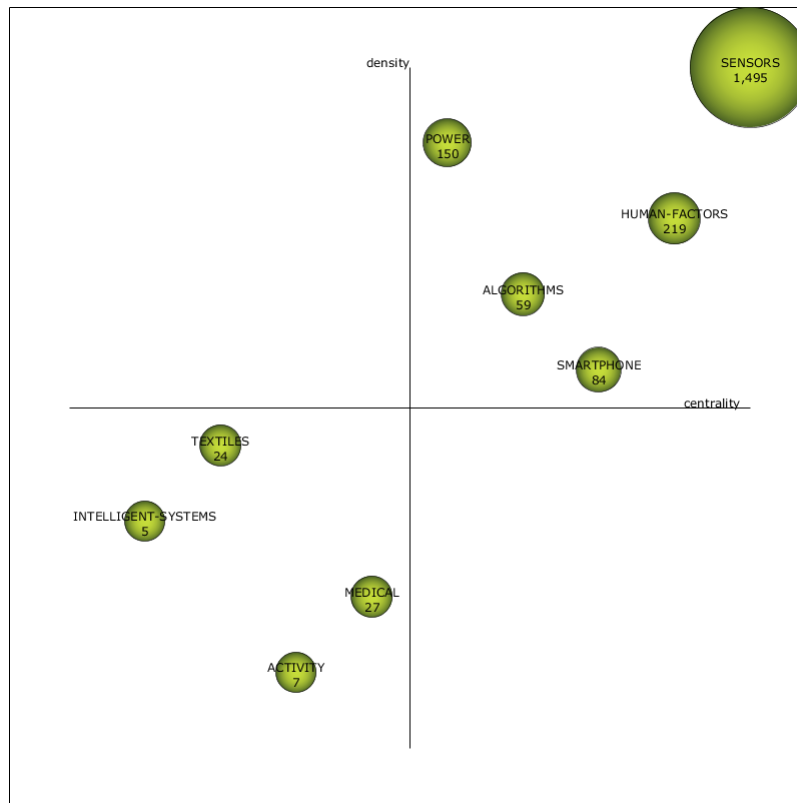


Figura 1.2: Diagrama estratégico de análisis del período 2002 - 2017. Fuente: SciMat

- En los últimos 15 años se ha trabajado de manera significativa en los sensores con alto enfoque en los factores humanos, fuentes de alimentación y circuitería de sensores.
- El área de la medicina y los textiles, según el análisis hecho a partir del 2002, comenzó como un tema emergente y permanece hasta la época actual. Existe un mayor interés por su desarrollo, aunque ninguno es, ahora, un tema motor.
- A raíz de la evolución de los smartphones en la última década, son, ahora, un tema importante al momento de trabajar con dispositivos wearable.
- En los últimos tres periodos el tema básico “USER-CENTRED-DESIGN” ha prevalecido como un proceso necesario para el diseño de sensores y dispositivos wearable, aunque su desarrollo esta opacado, por el interés en áreas como los factores humanos, la fuente de alimentación, entre otras.
- Por todo esto, el planteamiento de una aproximación metodológica para el desarrollo de dispositivos wearable tiene importancia, ya que el área de diseño, aunque es un tema básico, no contiene un peso ni una centralidad significativa lo que implica una brecha de investigación.



Ciertamente, los artículos relacionados con esta área de la investigación muestran el avance obtenido en los últimos años [12–14], los cuales hablan del diseño de dispositivos wearable, algoritmos para la detección de movimientos básicos del cuerpo humano y la validación de los datos medidos.

Cabe mencionar que el trabajo de grado a realizar presenta un gran interés en registrar los movimientos realizados por las extremidades inferiores del cuerpo humano, debido a la vinculación de éste con el proyecto de investigación de doctorado titulado “*Algoritmo para la comparación de movimientos periódicos humanos en el contexto de la enseñanza y el aprendizaje de habilidades motrices*”, en donde, a raíz de la popularidad adquirida en diversas culturas del baile de salsa [15], es deseado capturar los datos generados en el movimiento de piernas y pies a través de un dispositivo wearable para su posterior análisis y utilización.



## 2. CAPÍTULO II. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

A continuación se presentan los conceptos generales, estado del arte con síntesis de trabajos de investigación relacionados con el desarrollo de dispositivos wearable a partir de Scimat, resultado del análisis con la herramienta software CiteSpace para la elaboración de la aproximación metodológica. Finalmente, se listan los artículos seleccionados describiendo los aportes realizados al presente trabajo.

### 2.1. CONCEPTOS GENERALES

En esta sección se describen brevemente los conceptos fundamentales utilizados para el desarrollo del trabajo de trabajo. Para profundizar estos conceptos y obtener más información, consultar el Anexo C.

#### 2.1.1. Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy, *BLE*, es una tecnología diseñada como complemento del tradicional Bluetooth, con características de consumo ultra bajo de energía para la comunicación inalámbrica, a diferencia del Bluetooth, el cual busca resolver objetivos de diseño diferente.

En el bluetooth tradicional, el mayor propósito se encontraba en la transmisión de audio y el envío de información, debido a esto, cada vez se requería anchos de banda mayores. El bluetooth original tenía una transferencia de datos en la capa física de 1 Mbps, en el Bluetooth 2.0 esta velocidad es incrementada a 3 Mbps, el Bluetooth 3.0 agregó MAC PHY (AMP) que utiliza el protocolo IEEE 802.11, con lo cual alcanzó una rapidez de hasta cientos de Mbps [16, 17]. La versión de Bluetooth 4.0, también llamado *Bluetooth Smart*, no se concentra en altas velocidades de transferencia ni en conexiones largas, sino en el consumo ultra bajo de potencia, el cual tiene como objetivo dispositivos que usen baterías tipo botón.

Los parámetros de diseño de bajo consumo de energía son visibles en los siguientes puntos:

- **Bandas ISM:** la banda de radio ISM trabaja en la frecuencia de 2.4 GHz, posee pobres características de propagación, incluyendo la rápida absorción de su energía radiada por el agua, es de bajo costo, además, el espectro de funcionamiento es de libre uso a nivel mundial por lo que no es necesario licenciamiento para trabajar con ella. Debido a su bajo costo se ignoran las interferencias por redes WI-FI y las limitaciones en el rango de potencia que se puede utilizar.
- **IP license:** patente hecha por SIG (*Bluetooth Special Interest Group*), por lo cual se reducen costos al ser usada con Bluetooth.

- **Baja potencia:** el bosquejo original de BLE fue pensado para baterías tipo botón, las cuales son de bajo costo no sólo en el consumo de energía, sino también en el diseño de sus contenedores y mantenimientos; en caso de querer altas transferencias de datos se requerirá otro tipo de baterías.

### 2.1.2. Acelerómetro

Son dispositivos que miden la aceleración, definida como la variación de velocidad por unidad de tiempo, esta es medida en metros por segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ) o en fuerza  $g^1$ . La mayor utilidad de los acelerómetros está en su eficiencia para medir vibraciones o la determinación de direcciones [18]. Se define la aceleración como la variación de la velocidad respecto al tiempo, tal como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$a = \frac{dV}{dT} \quad (2.1)$$

### 2.1.3. Procesamiento Digital de Señales

El Procesamiento Digital de Señales, *DSP*, implica la manipulación matemática de señales y la optimización de estas, como la codificación, conversión o filtrado de datos. Caracterizada principalmente por trabajar con funciones discretas en el tiempo, frecuencia o cualquier otro dominio discreto. Dentro de DSP se encuentra el tema de filtros digitales, los cuales trabajan con señales extraídas del mundo real como audio, temperatura, vídeo o posición obtenidos y digitalizados con el uso de sensores con técnicas de muestreo, conversión de datos [19].

En la Figura 2.1, se observa el proceso de digitalización de señales.

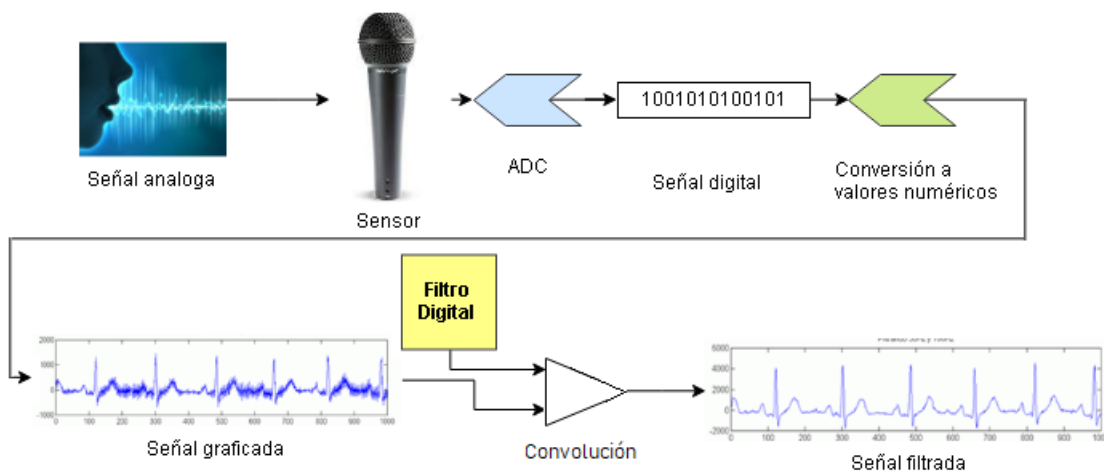


Figura 2.1: Proceso de digitalización de señales con filtrado. Fuente propia

<sup>1</sup>Un  $g$  es equivalente a la gravedad encontrada en la tierra:  $9.8 m/s^2$ .

### 2.1.4. Filtros Digitales

Los filtros digitales tienen dos funciones específicas: la restauración y separación de señales. Dentro de las diversas aplicaciones en DSP, es uno de los temas más importantes debido a su alta eficiencia, así como en adquisición de datos y análisis del espectro. Algunas de estas se observan en la Tabla 2.1

Espacial	<ul style="list-style-type: none"><li>• Compresión de datos</li><li>• Análisis inteligente de sensores por sondas espaciales remota</li><li>• Mejoramiento de fotografía espacial</li></ul>
Médico	<ul style="list-style-type: none"><li>• Diagnóstico de imágenes</li><li>• Análisis de electrocardiogramas / EEG, EMG, EDA</li><li>• Almacenamiento de imágenes diagnósticas</li></ul>
Comercial	<ul style="list-style-type: none"><li>• Compresión de imagen y video para presentaciones multimedia</li><li>• Efectos especiales de película</li><li>• Llamadas de vídeo conferencia</li></ul>
Teléfono	<ul style="list-style-type: none"><li>• Compresión de datos y voz</li><li>• Reducción de eco</li><li>• Multiplexación de señales</li></ul>
Militar	<ul style="list-style-type: none"><li>• Radar y Sonar</li><li>• Guía de artillería</li><li>• Aseguramiento de comunicaciones</li></ul>
Científico	<ul style="list-style-type: none"><li>• Análisis y registro de terremotos</li><li>• Adquisición de datos</li><li>• Análisis espectral</li><li>• Simulación y modelaje</li></ul>

Tabla 2.1: Ejemplos de campos de estudio de filtros digitales en DSP. Basada en [20]

Los filtros digitales separan y suavizan señales que han sido contaminada con algún tipo de interferencia o ruido. Se utilizan operaciones matemáticas para atenuar la señal original. La forma más normal de implementar un filtro, es emplear la convolución con los datos de entrada para obtener la señal filtrada de salida; normalmente se encuentra en el dominio del tiempo para filtros digitales [21–24]. Para definir el comportamiento de una señal es útil el *histograma*.

### 2.1.5. Sistema Operativo Android

Android es un sistema operativo inicialmente pensado para teléfonos móviles, al igual que *iOS*, *Symbian* y *Blackberry OS*. Lo que lo hace diferente es que está basado en Linux, un núcleo de sistema operativo libre, gratuito y multiplataforma. Ahora se encuentra tanto en teléfonos inteligentes como en tabletas, relojes inteligentes, televisores y automóviles.

El sistema permite programar aplicaciones en una variación de Java llamada *Dalvik*. El sistema operativo proporciona todas las interfaces (API's) necesarias para desarrollar aplicaciones que accedan a las funciones del teléfono (como el GPS, las llamadas, la agenda, etc.) de una forma muy sencilla en un lenguaje de programación muy conocido como es Java [25].

Esta sencillez, junto a la existencia de herramientas de programación gratuitas, hacen que una de las cosas más importantes de este sistema operativo sea la cantidad de aplicaciones disponibles, que extienden casi sin límites la experiencia del usuario.

## 2.2. TRABAJOS RELACIONADOS

A continuación, son plasmadas las síntesis de trabajos de investigación provenientes del análisis realizado en Scimat con la cadena de búsqueda “*wearable design*”:

En “*A mobile application for easy design and testing of algorithms to monitor physical activity in the workplace*” [26] son realizadas aproximaciones con el uso de técnicas de procesamiento de datos con sus respectivas limitaciones, utilizando sistemas tipo HAR, como la capacidad de procesamiento y batería; este trabajo estudia actividades como caminar, subir y bajar escaleras, correr y quedarse sentado mediante sistemas SMV, además de parámetros de calidad para desarrollarlas correctamente. La recolección de datos es llevada a cabo en Android. Este artículo describe el diseño de un sistema wearable con aplicaciones web y aunque expone el proceso de desarrollo no proporciona la experiencia de la práctica, la cual llega como resultado de su análisis final, más no como una recomendación antes de iniciar la misma.

Así mismo, “*Development of gait segmentation methods for wearable foot pressure sensors*” [27] emplea sensores de presión y describe el funcionamiento de ellos, dando así aportes teóricos y parámetros los cuales son obtenidos del dispositivo hecho de un arreglo de 64 sensores optoelectrónicos de presión incorporados en una capa de silicona. Este wearable mide la presión de la planta del pie y transmite los datos de forma inalámbrica al computador. Utiliza el “gait model” el cual describe seis diferentes etapas el proceso de análisis del paso del usuario. De este trabajo se obtiene la experiencia en el diseño de un dispositivo wearable donde son propuestos los modelos y las referencias del artículo. Sin embargo, no indica una estructura definida que el desarrollador pueda seguir para desplegar un dispositivo de naturaleza similar.

Por otra parte, “*Design for wearability*” [28] está enfocado en el desarrollo de dispositivos wearable adaptables al usuario de tal manera que sean localizados, entendidos y definidos los espacios del cuerpo humano donde los movimientos no sean interferidos. Como resultado detalla una serie de directrices de la forma del dispositivo, describiendo recomendaciones para el diseño del wearable como criterios de posición de acuerdo a la funcionalidad y accesibilidad, uso del lenguaje del contorno humano, priorización de los movimientos del usuario, limitaciones de tamaño y peso para acoplarse a la mayor

cantidad de usuarios posibles con diferentes características de masa muscular, altura o edad. En este artículo se proponen guías para el diseño de dispositivos wearable con el fin de garantizar una correcta asimilación con el usuario. A pesar de ello no detalla aspectos técnicos ni un análisis que determine parámetros relevantes de la actividad<sup>2</sup> a estudiar.

Igualmente, “*Biodesign and human body: a new approach in wearable devices*” [29] provee una guía que contiene metodologías e instrumentos para poder dar un valor agregado a los dispositivos wearable estudiados y desarrollados por los profesionales de la salud y la ingeniería, debido a que hoy en día, existe una inclinación para modificar el concepto de bienestar y cuidado de la salud cambiando a tecnologías wearable. Concisamente, son trabajadas dos clases de requerimientos igualmente importantes y complementarios que son la ingeniería y el diseño orientado a usuarios, así poder asegurar un alto grado de libertad, la habilidad para realizar actividades normales y una interfaz amigable con el usuario. Aunque esta investigación plantea el diseño de dispositivos wearable para el cuerpo humano en general dentro del campo de la salud, se convierte en un referente para la elaboración de la aproximación metodológica planteada, la cual hace énfasis en las extremidades inferiores del cuerpo humano.

Ahora, “*A wearable walking monitoring system for gait analysis*” [30] presenta tanto el diseño hardware como software para el desarrollo de un sistema de monitorización al caminar para realizar un análisis de la marcha. Para el hardware, el mecanismo propuesto es adaptable a diferentes individuos y la portabilidad del diseño hace que sea fácil realizar experimentos al aire libre. Actualmente una forma confiable de analizar la marcha es realizada con el sistema de captura de movimiento Vicon y el sistema de placa de fuerza Kistler, que proporcionan información cinética y de coordinación espacial. Sin embargo, el sistema está basado en marcadores<sup>3</sup>, requiriendo que al sujeto le sean colocados en el cuerpo donde a menudo toma más de una hora instalarlos. Además, la placa de fuerza está ubicada en el suelo y es necesario que el usuario pise correctamente para obtener buenos resultados. Por ende, el usuario necesita ser entrenado para el experimento y sólo puede hacerse en el laboratorio de movimiento profesional. Por estas razones, muchos estudios tratan de darle soluciones alternativas a este inconveniente construyendo sistemas portátiles con el uso de sensores como acelerómetros, giroscopios, sensores de resistencia a la fuerza (FSR), electromiografía (EMG) o combinaciones de ellos. En cuanto al diseño software, desarrolla un nuevo algoritmo para detectar las dos fases de la marcha y segmentar los cuatro períodos de ésta durante la fase de postura. Además, el centro de la fuerza de contacto con el suelo es calculado sobre la base de las relaciones entre los cuatro sensores Flexiforce. Este trabajo plantea el diseño hardware y software a grandes rasgos de un wearable para el monitoreo de la marcha, evitando al usuario realizar trabajos excesivos logrando buenos resultados. Sin embargo, los pasos que guiaron el desarrollo del dispositivo no son especificados, al igual que los factores tenidos en cuenta para la selección de los sensores y el software de procesamiento de datos.

---

<sup>2</sup>La actividad se refiere a las acciones realizadas por el cuerpo humano que puedan ser medidas a través de sensores wearable.

<sup>3</sup>Marcadores: sistemas de captura de movimiento.

De la misma forma, “*Wireless system for monitoring and real-time classification of functional activity*” [7] describe el diseño de una plataforma de baja potencia, compacta, inalámbrica y personalizable para el monitoreo de la actividad corporal. Es centrado en el desarrollo de dispositivos sensoriales que apoyan la monitorización de la salud en el hogar y la comunidad. El trabajo busca permitir monitorización remota continua, mínimamente intrusiva, de los pacientes para reducir la carga cada vez mayor de los proveedores de salud. De acuerdo con el artículo, utiliza diferentes metodologías para supervisar las actividades funcionales de los usuarios. Algunos incluyen cuestionarios, grabaciones de vídeo, captura de movimiento, entre otras, que a su vez tienen muchas limitaciones en términos de errores de notificación, privacidad, requisitos de energía y facilidad de uso. Los autores asumen la tarea de diseñar un dispositivo sensor personalizado que aborde completamente requisitos de bajo consumo de energía, comunicación de campo cercano, actualizable, adaptable al cuerpo humano y de bajo costo. Se presenta el diseño de una red de área personal inalámbrica (WPAN) compuesta por tres sensores, un teléfono inteligente (iPhone) y un dongle de transceptor RF ANT. Al mismo tiempo detalla la elección de los componentes del sensor desarrollado y define la construcción de la WPAN, selección del teléfono inteligente, protocolos de exploración y descubrimiento, inicialización y configuración de los sensores, desarrollo de la aplicación e interfaz gráfica de usuario. Realiza cálculos de duración y es mejorado con un control “sleep”. Además de esto, crea un prototipo de gabinete con ayuda de herramientas CAD y una impresora 3D, donde será alojado el circuito impreso. Es muy interesante este trabajo ya que plantea la búsqueda y posterior desarrollo de un dispositivo wearable con requerimientos primordiales de hoy en día, como el consumo de energía, portabilidad y la inmersión en Internet; además de esto, se indican parámetros para la elección de sus componentes. No obstante, hace falta identificar y definir una metodología detallada que sirva de referencia para posteriores mejoras al dispositivo o el diseño de uno nuevo.

En la Tabla 2.2, se muestra un resumen de los aportes y carencias de los artículos vistos anteriormente.

Artículo	Aporte	Carencia
« <i>A Mobile Application for Easy Design and Testing of Algorithms to Monitor Physical Activity in the Workplace</i> » S. Spinsante, A. Angelici, J. Lundström, M. Espinilla, I. Cleland, y C. Nugent.	Proceso de desarrollo de un sistema wearable con aplicaciones web, con recolección de datos en plataforma Android.	Falta de experiencia en la práctica, la cual llega como resultado de su análisis final, más no como una recomendación inicial.



« <i>Development of gait segmentation methods for wearable foot pressure sensors</i> » S. Crea, SMM de Rossi y M Donati.	Diseño de un dispositivo wearable donde son propuestos los modelos y referencias del documento.	No indica una estructura definida que el desarrollador pueda seguir para desplegar un dispositivo de naturaleza similar.
« <i>Design for wearability</i> » F. Gemperle, C. Kasabach, J. Stivoric, M. Bauer, y R. Martin.	Guías y recomendaciones para el diseño del wearable con el fin de que sean adaptables al usuario y no interfiera en sus movimientos.	Ausencia de aspectos técnicos que determinen los parámetros principales de la actividad a seguir.
« <i>Biodesign and Human Body: a New Approach in Wearable Devices</i> » M. Canina y V. Ferraro.	Diseño de dispositivos wearable para el cuerpo humano en general dentro del campo de la salud.	Énfasis sólo en el campo de la salud, excluyendo ámbitos como el deporte, entretenimiento, etc.
« <i>A wearable walking monitoring system for gait analysis</i> » Tsung-Han Hsieh, An-Chih Tsai, Cha-Wei Chang, Ka-Hou Ho, Wei-Li Hsu, y Ta-Te Lin.	Diseño hardware y software de un wearable para el monitoreo de la marcha. Comparación con otro sistema, logrando evitar trabajos excesivos al usuario y obteniendo buenos resultados.	No se especifican los pasos del desarrollo del dispositivo, ni los factores a tener en cuenta para la selección de los sensores y el software de procesamiento de datos.
« <i>Wireless system for monitoring and real-time classification of functional activity</i> » P. M. Butala, Y. Zhang, T. D. C. Little, y R. C. Wagenaar.	Exploración y posterior desarrollo de un dispositivo wearable con características de bajo consumo de energía, portabilidad e inmersión a Internet. Además, indica algunos parámetros para la elección de sus componentes.	No define una metodología detallada que sirva de referencia para posibles mejoras al dispositivo o el diseño de uno nuevo.

Tabla 2.2: Aportes y carencias de los artículos del estado del arte a partir de SciMat. Fuente propia

De lo anterior se observa que el aporte principal está alrededor del diseño de wearables para monitoreo de actividades físicas, mientras que la mayor brecha encontrada es la falta de experiencias o instrucciones claras para el inicio de un proyecto de este tipo. Así, para la realización de este trabajo se realizan análisis con el software CiteSpace, que se explica a continuación.

### 2.3. CITESPACE

Programa de visualización y análisis de tendencias y patrones en la literatura científica [31], diseñado como una herramienta para la comprensión del dominio progresivo del conocimiento, el cual encuentra puntos críticos en el desarrollo de un campo o dominio, conocidos como puntos de cambio y de pivote. Este software provee diferentes funciones que facilitan el entendimiento y la interpretación de redes científicas, un ejemplo de esto, es la identificación de áreas de la investigación de rápido crecimiento o en auge, con su respectiva citación, descomposición de largas redes de información en *clúster*<sup>4</sup> de dominio, denominación automática de *clústeres* según el área de investigación escogida. Los clústeres pueden ser organizados por: abstracts, palabras claves, patrones geoespaciales de colaboración y áreas únicas de colaboración internacional.

Soporta análisis estructural y temporal de redes derivadas de las publicaciones científicas, las cuales incluyen redes de colaboración, redes de autor co-citacion y redes de documento co-citacion, además de las redes basadas en términos, instituciones y países. Una de las principales fuentes de información de CiteSpace es *Web of Science*. Aun así, para este trabajo, se hace uso de la base de datos de *Scopus*<sup>5</sup> la cual proporciona una enorme fuente de información útil, donde se descargan archivos tipo RIS con los siguientes términos de búsqueda:

- Lower Limb Wearable
- Methodology for Wearable
- Noise Reduction Sensor Data
- Processing Wearable Data
- Rigid Lower Body
- Sensor Data
- Wearable Design
- Wearable Methodology
- Wearable Lower Body

El procedimiento para realizar el análisis de los datos en CiteSpace se lista a continuación:

---

<sup>4</sup>Clúster refiere a un conjunto de objetos que son más similares (en cierto sentido) entre sí, que a los de otros conjuntos.

<sup>5</sup>Scopus es una de las mayores base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas, incluyendo libros y actas de conferencias.

1. En primera instancia se procede a determinar los términos a utilizar para la búsqueda, los cuales se recomienda que abarquen la mayor cantidad de tema posible del dominio de interés, así se cubrirán la mayor zona de conocimiento en el análisis.
2. Una vez determinados estos términos, mediante ellos, se deben descargar los archivos tipo WOS o RIS que incluyan registros de: abstract, títulos, y referencias citadas. Esto con el propósito de obtener los elementos de análisis, en donde cada registro descargado representa un artículo de citación y cada referencia citada en los artículos cuenta como artículo citado. La obtención de estos datos se realiza desde cualquier fuente de información o base de datos, mientras cumplan con los formatos especificados en el momento del análisis.
3. Citespace empieza por sustraer los términos de los abstracts, títulos, identificadores y descripciones de los artículos de citación sacados del nicho de datos obtenido por el investigador. Cada análisis se hará con un RIS a la vez, por ejemplo, el primer análisis se hará con respecto a *“Wearable Methodology”*, luego con *“Noise Reduction”*, de esa forma cada análisis retornará una red más amplia de clústers a analizar. Cabe resaltar que CiteSpace trabaja hasta con cuatro términos, por ejemplo, *“Wearable”* y *“Energy consumption design”* serían términos válidos. Estos serán conocidos como *“Front Terms”*, los cuales aumentan su importancia dependiendo en la frecuencia que se les encuentre.
4. En la zona de configuración de parámetros, es posible configurar el corte de años para el análisis, que será representado en la gráfica. Entre más corrido al lado derecho esté, más nuevo será; en caso de que el investigador no esté seguro del periodo en que están repartidos los registros descargados, CiteSpace otorgará un periodo de tiempo automáticamente después del primer análisis. Se recomienda usar este período si se quiere utilizar todos los documentos descargados, pero el investigador puede decidir hacer el análisis con un periodo anterior o superior al requerido.
5. En la selección de límites para CiteSpace, entre más bajo sean los límites puestos se verá una cantidad más grande de información analizada, pero la veracidad de esta información se verá puesta en duda, mientras que, un límite demasiado alto pasará datos relevantes. Estos límites vienen dados por número de citas, número de co-citas y coeficientes de co-citas. Para este caso los valores se dejan iguales a los valores ya asignados por CiteSpace.
6. Unión de redes (función opcional). Debido a que las redes obtenidas en el análisis pueden sobreponerse a otras, el programa utiliza una serie de algoritmos conocidos como *“Pathfinder network scaling”*, donde procesa múltiples redes, esto no afectará el resultado final pero puede variar en caso de que el investigador así lo considere necesario y escoja unir las redes.
7. Una vez obtenida la lista de redes con sus respectivos nodos, estos serán presentados en una gráfica interactiva a color, con fondo completamente negro, la cual debe ser analizada por el usuario. Se recomienda al usuario no realizar ninguna acción

en la herramienta mientras se esté procesando el análisis. Una vez finalizado el procesamiento, el cual puede tomar varios minutos dependiendo del procesamiento RAM que tenga al ejecutar, el fondo se pondrá blanco.

8. Con el fondo blanco, todas las funciones presentes de la interfaz serán utilizables. Se podrá modificar la vista, con cambios de tamaño ya sea del conjunto de redes en general, tamaño de nodos, tamaño de enlaces, además al presionar sobre cada uno de los nodos, dará una información del respectivo autor al cual se está buscando. Esta interfaz se ve determinada por el color, que determina el año en cual fue citado el artículo. Los conectores definen el primer año de co-citacion, en cada anillo se verá el nombre de la persona citada y el número de citaciones.
9. Finalmente, el investigador debe encargarse de la verificación de los puntos de pivote, ya sea consultando a expertos en el dominio o examinando la literatura presentada en estos. En caso de la exploración de la literatura, es posible ir más allá de los nodos utilizando la herramienta de clústers, permitiendo agrupar los artículos más relevantes de los registros descargados, los cuales definirán el estado del arte del tema. De aquí la importancia del paso 1.

El análisis realizado con esta herramienta, para el desarrollo de este trabajo, se encuentra en el Anexo Digital denominado *Análisis CiteSpace*.

## 2.4. ARTÍCULOS SELECCIONADOS

La Tabla 2.3 muestra las cadenas de búsqueda utilizadas en el análisis con CiteSpace, señalando sí los resultados obtenidos fueron empleados en la elaboración de la aproximación metodológica propuesta.

Cadena de Búsqueda	Aportes útiles
Lower Limb Wearable	Sí
Methodology for Wearable	No
Noise Reduction Sensor Data	Sí
Processing Wearable Data	No
Rigid Lower Body	Sí
Sensor Data	No
Wearable Design	Sí
Wearable Methodology	No
Wearable Lower Body	No

Tabla 2.3: Cadenas de búsqueda utilizadas para el análisis con Citespace. Fuente propia

Como se aprecia en la tabla anterior, no todas las cadenas de búsqueda proporcionaron artículos útiles para el objetivo del trabajo. La lista de documentos seleccionados para su utilización se presenta en la Tabla 2.4, junto con su respectiva cadena de búsqueda.

Cadena de búsqueda	Documentos seleccionados
<i>Lower Limb Wearable</i>	A Comparative Review of Footwear-Based Wearable Systems [32]
	A Systematic Approach to the Design of Distributed Wearable Systems [33]
	A review of wearable sensor systems for monitoring body movements of neonates [34]
	Assessing Physical Activity Using Wearable Monitors: Measures of Physical Activity [35]
	Automated design of a 13.56 MHz Corner-robust Efficient Differential Drive Rectifier for 10 $\mu$ A load [36]
	Fall Detection by Wearable Sensor and One-Class SVM Algorithm [37]
	Gait Based Directional Bias Detection of Four-Legged Walking Robots [38]
	Gait Partitioning Methods: A Systematic Review [39]
	Monitoring training activity during gait-related balance exercise in individuals with Parkinson's disease: a proof-of-concept-study [40]
	The Technology of Accelerometry-Based Activity Monitors: Current and Future [41]
	Wearable Medical Devices for Tele-Home Healthcare [42]
<i>Noise Reduction</i>	Data fusion of electrophysiological and haemodynamic signals for ventricular rhythm tracking [43]
	J2ME and smart phones as platform for a Bluetooth Body Area Network for Patient-telemonitoring [44]
<i>Rigid Lower Body</i>	A Model of the Lower Limb for Analysis of Human Movement [45]
<i>Wearable Design</i>	Assessment of Physical Activity Using Wearable Monitors: Recommendations for Monitor Calibration and Use in the Field [5]
	Calibration and Validation of Wearable Monitors [46]
	Design for Wearability [28]
	Heart Rate and Accelerometer Data Fusion for Activity Assessment of Rescuers during Emergency Interventions [47]
	Modeling Physical Activity Outcomes from Wearable Monitors [48]
	Motion Primitive-Based Human Activity Recognition Using a Bag-of-Features Approach [49]
	Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation [50]

Tabla 2.4: Documentos utilizados para el diseño de la aproximación metodológica en forma de resúmenes.  
Fuente propia

Estos documentos fueron analizados y sintetizados con el fin de obtener información relevante que contribuya a la construcción de la aproximación metodológica. A continuación se exponen estos aportes:

- En [33] se proponen diseños wearable basados en etapas o componentes de *vestibilidad, batería y funcionalidad*. Es uno de los principales artículos en los que se basa el desarrollo de la aproximación metodológica.
- La primera etapa, denominada *Funcionalidad*, es planteada como el diseño e implementación del hardware y software, o también llamados módulo primario y secundario en [47], del proyecto.
- De [48] se identifican los parámetros del problema que deben ser respondidos para iniciar el desarrollo de un proyecto wearable. Esto es planteado como la *definición de requisitos*.
- Para identificar el segmento de población a la cual va dirigido el producto wearable se hace uso de [40] y [44] donde se tratan características delimitadas como: edad, género, peso, etnicidad, discapacidad, entre otras. Esta información define la *población objetivo*.
- En [35] se describen actividades físicas que se pueden medir con sensores wearable, tales como el movimiento de extremidades, actividades motoras como caminar, trotar, correr, entre otras. Estas actividades constituyen lo que se denomina *tipo de actividad física*.
- La importancia de calibrar los sensores wearable para la realización eficaz de las pruebas se determina en [46]. Además, se plantea el uso de ventanas de tiempo o la duración del *epoch*.
- La sección de *revisión de vigilancia tecnológica* se basa en [34,37,39], donde realizan estudios de wearables con el fin de determinar los elementos a utilizar en el proyecto. Así mismo, en [32] se identifican algunos de los sensores más utilizados en este tipo de desarrollos.
- En el apartado del *preprocesamiento en el módulo secundario wearable* se sugieren métodos para mejorar la eficiencia en la recolección de datos del wearable, vistos en [44,47,52].

- Para el *procesamiento en el módulo primario wearable* se utiliza la información encontrada en [38, 39, 42, 43, 53, 54]. Estos documentos refieren la manera de tratar la información recogida en este módulo y el tipo de tareas que se pueden llevar a cabo para mejorar la señal antes de transformarla en variables esperadas.
- La transformación y obtención de datos es la sección donde se convierte la información procesada a *variables físicas esperadas*. También se definen las características físicas y estadísticas de una señal, como se detalla en [49].
- La segunda etapa, denominada *Batería*, y todas sus secciones se desarrollan con base en [36, 38, 50, 51]. En esta etapa se plantean opciones de batería del wearable, recomendaciones para su correcta elección. Al mismo tiempo, se realiza el cálculo del consumo de energía y su vida útil.
- Para la última etapa, llamada *Vestibilidad*, se presentan guías de portabilidad para el diseño de formas wearable. Estas se especifican en [28].

## 2.5. CONCLUSIONES

El empleo de herramientas software como Citespace para el análisis de las tendencias y patrones en la literatura científica, ha permitido identificar y organizar documentos relevantes acerca de temas de investigación de wearables dirigidos a las partes inferiores del cuerpo humano, logrando así la construcción de la aproximación metodológica propuesta en este trabajo.

Es necesario realizar una revisión manual de los documentos procedentes del análisis con Citespace, con el fin de identificar las bases del conocimiento científico buscada por el diseñador.

Por último, después del análisis de CiteSpace y la revisión manual, con los artículos recopilados se determina que la aproximación se debe basar en tres etapas denominadas Funcionalidad, Batería y Vestibilidad. En la etapa de Funcionalidad se define el diseño e implementación del hardware y software en el módulo primario y secundario wearable. Así mismo, en la etapa de Batería se determina la vida útil del dispositivo y se brindan opciones de batería apropiadas para un proyecto wearable. Finalmente, en la etapa de Vestibilidad se exponen guías de vestibilidad con el fin de diseñar una carcasa para el dispositivo que se ajuste apropiadamente al usuario.





### 3. CAPÍTULO III. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

La elaboración de la aproximación metodológica se basa en los documentos procedentes del análisis con CiteSpace. De esta manera, se realiza un estudio de cada uno de los artículos seleccionados extrayendo información puntual, expuesta en el capítulo anterior, acerca del diseño de dispositivos wearable. A continuación, se presenta la evolución del diagrama general el cual indica la secuencia de etapas a realizar en la aproximación. Así mismo, se exponen las actividades y resultados esperados de cada etapa.

#### 3.1. EVOLUCIÓN DEL DIAGRAMA GENERAL

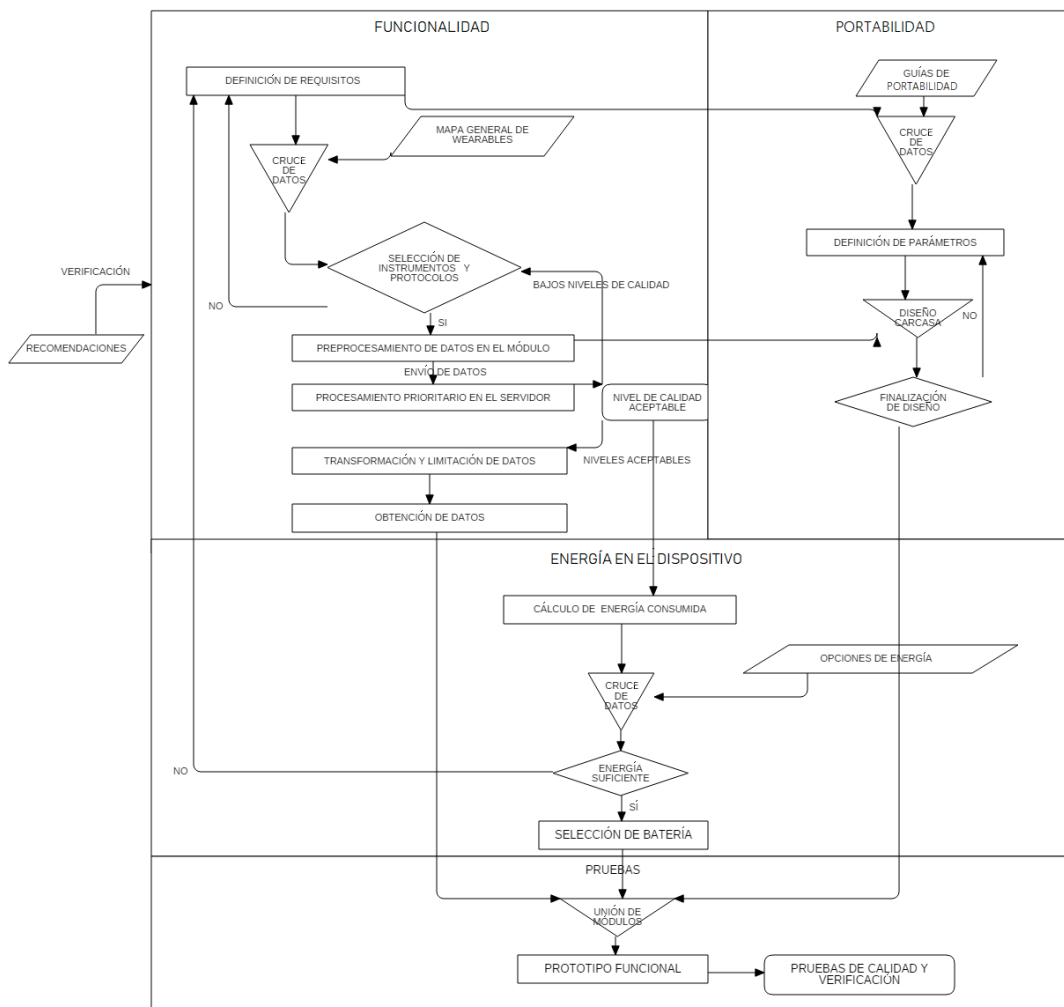


Figura 3.1: Primer diagrama general de la aproximación metodológica. Basada en la literatura

Inicialmente se plantean cuatro secciones denominadas: *Funcionalidad*, *Portabilidad*, *Energía en el Dispositivo* y *Pruebas*. Así mismo, se dispone de una sección de *Recomendaciones* con el fin de ser implementada en todas las fases de diseño, como se muestra en la Figura 3.1.

Con el fin de obtener una retroalimentación al trabajo, se realiza una exposición del diagrama inicial a estudiantes del programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, en proceso de trabajo de grado, donde al finalizar se cuenta con una fase de preguntas e interacción mutua. De esta manera se evidencia que las conexiones entre los componentes del diagrama son algo confusas y no es clara la forma de avanzar. Por tanto, se modifica el diagrama general para que la aproximación metodológica sea clara, concisa y logre una correcta comunicación de las ideas. Esta modificación se puede observar en la Figura 3.2, donde las conexiones entre componentes se hace mediante óvalos que representan módulos resultantes.

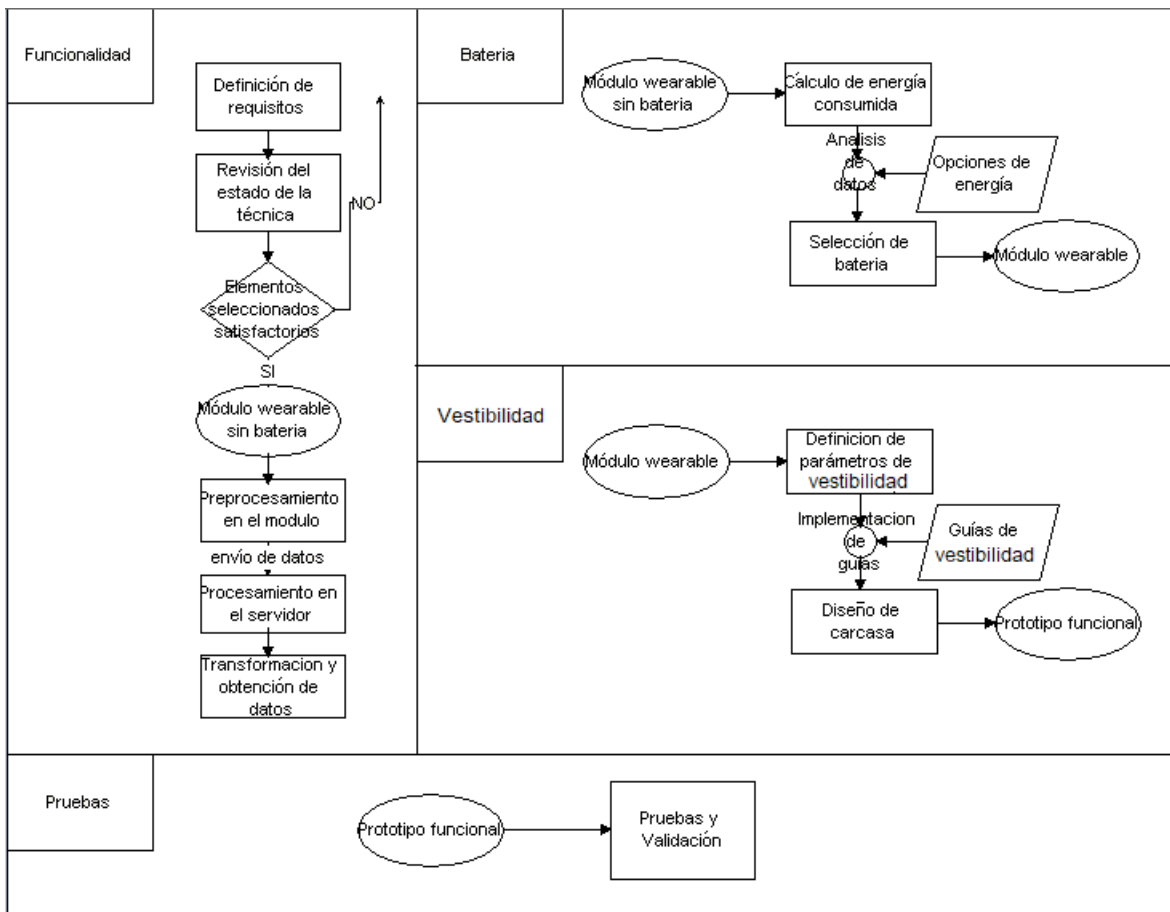


Figura 3.2: Segundo diagrama general de la aproximación metodológica. Basada en la literatura

Para lograr una comunicación efectiva entre módulos, se realizan algunos cambios incorporando el retiro de la fase de pruebas. Esto conlleva a definir de manera sencilla y ordenada el diagrama final de la aproximación metodológica, segmentándola en niveles de abstracción, así: un diagrama general nivel cero, tres diagramas nivel uno y un diagrama global nivel dos.

En el *diagrama general nivel cero*, se exponen las etapas que componen la aproximación ordenadamente, donde la primera etapa es la **Funcionalidad**, seguida por **Batería** y finalizando con **Vestibilidad** (Ver Figura 3.3).



Figura 3.3: Diagrama general nivel cero de la aproximación metodológica. Fuente propia

Las actividades a realizar en cada fase se detallan en los *diagramas nivel uno*. La Figura 3.4, Figura 3.5 y Figura 3.6 muestran los diagramas nivel uno de las etapas de Funcionalidad, Batería y Vestibilidad, respectivamente.

Ahora, el *diagrama global nivel dos*, encapsula los tres diagramas nivel uno conectados entre sí. De este modo, se observa que al resultado de la actividad F4, se le realiza el cálculo de energía consumida dispuesto en la actividad B1; y de B3, donde se obtiene el módulo secundario wearable con batería, se conecta con la actividad W2 para la definición de los parámetros en el diseño de la carcasa. Ver Figura 3.7.

Es importante destacar que estos cambios surgen de una segunda reunión ante los mismos estudiantes relacionados anteriormente, sugerencias del director y codirector del trabajo de grado.

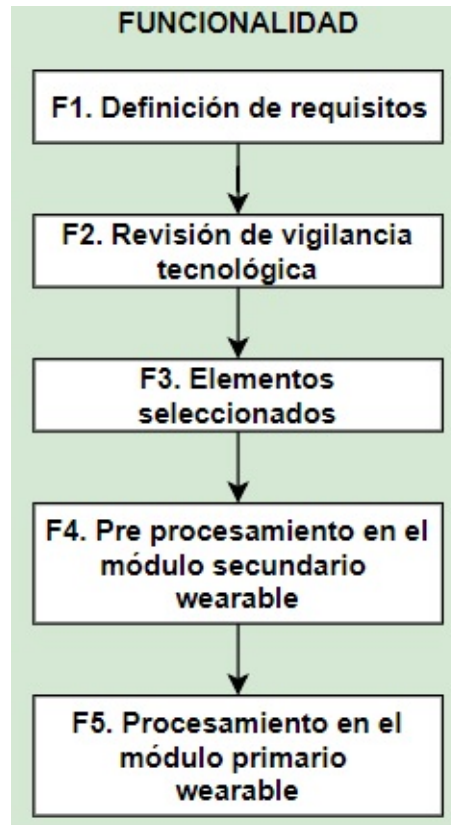


Figura 3.4: Diagrama nivel uno de la etapa de Funcionalidad. Fuente propia

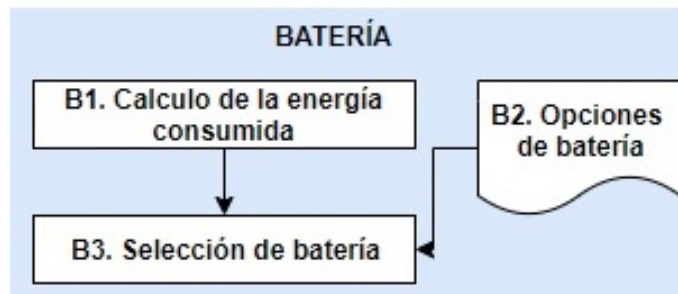


Figura 3.5: Diagrama nivel uno de la etapa de Batería. Fuente propia



Figura 3.6: Diagrama nivel uno de la etapa de Vestibilidad. Fuente propia

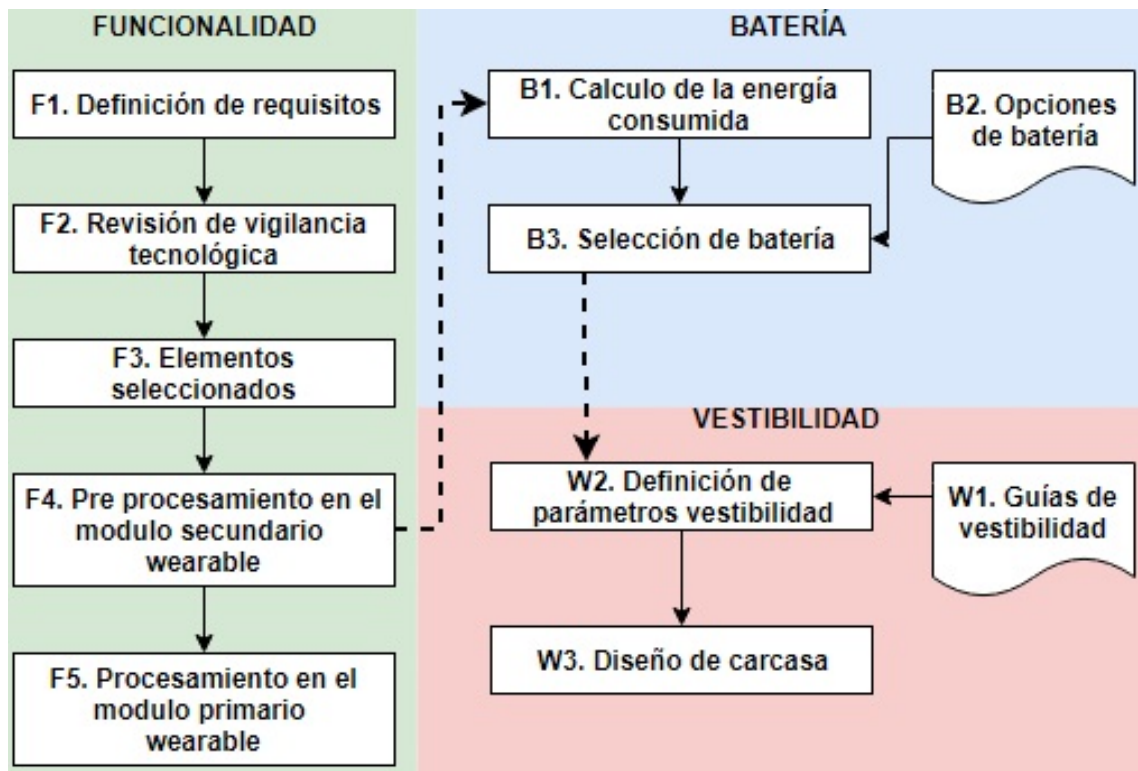


Figura 3.7: Diagrama global nivel dos de la aproximación metodológica. Fuente propia

## 3.2. ETAPA DE FUNCIONALIDAD

Es la etapa encargada de la definición del problema y el planteamiento de los requisitos para su solución. Brinda recomendaciones para la selección de herramientas y plantea el procesamiento de los datos dentro y fuera del dispositivo, con el fin de obtener los llamados módulo primario y módulo secundario wearable. A continuación, se describen cada una de las actividades de esta etapa, tal como se aprecian en la Figura 3.4.

### 3.2.1. Definición de Requisitos

En la definición de requisitos es fundamental identificar plenamente el problema para así especificar los parámetros de su solución. Para el desarrollo de esta actividad se toma como referencia el algoritmo para el desarrollo funcional de wearables [48], donde es preciso responder preguntas como: ¿A quién va dirigido el proyecto?, ¿Qué actividad física se va a estudiar?, ¿Qué se espera obtener de las señales físicas?, ¿Cuánto tiempo debe estudiarse la actividad?.

De esta manera, se define desde el comienzo y de la forma más clara y precisa posible, datos como: población de interés, tipo de actividad física<sup>1</sup>, salidas de variables de actividad física esperadas, duración de los epoch.

#### Población de Interés

Se determina de la forma más precisa posible el usuario objetivo de acuerdo a las necesidades propias del problema. Esta será el segmento de población a la cual irá dirigida la solución wearable a diseñar. Algunos datos básicos a identificar pueden ser edad, peso, estatura, género, limitaciones, entre otras. Sin embargo, estos datos los debe definir el diseñador teniendo en cuenta las características físicas de las personas objetivo, completando así la Tabla 3.1. De esta manera, si se desea evaluar el prototipo, los usuarios deben seguir el perfil especificado.

Población Objetivo	
Característica	Descripción

Tabla 3.1: Perfil de usuario objetivo. Fuente propia

---

<sup>1</sup>Se considera actividad física cualquier movimiento corporal producido por los músculos esqueléticos que exija gasto de energía [55].

## Tipo de Actividad Física

Existen diferentes parámetros de actividad física que pueden ser medidas mediante sensores wearable, como por ejemplo, movimiento de extremidades, actividades motoras (caminar, trotar, correr), niveles: sedentarios, ligeros, moderados y vigorosos de actividad física, número de pasos, velocidad, distancia [35].

Se deben determinar cuáles actividades físicas serán estudiadas y describirlas de forma clara completando la Tabla 3.2. Es importante aclarar que las actividades físicas a estudiar no se limitan a los ejemplos presentados anteriormente.

Actividades Físicas a Estudiar	
Tipo de actividad física	Descripción y/o Características

Tabla 3.2: Descripción de parámetros de actividades físicas a estudiar. Fuente propia

## Salidas de Variables de Actividad Física Esperadas

Las salidas esperadas son los resultados a los que se quiere llegar con el dispositivo wearable, en general, son los parámetros definidos por el usuario que se requieren para determinar la correcta solución al problema planteado. Éstas se pueden hacer de formas cualitativas o cuantitativas, ya sea con la generación de gráficas de comportamiento para determinar secuencias, o bien un análisis de señales entre poblaciones o diferentes períodos de evaluación.

Algunas de las características estadísticas de señales se presentan en la Tabla 3.3.

Característica Estadística	Descripción
Media	El componente DC (valor promedio) de la señal sobre la ventana.
Desviación Estándar	Medida de la extensión de la señal sobre la ventana.
Media Cuadrática	El valor medio cuadrático de la señal sobre la ventana.
Promedios Derivados	El valor medio de las derivadas de primer orden de la señal sobre la ventana.

Tasa Media de Cruce	El número total de veces que la señal cambia de debajo de la media a la media superior o viceversa, normalizada por la longitud de la ventana.
---------------------	--

Tabla 3.3: Características estadísticas de las señales.  
Fuente: Basada en [49]

Se dispone de la Tabla 3.4 para determinar las variables esperadas describiendo cada una de ellas.

Variables Esperadas de la Actividad Física	
Variable	Descripción y/o Características

Tabla 3.4: Descripción de las variables de actividad física esperadas. Fuente propia

### Duración del Epoch

El *epoch*<sup>2</sup> se usa para parametrizar el tiempo de toma de datos en las pruebas. La veracidad de los datos es cuestionable si se realiza una sola prueba, por eso se estudia varias veces en periodos de tiempo iguales la misma actividad física. En esta etapa se debe determinar cuánto tiempo va a durar cada experimento.

### 3.2.2. Revisión de Vigilancia Tecnológica

Una vez definidos los cuatro pasos anteriores es necesaria una investigación de la tecnología actual para el desarrollo de aplicaciones wearables [34] utilizando comandos de búsqueda relacionados con los requisitos previamente definidos en la actividad F1. Para esto se hace uso de bases de datos como Vandrico [56] y Wearable Technologies [57], las cuales tienen información registrada de cientos de wearable de diferentes compañías. Además de Schimmer [58], una compañía pionera en tecnología y soluciones wearable que desarrolla y fabrica sensores portátiles y aplicaciones de detección innovadoras.

La Tabla 3.5 contiene una revisión de los dispositivos que fueron considerados en un principio en el trabajo. Además, esta lista sirve de apoyo para la selección de herramientas y/o compra de un dispositivo inicial para el diseño del wearable requerido.

---

<sup>2</sup>Epoch: período de tiempo.



Nombre del dispositivo	Descripción	Características
<i>Kinematix Tune</i>	Monitorea el comportamiento al correr de los pies a través de los sensores, análisis de la simetría de los pies con respecto al tiempo de contacto con el suelo. Combina información de los pies con parámetros GPS: Velocidad, distancia y mapas. Ajusta a cualquier zapatilla.	Sensor de presión Acelerómetro Bluetooth Batería recargable
<i>Digitsole Smartshoe</i>	Zapato inteligente que se puede controlar con el teléfono inteligente. Cuenta con función de autoenlazado, ajuste de la temperatura del zapato, y cuentapasos. Los datos pueden ser transmitidos a su teléfono para ser analizados.	Podómetro Bluetooth Batería recargable
<i>Adidas Micoach Speed Cell</i>	Uso en el zapato. Recoge datos de rendimiento y se utiliza en conjunto con la aplicación miCoach multideporte para ayudar a los jugadores en su entrenamiento. Puede recopilar datos como velocidad máxima, de ráfaga, distancia total y tiempo de ejercicio. Diseñado para deportes como fútbol, tenis, baloncesto, rugby, balonmano y fútbol americano.	Acelerómetro Bluetooth Batería recargable Almacenamiento en memoria de hasta 8 horas
<i>Surrosense Rx System</i>	Ayuda a prevenir las úlceras en los pies al recolectar datos de presión. Retroalimentación en tiempo real, además los sensores en el zapato transmiten de forma inalámbrica los datos al reloj inteligente.	Sensor de presión Fuente externa ANT+ USB WiFi
<i>Lechal Shoe</i>	Zapato que puede navegar mediante la vibración. Puede ser reemplazado por cualquier otro calzado porque el propio dispositivo es una plantilla habilitada para Bluetooth. Utiliza un revestimiento anti-bacteriano y poliuretano de alta calidad. Además, el zapato Lechal tiene múltiples funciones de fitness que permiten al usuario contar los pasos y seguir las calorías quemadas.	Vibrador Bluetooth Batería recargable
<i>Geopalz Ibitz</i>	Este dispositivo puede mejorar la salud, si se utiliza en el lugar de trabajo y fuera de él. Las personas pueden ser más conscientes de su nivel de ejercicio y mejorar su salud física y mental. Geopalz Ibitz puede aumentar el potencial de productividad ya que puede mejorar el rendimiento en el trabajo a los trabajadores más sanos y felices.	Acelerómetro Bluetooth Batería desechable

<i>Owlet Baby Monitor</i>	Dispositivo diseñado para bebés. Mide ritmo cardíaco, oxígeno, temperatura de la piel y la calidad del sueño.	Monitor de ritmo cardíaco Oxímetro Batería recargable Bluetooth
<i>Catapult OptimEye S5</i>	Mide de manera precisa cada posible parámetro del atleta. Es un algoritmo científico que elimina los errores inherentes de los sensores de inercia. Ofrece información precisa y validada de las aceleraciones, desaceleraciones, cambios de dirección y saltos (altura y frecuencia).	Acelerómetro Magnetómetro Giroscopio GPS Monitor de ritmo cardíaco Batería recargable Bluetooth
<i>Amiigo Fitness Band</i>	Sistema inteligente de dos piezas portátiles fabricado con una pulsera y un clip para zapatos. Funciona como monitor de la aptitud y del sueño, evaluando la temperatura del cuerpo, la frecuencia cardíaca y registrando la actividad física (tipo de actividad y calorías quemadas). Utiliza una aplicación de smartphone para calcular los datos y realizar un seguimiento del rendimiento.	Batería recargable Memoria de 0.5Gb Acelerómetro Sensor de luz y temperatura Resistencia al agua Transmisión inalámbrica USB Software libre
<i>3L Labs Footlogger</i>	Rastrea la aptitud para detectar problemas de salud temprano, y registra la actividad diaria. Se colocan en el zapato del usuario 8 sensores acoplados a 1 acelerómetro que ayudan a identificar y registrar hábitos de ejercicio. Puede utilizarse para entrenamiento de atletas, entrenamientos diarios regulares y rehabilitación	Sensor de presión Acelerómetro 3 ejes Batería recargable Bluetooth Se pueden agregar sensores
<i>Moticon OpenGo Science</i>	Mide la presión de la planta del pie para el análisis de movimiento. Estas plantillas de sensores inalámbricos se utilizan principalmente en la ciencia del deporte y la investigación clínica, especialmente para fines de formación y rehabilitación. Trabaja con software de gestión de datos que registra y analiza las mediciones	Sensor de presión Acelerómetro ANT+ Batería recargable

<i>Geneactiv</i>	Mide objetivamente las actividades físicas y las frecuencias de movimiento dentro de las poblaciones de vida libre y la investigación clínica. Es capaz de recolectar datos crudos máximos, mientras que avanza las herramientas abiertas del análisis para facilitar la evaluación y la salida de datos de primera clase. Ha sido probado en estudios a pequeña escala como a gran escala, con más de 10000 sujetos.	Batería recargable Memoria de 0.5Gb Acelerómetro Sensor de luz y temperatura Resistencia al agua Transmisión inalámbrica USB Software libre
<i>Boogio</i>	Es un dispositivo que se usa en los pies, viene en par para ser utilizado en los dos pies. Incluye un open wearable platform, combina sensores de presión, acelerómetros 3D. Calcula presión, balance, aceleración 3D, gravitational force, en tiempo real.	Acelerómetro Giroscopio Magnetómetro Sensor de presión Batería recargable Bluetooth Smart SDK
<i>Sensoria</i>	Dispositivo usable en forma de medias, con agarrador de tobillo, posee acelerómetro 3D. Además, posee 3 sensores textiles bajo la planta de los pies para detectar la presión del pie.	Acelerómetro Sensor de presión Sensor de ritmo cardíaco Bluetooth Smart

Tabla 3.5: Resultados de la revisión de vigilancia tecnológica. Fuente: Vandrico y Wearable Technologies

### 3.2.3. Elementos Seleccionados

Una vez identificado el problema del proyecto y las posibles herramientas que permitirían su solución, se procede a la actividad de selección de instrumentos. En ella se consideran sensores, mecanismos de comunicación, métodos de carga, topologías de distribución y/o inclusive dispositivos que existen en el mercado, que cumplan con las características deseadas del trabajo.

Se debe percatar si estas herramientas cumplen con los requisitos establecidos, sino es así, se recomienda el replanteamiento de la fase *Definición de Requisitos* o el cambio de los instrumentos. Por tanto, es oportuno diligenciar la Tabla 3.6 con las tecnologías seleccionadas para el desarrollo del dispositivo con su respectiva justificación de uso.

Herramientas Seleccionadas	
Tecnología	Razón / Justificación

Tabla 3.6: Herramientas seleccionadas para el desarrollo del proyecto. Fuente propia

### 3.2.4. Preprocesamiento en el Módulo Secundario Wearable

Actividad donde se realiza el desarrollo tanto hardware como software del dispositivo wearable. Este módulo requiere una mínima carga computacional entre lo que se encuentra: muestreo de datos, filtraje, codificación, envío de información, cantidad de módulos a utilizar, entre otros. Es importante resaltar que entre más procesos se ejecuten en esta fase, menor será la carga al dispositivo central. De esta manera, al terminar se obtiene la instrumentaría wearable para captar los datos de las actividades físicas a estudiar.

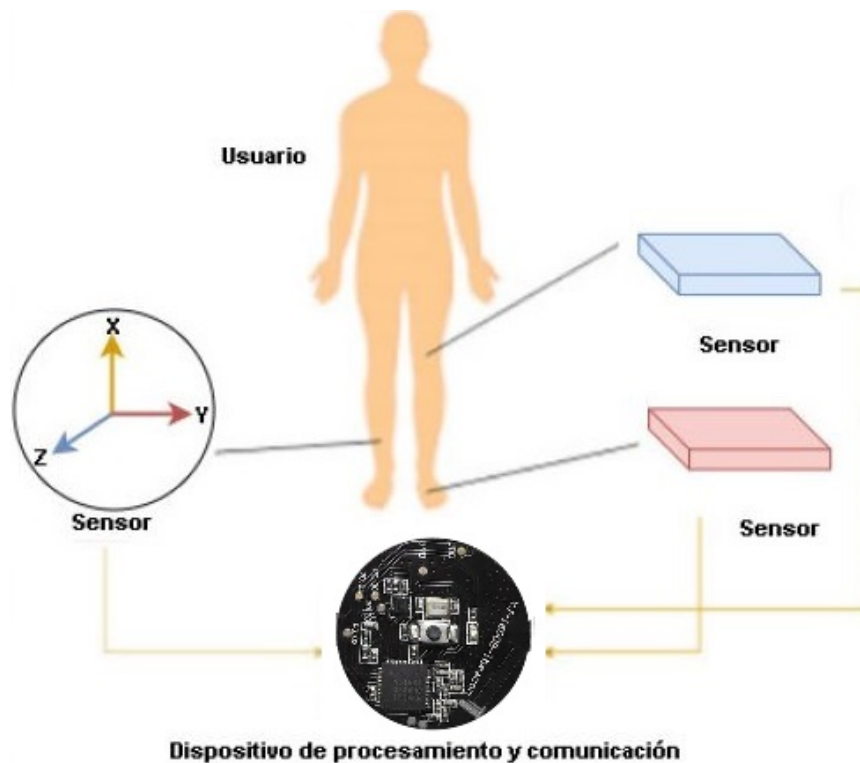


Figura 3.8: Ejemplo del módulo secundario wearable. Fuente propia

La Figura 3.8 muestra un ejemplo de módulo secundario wearable donde se implementan sistemas de comunicación, sensores y mecanismos de procesamiento necesarios para transferir información recolectada del mundo físico al módulo primario. A este módulo se

realiza el análisis de consumo de energía y diseño de portabilidad, en las etapas posteriores. De igual forma, si lo requiere el diseñador, es posible crear el wearable únicamente con el módulo secundario con todo el procesamiento de carga en éste.

### 3.2.5. Procesamiento en el Módulo Primario Wearable

En esta sección se realiza el desarrollo del módulo encargado de transformar los datos recolectados del módulo secundario wearable en las variables físicas esperadas mediante la aplicación de filtros para la limpieza de la señal, el cálculo de las características probabilísticas o físicas para la descripción de la actividad estudiada, fusión de datos, validación de la información, manejo y almacenamiento de datos. Todas las salidas de las variables de la actividad física esperada son programadas en este paso.

Como resultado de esta actividad se genera el módulo primario wearable, representado en la Figura 3.9, donde se realiza la lógica necesaria para mejorar la calidad de las señales y transformar los datos en variables físicas esperadas. Este módulo debe poseer una alta capacidad de procesamiento y potencia disponible, debido a que la carga computacional es más alta que la del módulo secundario. Dentro de este módulo se encuentran los dispositivos móviles, tabletas, computadores, tarjetas inteligentes o kits de desarrollo.



Figura 3.9: Tipos de módulo primario wearable. Fuente propia

### 3.3. ETAPA DE BATERÍA

En esta etapa se determina el consumo de energía del dispositivo wearable, se brindan opciones de baterías teniendo en cuenta factores como el tamaño y durabilidad, para que finalmente el diseñador realice la selección de la batería adecuada para el objetivo del proyecto.

#### 3.3.1. Cálculo de Energía Consumida

La vida útil de los dispositivos wearable es una de las principales características encontradas en la bibliometría, donde se trata de maximizar el tiempo de operatividad. Por tanto, es indispensable determinar el consumo de energía total. Esto puede hallarse en la hoja de datos (datasheet) del fabricante de cada componente que hace parte del módulo secundario wearable. Así mismo, en [59] se analizan aspectos específicos para optimizar el consumo de corriente de la mejor manera. Sin embargo, existen productos capaces de medir en tiempo real, el consumo de energía de diferentes dispositivos durante largos períodos de tiempo.

#### 3.3.2. Opciones de Energía

Dependiendo de las necesidades del proyecto como el consumo de energía total, la batería del dispositivo debe considerar aspectos como: capacidad de voltaje nominal, tamaño y portabilidad. A continuación, se listan tres tipos distintos de batería apropiadas para wearables:

- **Batería tipo botón:** baterías no recargables de mayor uso, de fácil manejo y extremadamente portables [60]. El nombre se refiere a la similitud con un botón y de hecho es una batería con sólo una celda. Se utilizan en muchos dispositivos electrónicos portátiles. Su tamaño y composición es variada, la opción más interesante y ecológica son las pilas de botón de litio, que no contienen elementos contaminantes como el mercurio o el cadmio.
- **Batería Multipack:** baterías recargables de portabilidad media y menor uso. Estas baterías pueden ofrecer beneficios económicos y ambientales en comparación con las pilas desechables [61, 62]. Algunos tipos de baterías recargables están disponibles en los mismos tamaños que los tipos desechables. Aunque las recargables tienen un mayor costo inicial, pueden ser recargadas muchas veces.
- **Batería de Litio:** también conocida como batería *Li-Ion*. Es recargable, de alta durabilidad y uso medio [62]. Es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible. La mayoría son livianas con gran capacidad energética y resistencia a la descarga.

### 3.3.3. Selección de Batería

El tipo de batería no afecta el consumo de corriente del módulo secundario, pero es crucial para el problema a solucionar. En este punto se determina la batería apta para ser utilizada en el proyecto, dentro de las opciones planteadas anteriormente. Una vez seleccionada, se completa la información de la Tabla 3.7 con el fin de determinar las variables y el resultado de la Ecuación 3.1. Esta información se puede hallar en el datasheet de la batería a utilizar.

<b>Batería Seleccionada</b>	
Tipo de batería	
Voltaje nominal	
Capacidad nominal	

Tabla 3.7: Especificaciones de la batería seleccionada. Fuente propia

Ahora, con el consumo de energía del wearable y el tipo de batería a utilizar, es importante establecer el tiempo de vida del dispositivo en horas utilizando la Ecuación 3.1.

$$\frac{C_b}{C_p} = T_h \quad (3.1)$$

donde,  $C_b$ : Capacidad nominal de la Batería en miliAmperios-Hora (mAh),  
 $C_p$ : Consumo de Corriente Promedio del wearable en miliAmperios (mA) y  
 $T_h$ : Tiempo de vida de la batería en Horas (H).

## 3.4. ETAPA DE VESTIBILIDAD

Esta etapa denominada Vestibilidad<sup>3</sup>, plantea el diseño de la carcasa del dispositivo con base en pautas con el fin de obtener una pieza que se ajuste correctamente al usuario, sea cómoda y resistente.

### 3.4.1. Definición de Parámetros de Vestibilidad

Los parámetros de vestibilidad giran en torno a aspectos físicos y la relación activa con el cuerpo humano (estudiados a base de vestimenta, usabilidad protectora y otros dispositivos wearables estudiando su forma y sus dinámicas). Para definir estos parámetros, como se dijo anteriormente, se hace uso de guías de vestibilidad definidas en [28], las cuales se sintetizan a continuación:

---

<sup>3</sup>Vestibilidad o *Wearability* es una expresión que significa el estado o condición de estar cómodamente.

## Guías de Vestibilidad

Las guías plantean todas las variables que afectan el diseño del dispositivo, empezando por la localización no intrusiva asegurando una mejor integración entre el dispositivo y el usuario. Esto permite que los movimientos estudiados no se vean afectados por una incorrecta colocación del wearable en el cuerpo. A continuación se explican cada una de estas guías:

1. **Posición:** indica los lugares favorables para la ubicación del dispositivo en áreas no intrusivas [28]. Los lugares más comunes para colocar un wearable en las zonas inferiores del cuerpo humano se aprecian en la Figura 3.10.

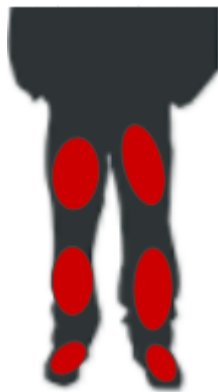


Figura 3.10: Áreas comunes para posicionar el wearable

2. **Lenguaje de forma:** trata la forma del cuerpo humano dentro del diseño de la carcasa [28]. Por ejemplo, una vez posicionado el wearable se debe diseñar la base de la carcasa de manera cóncava, con superficies planas, con filos redondeados de tal manera que se adapte al usuario. Esto con el fin de asegurar la inserción cómoda y estable del producto, logrando que la presión sobre la pierna sea mínima. Ver Figura 3.11.
3. **Movimiento humano:** tiene en cuenta los movimientos naturales del cuerpo humano. Lo importante es no restringir el movimiento humano estudiado, el uso de materiales adecuados es necesario para que la invasión en el usuario sea mínima y se pueda ejecutar la actividad con total libertad [28]. En la Figura 3.12, se observa un usuario con un wearable representado por la cinta roja el cual no tiene ninguna obstrucción para realizar diferentes movimientos.
4. **Percepción humana:** la percepción del objeto que tenga el usuario sobre cualquier elemento ajeno a su cuerpo debe ser mínima, esto con el fin de hacerlo parte del cuerpo [28]. Se recomienda que el dispositivo wearable no sobresalga por más de 12.8 cm del espacio personal.



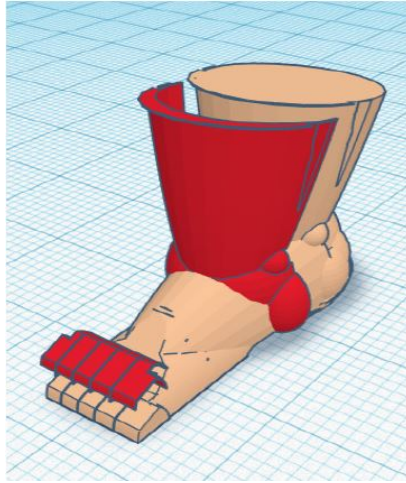


Figura 3.11: Ejemplo de la guía forma de lenguaje correcto



Figura 3.12: Movimiento humano sin restricción por el uso de wearables

5. **Tamaño:** indica que el dispositivo pueda ser utilizable por la mayor cantidad de usuarios posibles, teniendo en cuenta la variedad de ellos considerando aspectos como peso y altura [28].
6. **Acceso cómodo:** plantea la manera en que se debe unir al usuario con el objeto [28]. Es de alta importancia y se logra de forma básica diseñando productos simples como bandas o clips.

Se recomienda llenar la Tabla 3.8 con cada una de las guías de vestibilidad a ser utilizadas.

Guía de vestibilidad	Definición de uso
Posición	
Lenguaje de forma	
Movimiento humano	
Percepción humana	
Tamaño	
Acceso cómodo	

Tabla 3.8: Parámetros seleccionados a partir de las guías de vestibilidad para el diseño de la carcasa. Adaptada de [28]

### 3.4.2. Diseño de Carcasa

La carcasa son pequeñas piezas, generalmente rígidas, resistentes que le ofrecen soporte, protección y seguridad al dispositivo. Para diseñar la carcasa es necesario el uso de herramientas 3D como *TinkerCad*. Se debe hacer pensando en el usuario y evitando al máximo interferir con el movimiento físico estudiado. En este punto se deja abierta la posibilidad al diseñador el uso de cualquier otro software CAD para el diseño y una posterior impresión 3D de la carcasa.

## 3.5. ENTREGABLES DE CADA ACTIVIDAD

En esta sección se presenta un resumen con la descripción de los artefactos resultantes de las actividades descritas en la aproximación metodológica. Ver Tabla 3.9.

Actividad	Entregable
Población de interés	Tabla 3.1 con la descripción del perfil de usuario objetivo.
Tipo de actividad física	Tabla 3.2 de actividades físicas a estudiar con sus respectivas características.

Salidas de variables de actividad física esperadas	Tabla 3.4 con las variables que se espera obtener del prototipo, como datos, gráficas, documentos.
Duración del epoch	Selección del tiempo que dura el epoch.
Revisión de vigilancia tecnológica	Gráficas, listas y/o tablas de los dispositivos wearable que brinden soluciones similares al problema en cuestión.
Elementos seleccionados	Tabla 3.6 con las tecnologías seleccionadas y su respectiva justificación.
Preprocesamiento en el módulo secundario wearable	Módulo secundario wearable y su documentación.
Procesamiento en el módulo primario wearable	Módulo primario wearable y su documentación.
Cálculo de energía consumida	Consumo de corriente promedio del dispositivo secundario wearable.
Selección de batería	Tabla 3.7 con información de la batería seleccionada para el wearable y con esto calcular la vida útil del dispositivo con batería.
Definición de parámetros de vestibilidad y diseño de carcasa	Tabla 3.8 con la definición puntual de cada una de las guías de vestibilidad propuestas y el resultado de éstas en el diseño de la carcasa.

Tabla 3.9: Lista de entregables de cada actividad de la aproximación metodológica. Fuente propia

### 3.6. CONCLUSIONES

A través de los resultados del análisis bibliométrico realizado se elabora una aproximación metodológica para el desarrollo de soluciones basadas en wearables enfocado en las partes inferiores del cuerpo humano, dividida en tres etapas conocidas como Funcionalidad, Batería y Vestibilidad, detallando su operatividad mediante diagramas con niveles de abstracción cero, uno y dos.

En la etapa de Funcionalidad se plantean los requisitos necesarios para darle solución al problema definido. Así mismo, brinda recomendaciones para la selección de herramientas para así obtener módulos funcionales wearable. Ahora, en la etapa de Batería se determina el consumo de corriente del módulo secundario wearable, se ofrecen opciones de batería y se selecciona la adecuada para el proyecto. Finalmente, en la etapa de Vestibilidad se comparten guías para una correcta construcción de la carcasa del wearable pensada en la comodidad del usuario.

Cada etapa de la aproximación metodológica propuesta contiene actividades las cuales definen artefactos entregables con el fin de lograr un producto wearable funcional.



## 4. CAPÍTULO IV. PROTOTIPO FUNCIONAL OBTENIDO DE LA APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

En este capítulo se exponen los resultados y las conclusiones alcanzadas llevando a cabo cada una de las etapas y actividades dispuestas en la aproximación metodológica para el desarrollo de un prototipo wearable propuesto en este trabajo.

### 4.1. FUNCIONALIDAD

Es la etapa inicial a desarrollar de la aproximación que tiene como objetivo implementar el ámbito lógico y físico del dispositivo wearable de acuerdo con los requerimientos planteados en ella. A continuación se detallan los resultados de cada actividad dispuesta en esta etapa, éstas se pueden observar de nuevo en la Figura 3.4.

#### 4.1.1. Definición de Requisitos

Es la actividad F1 donde se identifica el problema y los parámetros de su solución. Por tanto, se observa en el mundo que, a raíz de la popularidad adquirida en diversas culturas del baile de salsa [15], las personas se interesan en aprenderlo pero no tienen una forma de hacerlo sin recurrir a profesionales y clases en vivo. De esta manera, se desea capturar los datos generados en el movimiento de las piernas de profesionales de baile de salsa a través de un dispositivo wearable para su posterior análisis y utilización.

#### Población Objetivo

El perfil de la población objetivo del proyecto está dirigido a instructores de baile jóvenes, saludables y sin limitaciones de lenguaje ni género. Se selecciona esta población con el objetivo de encontrar usuarios para realizar pruebas más adelante. Las demás características se presentan en la Tabla 4.1.

<b>Población Objetivo</b>	
Edad	Entre 18 y 25 años
Peso	Entre 50 y 80 kg
Estatura	Entre 150 y 190 cm
Profesión	Instructores de baile de salsa
Limitaciones	Ninguna
Lenguaje	No aplica
Nacionalidad	No aplica
Sexo	Femenino o Masculino

Tabla 4.1: Perfil de usuario objetivo del proyecto prototipo wearable

## Tipo de Actividad Física

La actividad física a estudiar son los pasos de baile de salsa, para ello es importante la definición de parámetros para capturar lo fundamental del movimiento. La Tabla 4.2 señala el nombre de la actividad y sus características distinguiendo el nivel de dificultad y la velocidad (tiempo musical) en BPM<sup>1</sup> en la que se realiza el paso. Estas actividades físicas se definen al consultar con los instructores de baile, donde recomiendan como pasos de baile primordiales para un bailarín de salsa, los movimientos básicos que se aprecian en la tabla.

Actividades Físicas a Estudiar	
Tipo de actividad física	Descripción y/o Características
<i>Paso Adelante-atrás</i>	Movimiento básico
	96 BPM
<i>Paso Lateral</i>	Movimiento básico
	96 BPM
<i>Paso Atrás-atrás</i>	Movimiento básico
	96 BPM

Tabla 4.2: Descripción de las actividades físicas a estudiar del proyecto prototipo wearable

## Salidas de Variables de Actividad Física Esperadas

Las variables que se esperan alcanzar de las actividades físicas descritas se aprecian en la Tabla 4.3. Estas se definen claramente con el propósito de realizar una búsqueda y encontrar el dispositivo/sensor idóneo para la captura de estos datos.

Variables Esperadas de la Actividad Física	
Variable	Descripción y/o Características
<i>Magnitud de aceleración</i>	Magnitud de la señal de aceleración para cada uno de los movimientos definidos.
<i>Gráficas</i>	Representación visual del comportamiento de las señales obtenidas.
<i>Archivos de almacenamiento</i>	Documentos con los datos puros y/o filtrados capturados por el dispositivo.
<i>Media</i>	Valor probabilístico presente en toda señal que describe su valor DC o verdadero.

<sup>1</sup>Las pulsaciones por minuto o BPM (*Beats per minute*) es una unidad empleada para medir el ritmo en música. Equivale al número de pulsaciones que caben en un minuto.

<i>Desviación Estándar</i>	Valor probabilístico presente en toda señal que describe su valor AC o la varianza con respecto al verdadero valor.
----------------------------	---

Tabla 4.3: Variables de actividad física esperadas del proyecto prototipo wearable

### Duración del Epoch

Los experimentos realizados de la actividad física (pasos de baile) tienen una duración de un minuto. Durante ese lapso el profesional realiza el paso repetidamente hasta su finalización. Este periodo es consignado y almacenado como muestra de registro.

### 4.1.2. Revisión de Vigilancia Tecnológica

En la actividad F2, se realiza la revisión de las bases de datos de Vandrico y Wearable Technologies utilizando comandos de búsqueda relacionados con la información descrita en la actividad F1. De esta exploración se encuentran 14 dispositivos similares identificando el tipo de sensor, batería y tecnología de comunicación que utilizan, dando como resultado la Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3. Estos resultados contribuyen a la selección del dispositivo para la construcción del prototipo wearable.

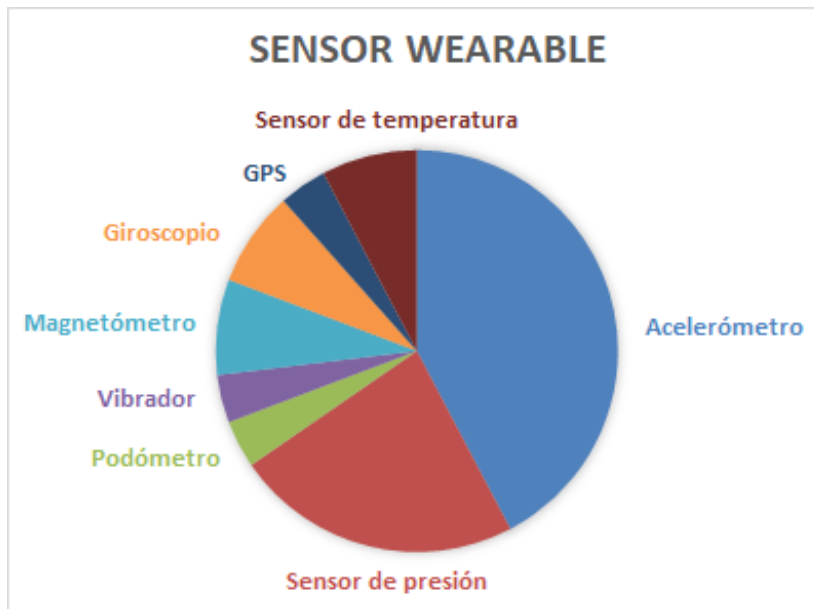


Figura 4.1: Sensores utilizados en dispositivos wearable extraídos de la revisión de vigilancia tecnológica

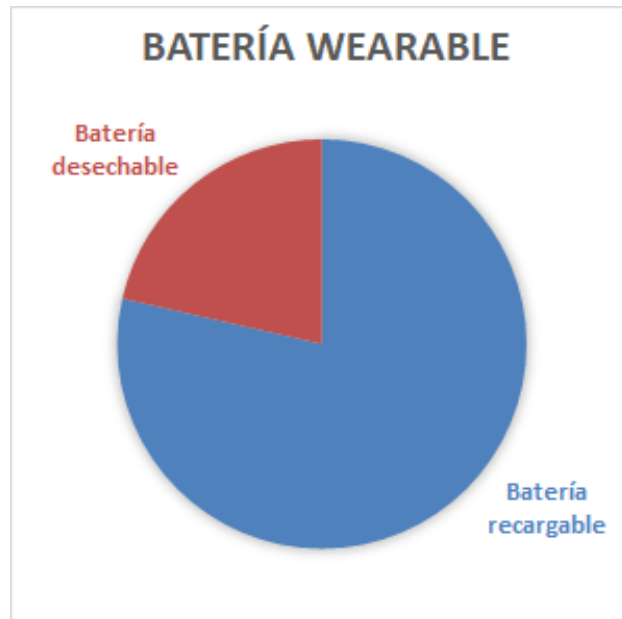


Figura 4.2: Tipos de batería utilizados en dispositivos wearable extraídos de la revisión de vigilancia tecnológica



Figura 4.3: Tecnologías de comunicación utilizadas en dispositivos wearable extraídos de la revisión de vigilancia tecnológica



### 4.1.3. Elementos Seleccionados

Esta sección, actividad F3, define los elementos escogidos para la elaboración del proyecto prototipo wearable. Ver Tabla 4.4.

Herramientas Seleccionadas	
Tecnología	Razón / Justificación
<i>Acelerómetro</i>	Como se observa en la Figura 4.1, el acelerómetro es una constante en casi todos los productos dedicados al estudio de movimientos en las piernas.
<i>Bluetooth 4.0 BLE</i>	La tecnología Bluetooth no solo es dominante en la Figura 4.3, sino que su versión 4.0, es decir BLE, ofrece funcionalidades que minimizan el consumo de corriente y con ello incrementan la vida útil del dispositivo.
<i>Batería tipo moneda</i>	A pesar de no ser la opción de mayor proporción en la Figura 4.2, las ventajas de la batería tipo moneda son su compatibilidad con la tecnología de comunicación BLE. Además de estar predeterminada por el dispositivo seleccionado como módulo secundario wearable, el cual se detalla en el siguiente apartado.

Tabla 4.4: Herramientas seleccionadas para el desarrollo del proyecto prototipo wearable

### 4.1.4. Preprocesamiento en el Módulo Secundario Wearable

La actividad F4 tiene por objetivo describir el módulo secundario wearable junto con sus sensores y características propias del dispositivo. Es la unidad de procesamiento encargada de la recolección, codificación y envío de datos, por lo tanto, debe estar equipada de componentes aptos para la obtención de datos de movimiento (acelerómetro), tecnologías de comunicación inalámbrica (BLE), conexión con periféricos externos, batería desechable (tipo moneda). Además debe tener una avanzada circuitería, un mínimo nivel de procesamiento y pequeño tamaño para lograr una mejora en la experiencia del usuario y ser considerado como un dispositivo wearable.

Siendo así, el módulo a implementar trabaja como mecanismo de muestreo de datos a 50 Hz con un tiempo de envío de 60 ms. Se escoge esta frecuencia debido al *Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon* [63] la cual dice que para la reconstrucción exacta de una señal periódica continua, a partir de sus muestras, la tasa de muestreo debe ser, al menos, el doble de su ancho de banda. Por tanto, debido a que las frecuencias de movimiento del cuerpo humano llegan hasta los 25 Hz en las manos y una frecuencia menor en el resto del cuerpo, se establece en 50 Hz, la frecuencia de muestreo.

Por otro lado, el envío se realiza a 60 ms a raíz de que, el acelerómetro está capturando muestras cada 20 ms (50 Hz) de sus tres ejes X, Y y Z, donde cada valor del eje ocupa

2 bytes, es decir, 6 bytes en total. Pero como se sabe de la teoría de comunicación BLE que la carga de los datos de atributo es de máximo 20 bytes, se capturan tres muestras en total de cada eje antes de realizar el envío correspondiente, es decir, 60 ms. De esta manera, el paquete se envía con 18 bytes cada que realiza una transacción. Para ilustrar el manejo de estos bytes dentro del paquete, ver Figura 4.4.

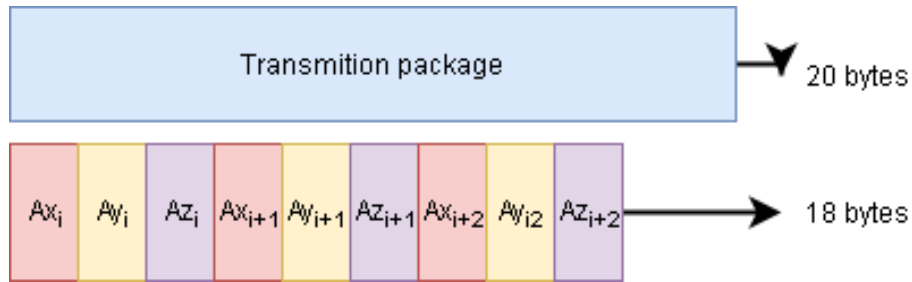


Figura 4.4: Composición del paquete de envío en BLE con datos de aceleración

### Dispositivo YJ-16009-NRF51822

De acuerdo con la revisión de vigilancia tecnológica realizada, se determina que el dispositivo que se adapta a las especificaciones planteadas para este proyecto y contiene las herramientas tecnológicas seleccionadas en actividades anteriores, es el *YJ-16009-NRF51822* [64], ver Figura 4.5, con un precio de USD \$16.50 por dos unidades, debido a que es un módulo a nivel de placa que integra el chip *nRF51822* de Nordic Semiconductor, soporta BLE, sensor de aceleración LIS2DH12, sensor de temperatura, generador de números aleatorios, protocolos de comunicación I2C, SPI, entre otras características.

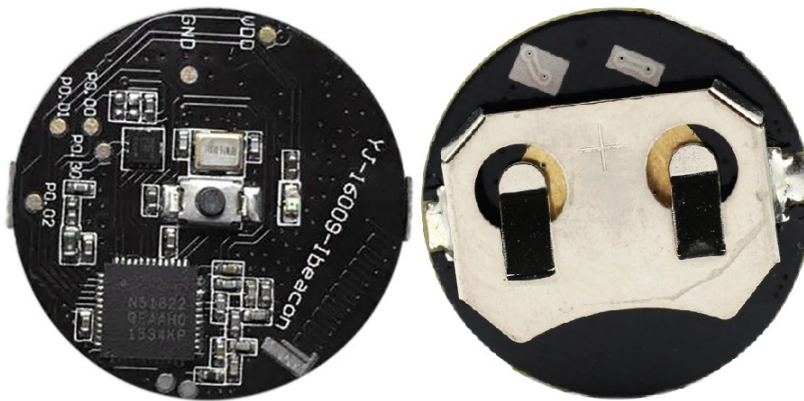


Figura 4.5: Dispositivo YJ-16009-NRF51822 seleccionado como módulo secundario wearable

Construido con base en el chip NRF51822, un SoC (System on Chip) multiprotocolo potente y altamente flexible, diseñado idealmente para aplicaciones inalámbricas Bluetooth Low Energy. Incorpora el último transceptor de radio de Nordic, con el mejor rendimiento en su clase. Integra una CPU ARM Cortex M0 de 32 bits CPU. La densidad del código y la velocidad de ejecución son considerablemente mayores que para las plataformas de 8/16 bits. Cuenta con el sistema de Interconexión Periférica Programable (PPI) que proporciona un bus de 16 canales para comunicación periférica directa y autónoma del sistema sin intervención de la CPU. Esto brinda beneficios de ahorro de energía asociados con dejar la CPU inactiva.

En la Tabla 4.5 se especifican las características de este chip.

<b>Chip nRF51822</b>	
Banda de frecuencia	2.4 GHz ISM
Tasa de datos en el aire	250 Kbps, 1 Mbps o 2 Mbps
Modulación	GFSK
Microcontrolador	ARM Cortex M0 de 32 bits
Memoria flash	256/128 kB
Memoria RAM	32/16 kB
Puertos GPIO	31 Configurables
Periféricos	Convertor Analógico Digital de 10 bits (ADC) Generador de Números Aleatorios (RNG) Relojes en Tiempo Real (RTC) Sensor de Temperatura
Temporizadores/Contadores	2 de 16 bits, 2 de 24 bits, RTC
Regulador de Voltaje	1,8 a 3,6 voltios
Aplicaciones	Wearables Beacons Periféricos de computadora Controles remotos para televisión, Set Top Box y sistemas multimedia Sensores deportivos y de estado físico Sensores de salud y estilo de vida Controladores de juegos para computadoras Electrodomésticos inteligentes

Tabla 4.5: Características del chip NRF51822 de Nordic Semiconductor. Extraída de [65]

## Diagrama de Bloques nRF51822

El diagrama de bloques del chip nRF51822 se observa en la Figura 4.6.

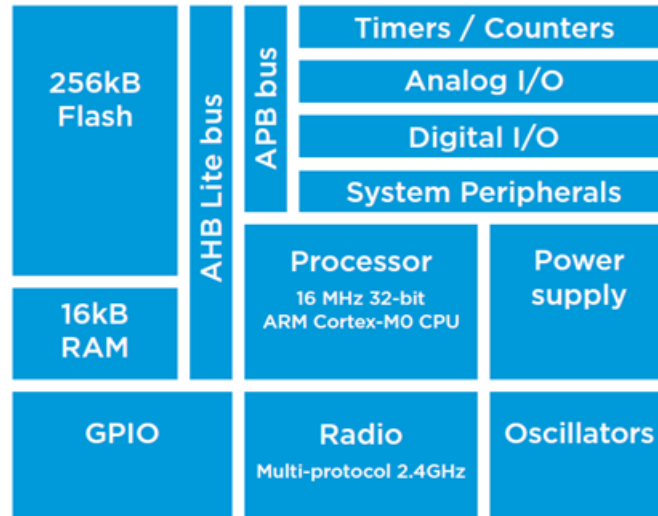


Figura 4.6: Diagrama de bloques del chip nRF51822. Extraída de [65]

## Diagrama de Componentes del Sistema

Una vez seleccionado el dispositivo a utilizar en nuestro prototipo, se procede a programar este hardware con ayuda de *Nordic Semiconductor Infocenter* [66], el cual es una biblioteca integral que contiene documentación técnica para soluciones y tecnologías actuales. En esta biblioteca se encuentra información importante para crear y administrar adecuadamente los entornos de desarrollo. Además, la compañía Nordic Semiconductor provee un completo rango de herramientas hardware y software como los *Kits de Desarrollo de Software (SDK)* con ejemplos para facilitar el desarrollo de firmware para diferentes dispositivos y aplicaciones.

A continuación se presenta una breve descripción del desarrollo de la aplicación, la cual es programada en nuestro dispositivo. En la Figura 4.7 se observa un diagrama de componentes básico que proporciona una visión general de la estructura del sistema. Muestra la organización de los componentes software, sus interfaces y las dependencias entre ellos.

El desarrollo del sistema se programa directamente en el lenguaje de programación nativo C, utilizado en los SDK de Nordic. Se trata de un lenguaje de medio nivel, ya que dispone tanto de estructuras comunes de alto nivel, como de construcciones que permiten un control a muy bajo nivel.

Como todo programa en C se compone de un conjunto de funciones, donde la principal *main* es la primera que se ejecuta. En seguida, se detallan brevemente cada componente

del sistema. Estos pueden ser código fuente (archivos fuente `.c`, en inglés *Source File*), código binario, librerías con interfaz definida (archivos de cabecera `.h`, en inglés *Header File*), tabla de bases de datos, ejecutables o un documento.

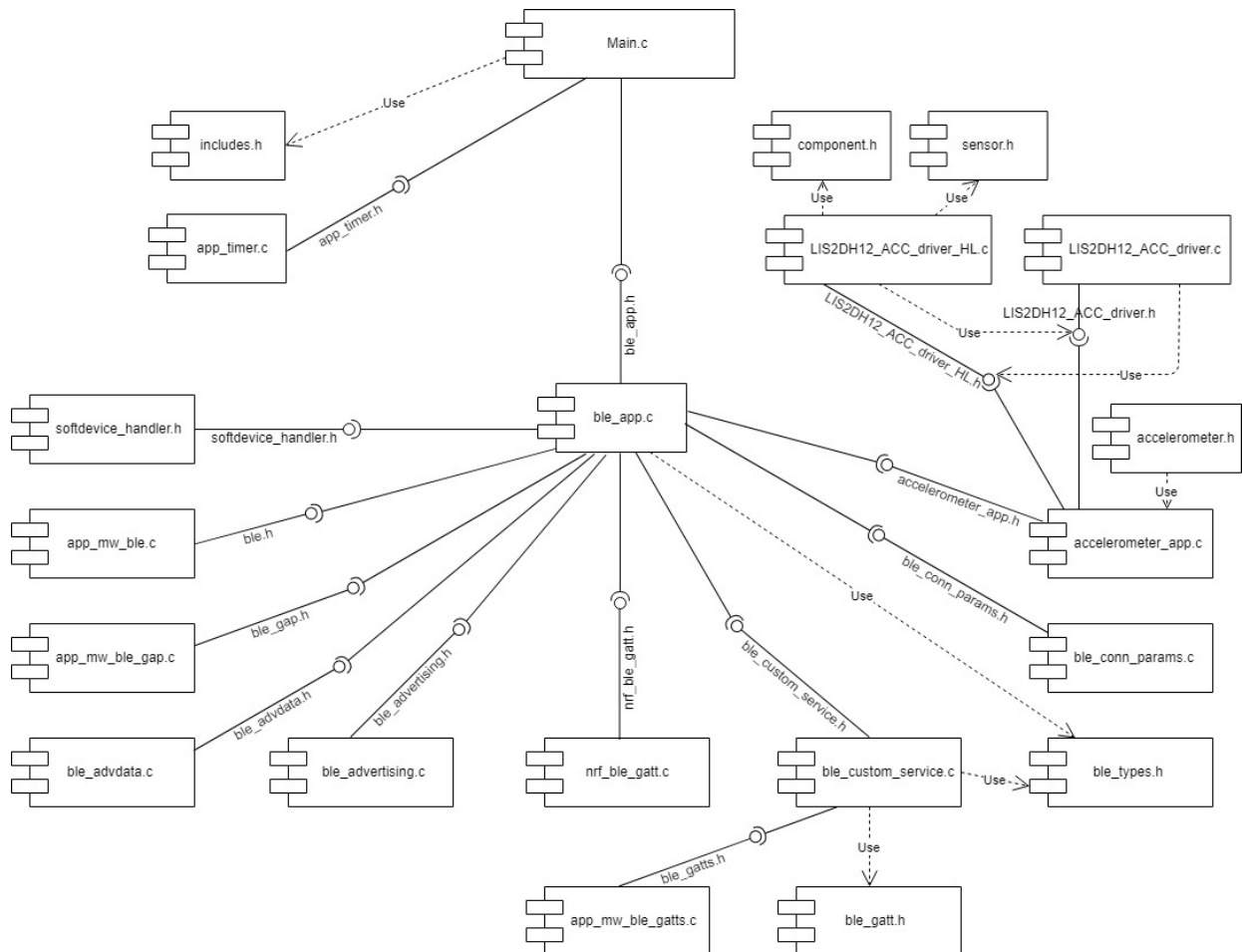


Figura 4.7: Diagrama de componentes de la unidad secundaria wearable. Fuente propia

## Descripción de los Componentes del Sistema

Es necesario recordar que el programa se encuentra distribuido en módulos, y los programadores frecuentemente dividen cada clase en dos ficheros, los archivos de cabecera (`.h`) y los archivos fuente (`.c`), generalmente con nombres iguales. Por ejemplo, un archivo de cabecera `helloWorld.h` incluye a los headers de las librerías que usará nuestro programa. Además contiene definición de estructuras, definición de tipos (`typedef`), prototipos de funciones, variables globales, constantes, macros (`#define`), directivas (`#pragma`) que forman parte de la interfaz pública del módulo. Por el otro lado el archivo `helloWorld.c` comprende el desarrollo de las mismas, es decir, implementa las funciones.

**main.c** Es la función principal, desde aquí se llaman todas las demás funciones que componen nuestro programa. Incluye el archivo de cabecera *includes.h*. Implementa las funciones: *app\_timer\_init()*, *ble\_stack\_init()*, *gap\_params\_init()*, *advertising\_init()*, *gatt\_init()*, *services\_init()*, *conn\_params\_init()*, *accelerometer\_init()*, *advertising\_start()* las cuales se ejecutan en los componentes siguientes.

**includes.h** Proporciona todas las librerías las cuales proveen las funciones que se requiere para la realización de las tareas del programa. Entre ellas están: *ble.h*, *ble\_advdata.h*, *ble\_advertising.h*, *ble\_conn\_params.h*, *softdevice\_handler.h*, *app\_timer.h*, *nrf\_ble\_gatt.h*, *ble\_conn\_state.h*, *ble\_app.h*, *accelerometer\_app.h*, *ble\_custom\_service.h*. Además se definen constantes del módulo timer, tales como:

- `APP_TIMER_PRESCALER = 0`
- `APP_TIMER_MAX_TIMERS = 6`
- `APP_TIMER_OP_QUEUE_SIZE = 4`

**app\_timer.c** Inicializa el módulo del temporizador de la aplicación. Maneja el dimensionamiento y la asignación del búfer de memoria requerido por el temporizador, asegurándose que esté alineado correctamente.

**ble\_app.c** Es el archivo fuente donde se implementan la mayoría de funciones señaladas en la función main específicamente los dirigidos a comunicación BLE, funcionalidad de advertising, conexión gatt, parámetros de conexión, servicios y demás. Define en su interfaz *ble\_app.h* variables y constantes para la comunicación BLE y datos de manufactura, algunas de estas son:

- Número de enlaces centrales y periféricos usados por la aplicación.  
`CENTRAL_LINK_COUNT = 0`  
`PERIPHERAL_LINK_COUNT = 1`
- Nombre del dispositivo.  
`DEVICE_NAME = "Thesis"`
- Intervalo de advertising.  
`APP_ADV_INTERVAL = 1000 (ms)`
- Tiempo de espera de advertising.  
`APP_ADV_TIMEOUT_IN_SECONDS = 0`
- Intervalos de conexión.  
`MIN_CONN_INTERVAL = 50 (ms)`  
`MAX_CONN_INTERVAL = 70 (ms)`
- Latencia esclava.  
`SLAVE_LATENCY = 0`
- Tiempo de espera de supervisión de conexión.  
`CONN_SUP_TIMEOUT = 4000 (ms)`

- Identificador de la compañía, en este caso, Nordic Semiconductor ASA.  
APP\_COMPANY\_IDENTIFIER = 0x0507
- Tipo de dispositivo. En este caso, refiere a Beacon.  
APP\_DEVICE\_TYPE = 0x02

**softdevice\_handler.c** Inicializa y deshabilita el softdevice, recibe eventos del softdevice y los reenvía a la aplicación usando las funciones de interfaz. Trabaja con el softdevice S130 que tiene funcionalidades BLE y ANT.

**app\_mw\_ble.c** A través de su interfaz define los tipos de estructura para la inicialización de parámetros BLE (comunes, GAP y GATTS).

**app\_mw\_ble\_gap.c** Dentro de su interfaz ble\_gap.h están las definiciones y prototipos para la interfaz GAP tales como identificadores únicos de eventos que vienen de la pila de la aplicación, los roles, banderas de advertising, intervalo mínimo y máximo de advertising posibles, modos de seguridad de conexión, entre otros.

**ble\_advdata.c** Implementa funciones para codificar datos en el formato de datos de advertising y respuesta de escaneo y para pasar los datos a la pila. Define el tipo de nombre de datos de advertising, la estructura de los tipos de lista UUID, rango de intervalo de conexión, datos específicos de manufactura, datos de advertising, etc.

**ble\_advertising.c** Es el módulo de advertising donde se maneja la conexión, inicialización y puesta en marcha del advertising en cualquiera de los modos, los cuales se pueden configurar para adaptarse a la mayoría de los casos de uso típicos. En su interfaz define los modos y eventos de advertising.

**nrf\_ble\_gatt.c** Módulo GATT. Desarrolla funciones para la inicialización del módulo GATT. Define la estructura GATT que contiene información del estado para el módulo, número por defecto del máximo de enlaces centrales, periféricos y combinados.

**ble\_custom\_service.c** Código fuente para la implementación de servicios y características personalizadas, funciones para el manejo del evento conectado, desconectado, escribir, entre otros. Envía valores de aceleración si está conectado y habilitadas las notificaciones. Define en su interfaz los valores de las propiedades de las características, la UUID del servicio y característica personalizada, estructura de los datos de aceleración (datos de los 3 ejes X,Y,Z).

**app\_mw\_ble\_gatts.c** Provee funciones para agregar una declaración de servicio, característica y descriptor a la tabla de atributos. Define el tipo de estructura de los parámetros de inicialización y atributos de BLE GATT.

**ble\_gatt.h** Definiciones y prototipos comunes para las interfaces GATT, como los formatos de presentación y propiedades de las características, códigos de estado.

**ble\_types.h** Interfaz que provee los tipos comunes y definiciones macro para el softdevice ble. Especifica UUID genéricos, aplicables a todos los servicios, tipos de UUID, valores de apariencia bluetooth, entre otros. Además establece el tipo y valor de una uuid específica.

**ble\_conn\_params.c** Módulo que contiene todas las opciones y datos necesarios para iniciar y ejecutar un procedimiento de negociación de parámetros de conexión. También define el tipo de evento del módulo de parámetros de conexión, indicando si falló o si tuvo éxito.

**accelerometer\_app.c** Implementa las funciones de inicialización del acelerómetro. Configura parámetros del sensor de aceleración, establece el modo de resolución. Se crea una instancia del timer con su debida identificación, modo repetitivo con el fin de que se reinicie cada vez que caduque y la función que se ejecuta. Esta función recolecta un paquete de tres datos de cada uno de los tres ejes del acelerómetro. Al momento de habilitar las notificaciones, pone en marcha el timer y así mismo lo detiene cuando se deshabilitan las notificaciones.

**accelerometer.h** Define la estructura del controlador del acelerómetro, los datos específicos del componente y características hardware.

**LIS2DH12\_ACC\_driver\_HL.c** En su interfaz se definen prototipos de función privada, estructura del controlador acelerómetro LIS2DH12, estructura interna de las características extendidas del controlador. Se realizan funciones para la inicialización del LIS2DH12, habilitar el modo FIFO, establecer la velocidad de datos de salida (ODR, 50 hz por defecto), el modo de energía (Baja potencia por defecto), full scale (2G), habilitar los ejes, entre otros. Además se implementan funciones para chequear la identificación del Who\_Am\_I del sensor, obtener los valores de los ejes del sensor de aceleración, etc.

**component.h** Precisa la estructura de contexto del componente, tales como identidad, datos, configuración del tipo de protocolo de comunicación (I2C o SPI), dirección I2c del sensor, instancia del sensor, habilitado o deshabilitado y si el componente consta de más sensores.

**sensor.h** Interfaz que proporciona la definición de la estructura de datos de los ejes del sensor, define a través de números la velocidad de datos de salida del sensor y el full scale del sensor.

**LIS2DH12\_ACC\_driver.c** Especifica con numeración diferentes tipos de datos como constantes, tales como habilitar o deshabilitar el LIS2DH12, el ODR, modo de energía, modos de filtro pasa alta, frecuencia de corte del filtro, full scale, modo FIFO. Además de definir prototipos de funciones de configuración del sensor descritas en LIS2DH12\_ACC\_driver\_HL.c.



#### 4.1.5. Procesamiento en el Módulo Primario Wearable

En este apartado, actividad F5, se desarrolla una aplicación Android para dispositivos móviles. La programación se realiza en *Android Studio 3.2* [67] para la recepción de los datos, donde a través de una API el módulo primario wearable (smartphone) es capaz de escanear dispositivos BLE, conectarse mediante Bluetooth Low Energy al módulo secundario wearable, interpretar los paquetes de bytes enviados.

La información recibida de aceleración se convierte en la característica física de aceleración total. Además, aplica tres diferentes tipos de filtro pasa baja a la señal, almacena las cifras obtenidas en la base de datos SQLite y despliega los datos recibidos y filtrados en gráficas. Así mismo, grafica el histograma de la señal pura y filtrada, y obtiene los parámetros probabilísticos de valor medio y desviación estándar. Adicionalmente, calcula los mismos valores propabilísticos por ventanas para así conseguir un valor máximo y mínimo de la señal. Finalmente, convierte los datos almacenados en archivos CSV. El diagrama de componentes de la aplicación se aprecia en la Figura 4.8. La documentación completa de este proceso se encuentra en el Anexo A.

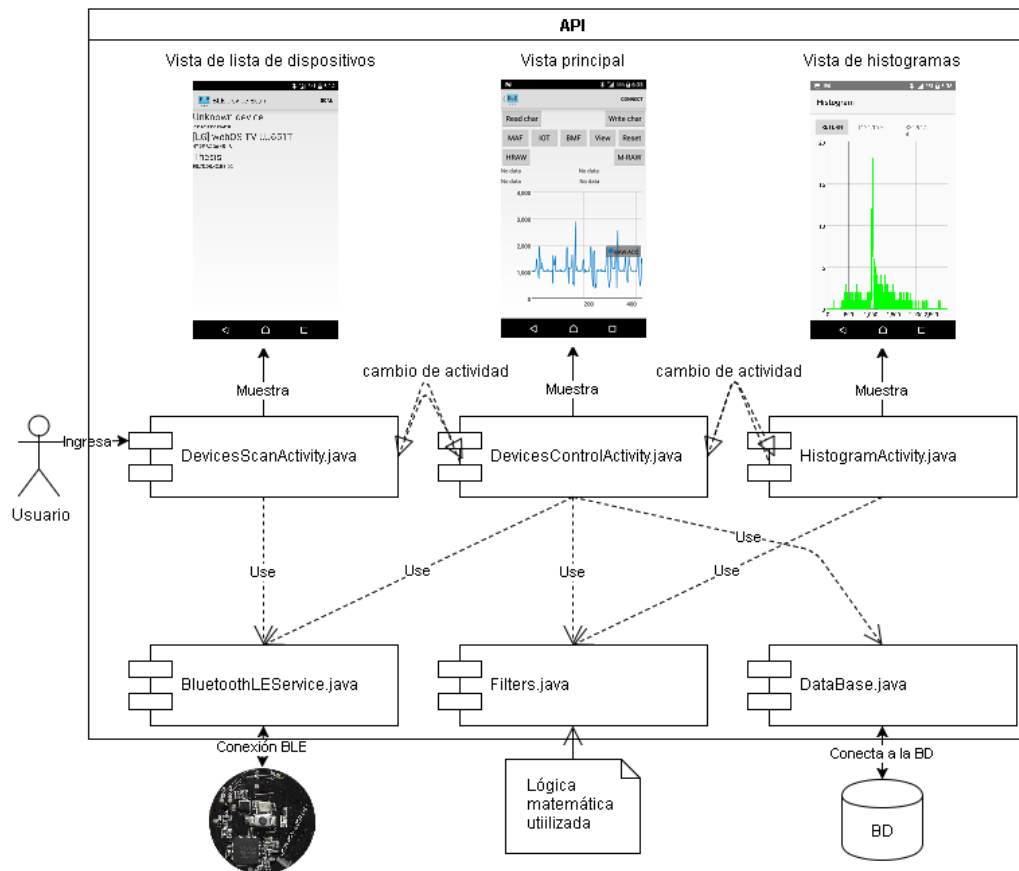


Figura 4.8: Diagrama de componentes de la aplicación en la unidad primaria wearable. Fuente propia

## Clase BluetoothLEService.java

En esta clase, proporcionada por Android, se implementa la funcionalidad BLE para crear conexiones, manejar llamadas, decodificar información recibida, verificar servicios y características. Dentro de esta clase se convierte el paquete de entrada de 18 bytes en 9 valores de aceleración, los cuales corresponden a las tres muestras los ejes X, Y, Z. El algoritmo de este proceso se ve en la Figura 4.9.

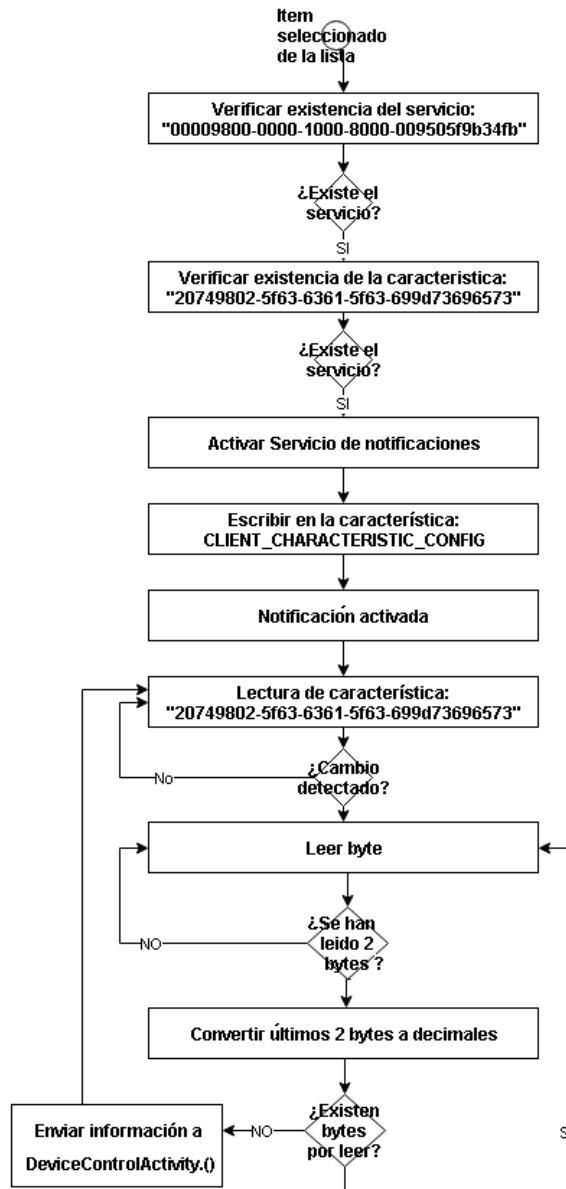


Figura 4.9: Algoritmo de la clase BluetoothBleService.java. Fuente propia

**Acceleration Vector** Esta función es capaz de obtener la característica física de la magnitud de la aceleración total, aplicando raíz cuadrada a la suma de cuadrados de aceleración en el eje X, Y, Z. En la Figura 4.10 se muestra el algoritmo de esta función.

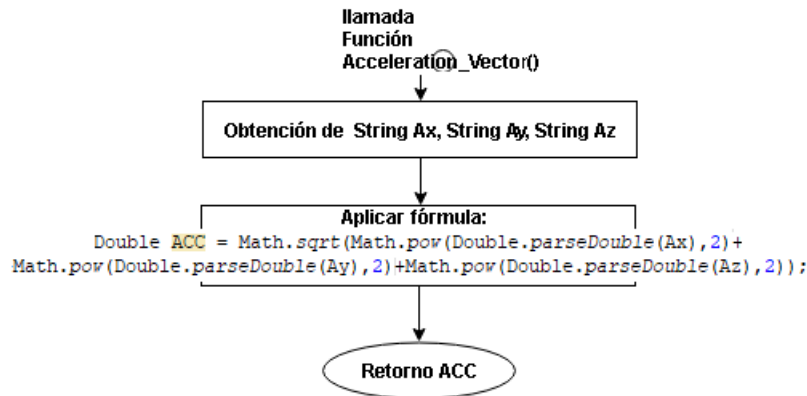


Figura 4.10: Algoritmo del cálculo de la magnitud de aceleración total. Fuente propia

### Clase ServiceScanActivity.java

Esta clase escanea dispositivos BLE alrededor de él y enumera una lista con los elementos encontrados. Estos son desplegados en una vista llamada listitem device.xml, donde se aparece el nombre de los dispositivos localizados. En caso de presionar sobre uno de ellos, se inicia la conexión con el dispositivo comprobando que los servicios contenidos concuerden con los establecidos, es decir, coincidan las UUID's. En la Figura 4.11, se aprecia el algoritmo de la clase.

### Clase DeviceControlActivity.java

Es una de las clases más importantes de la aplicación, encargada de la comunicación entre servicios y actividades. Contiene la lógica principal para la creación de base de datos, graficación de variables, conexión, desconexión y manejo de información recibida. Su algoritmo se indica en la Figura 4.12.

**Botones MAF, IOT y BMF** Estos botones son los filtros Moving Average Filter, Built.io y BlackMan Filter respectivamente, utilizados en este proyecto. Presionando uno de ellos, retorna la información de la tabla RawAccelerometer\_Table\_RAW y aplica el filtro respectivo definido en la clase Filters.java. Ver algoritmo en la Figura 4.13.

**Botones HRAW, HMAF, HIOT y HBMF** Estos botones realizan el cálculo de histogramas para datos puros y filtrados respectivamente. Emplean medidas de seguridad en caso de que no exista información. Para ejecutar estos procesos utilizan hilos y handlers. Requiere el uso de las funciones Binned() e Histogram(), las cuales serán vistas más adelante. Los algoritmos se observan en la Figura 4.14, Figura 4.15, Figuro 4.16 y Figura 4.17.

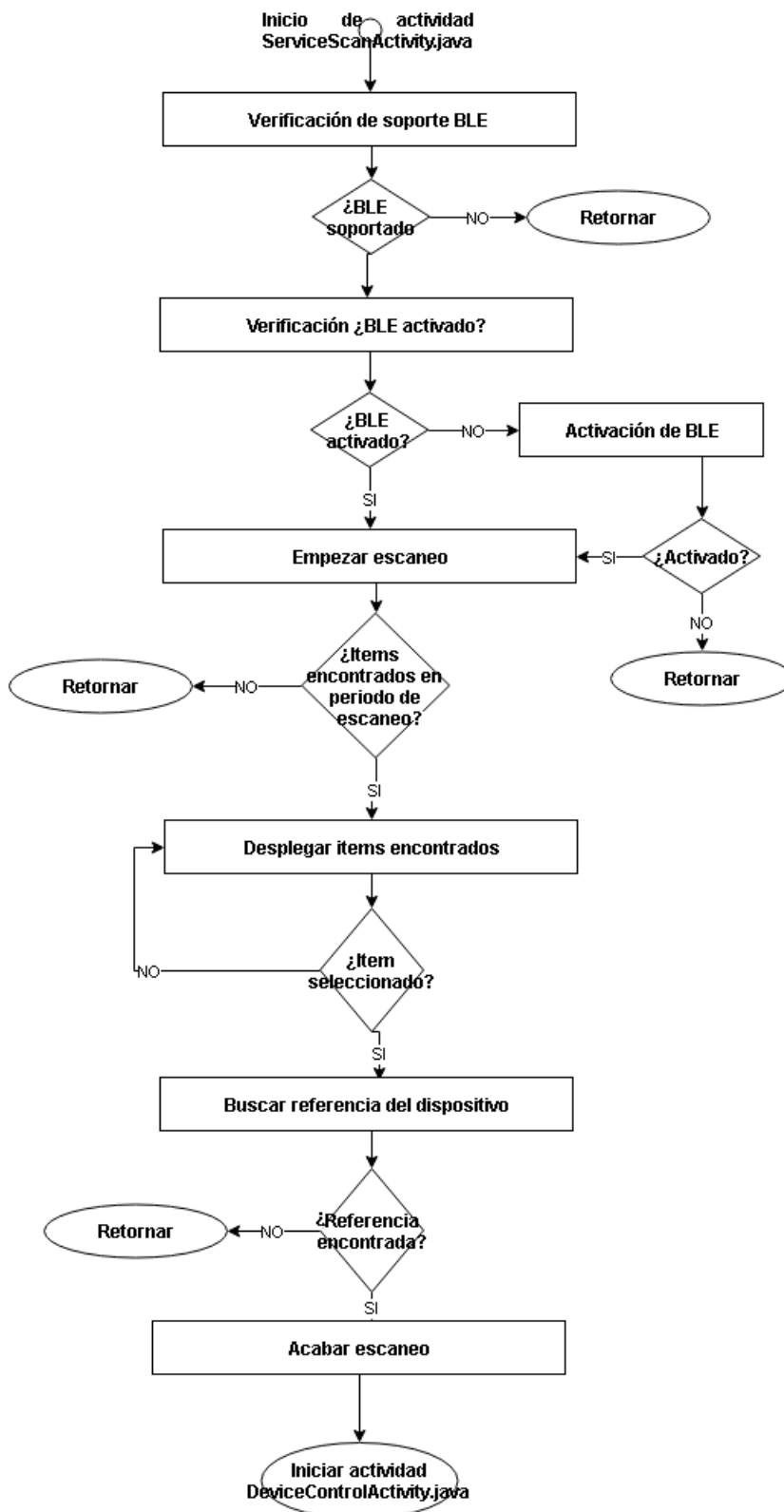


Figura 4.11: Algoritmo de la clase ServiceScanActivity.java. Fuente propia

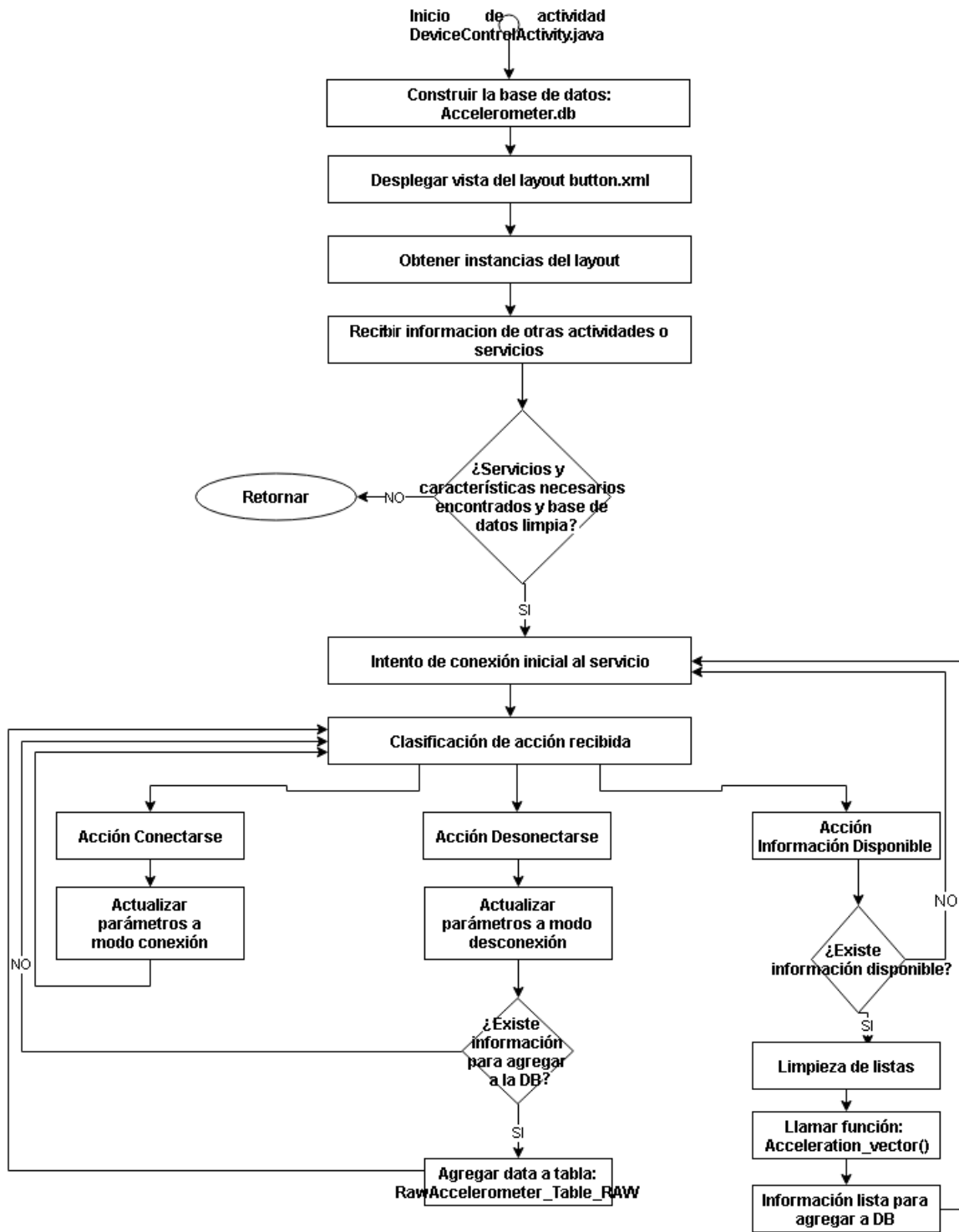


Figura 4.12: Algoritmo de la clase DeviceControlActivity.java. Fuente propia

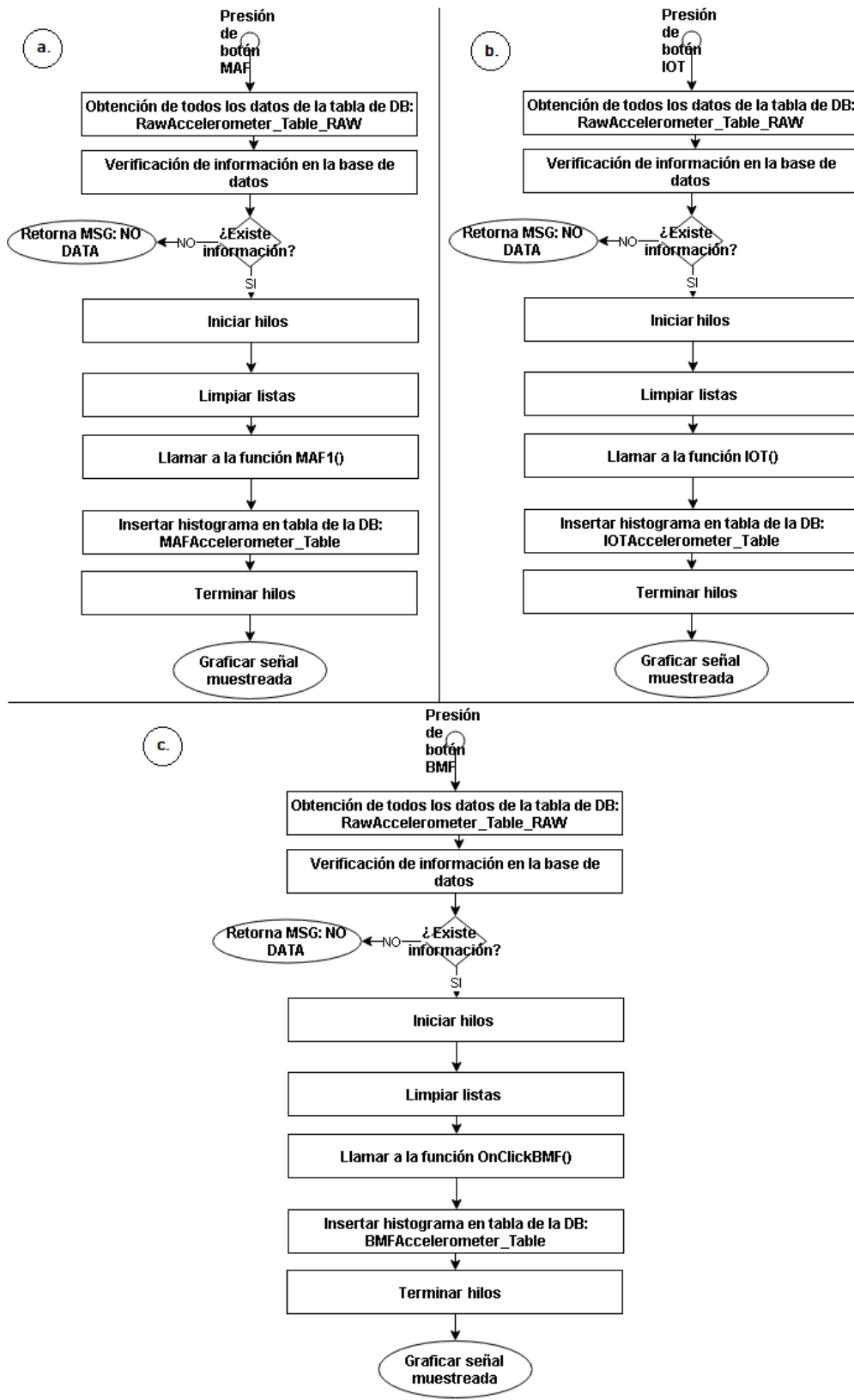


Figura 4.13: Algoritmo de funciones de botones a.) MAF b.) IOT c.) BMF. Fuente propia

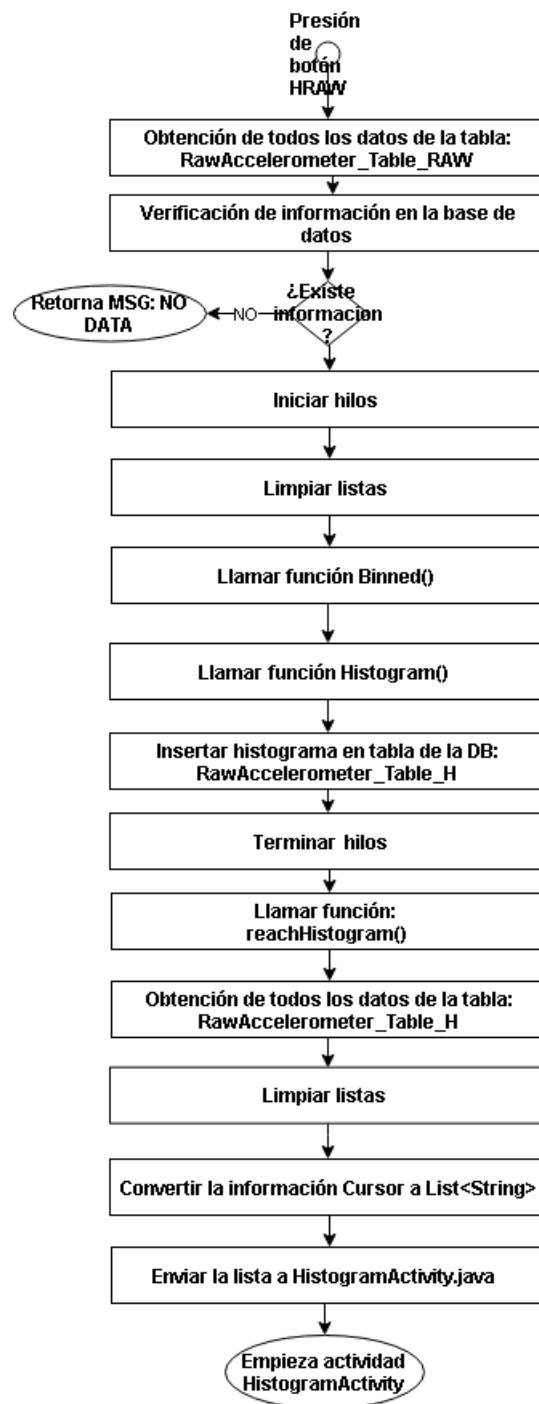


Figura 4.14: Algoritmo del histograma de los datos puros RAW. Fuente propia

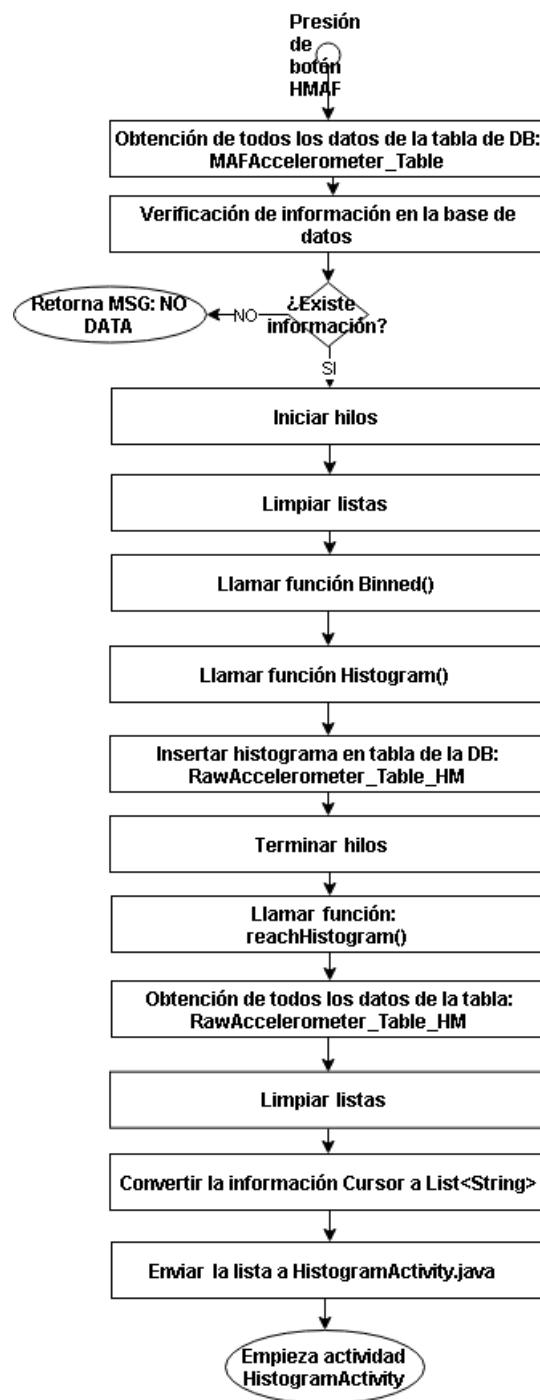


Figura 4.15: Algoritmo del histograma de los datos filtrados por MAF. Fuente propia



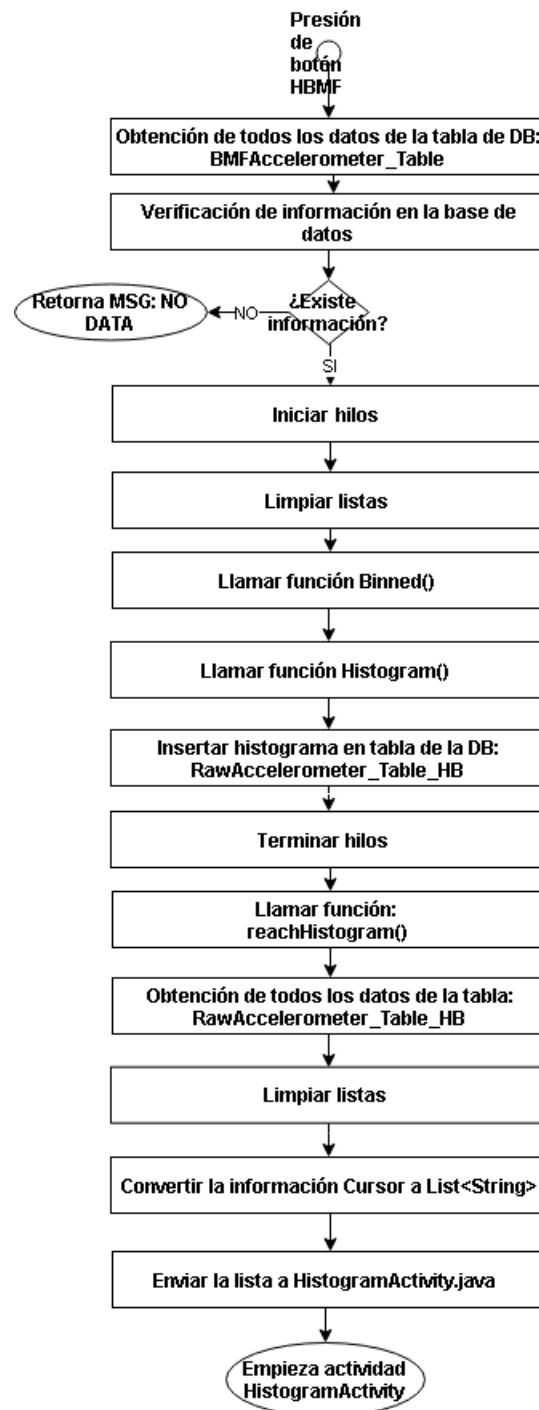


Figura 4.16: Algoritmo del histograma de los datos filtrados por IOT. Fuente propia

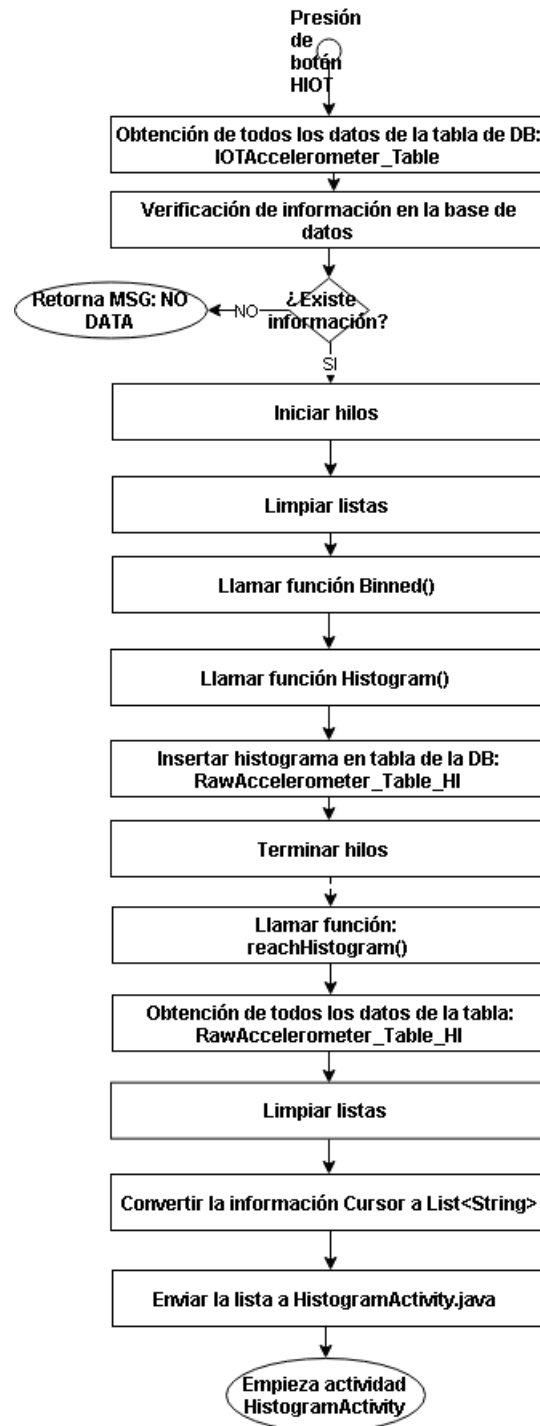


Figura 4.17: Algoritmo del histograma de los datos filtrados por BMF. Fuente propia

## Clase Filters.java

Como ya se ha dicho, el proyecto prototipo wearable, hace uso de tres filtros para procesar la señal y eliminar partes no deseadas de la misma. Para más información acerca de estos filtros, ver Anexo C.

**Filtro Moving Average Filter (MAF)** Es el filtro más común en DSP, principalmente porque es el filtro digital más fácil de entender y usar. A pesar de su simplicidad, este filtro es óptimo para tarea común: reducir el ruido aleatorio al tiempo que conserva una respuesta de paso nítida [22]. Se aplica a la señal completa de la actividad física estudiada para lograr un suavizado de la misma, eliminando picos altos correspondientes a frecuencias elevadas. Ver algoritmo en la Figura 4.18.

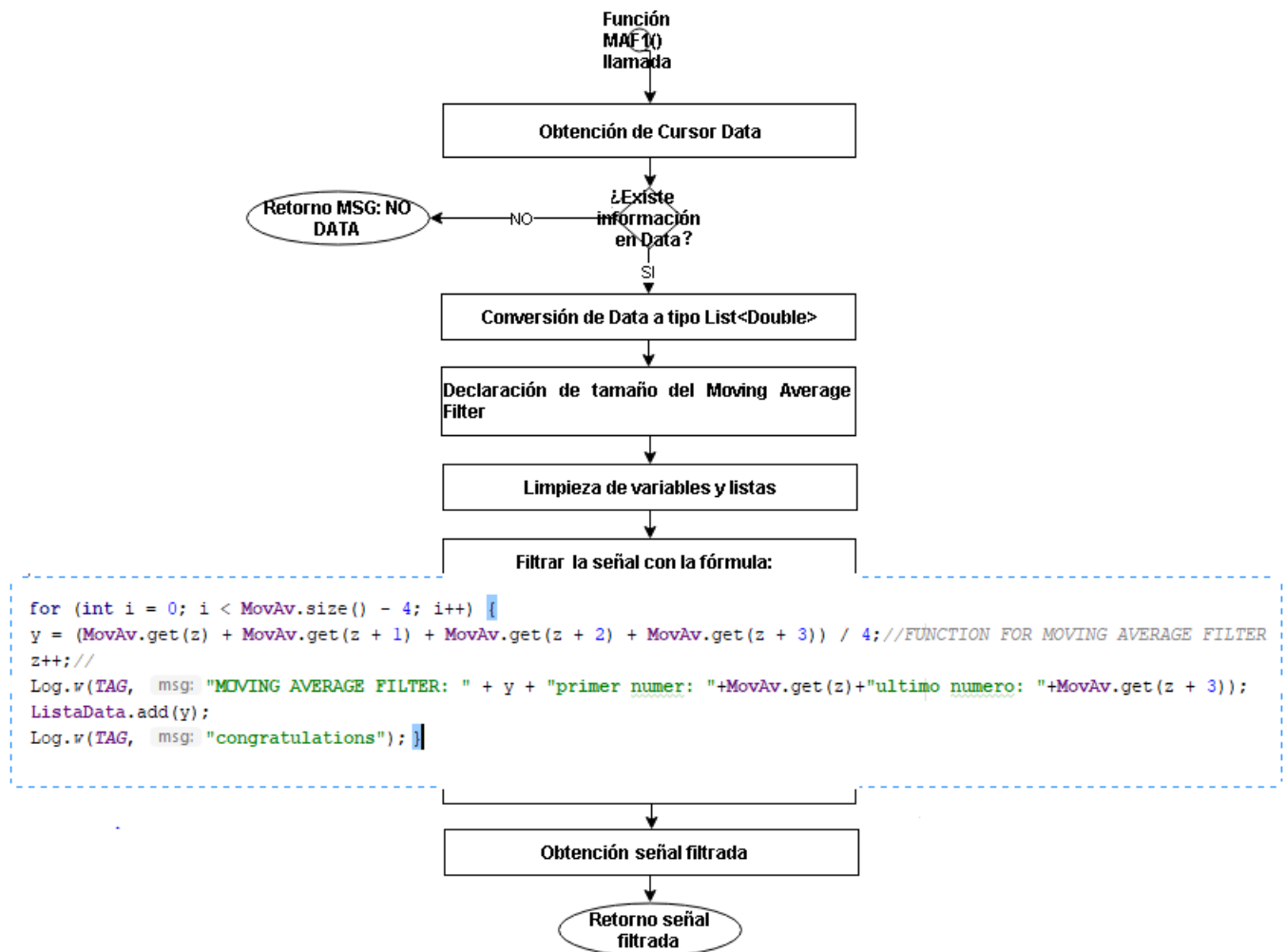


Figura 4.18: Algoritmo de cálculo del filtro Moving Average Filter MAF. Fuente propia

**Filtro Built.io (IOT)** El filtro proporcionado en [23] es un filtro pensado para retirar el ruido indeseado. Es un simple filtro pasa bajas especialmente útil para evitar errores en aplicaciones Android que necesiten poca variación en su señal y estabilidad en sus lecturas. Ver algoritmo en la Figura 4.19.

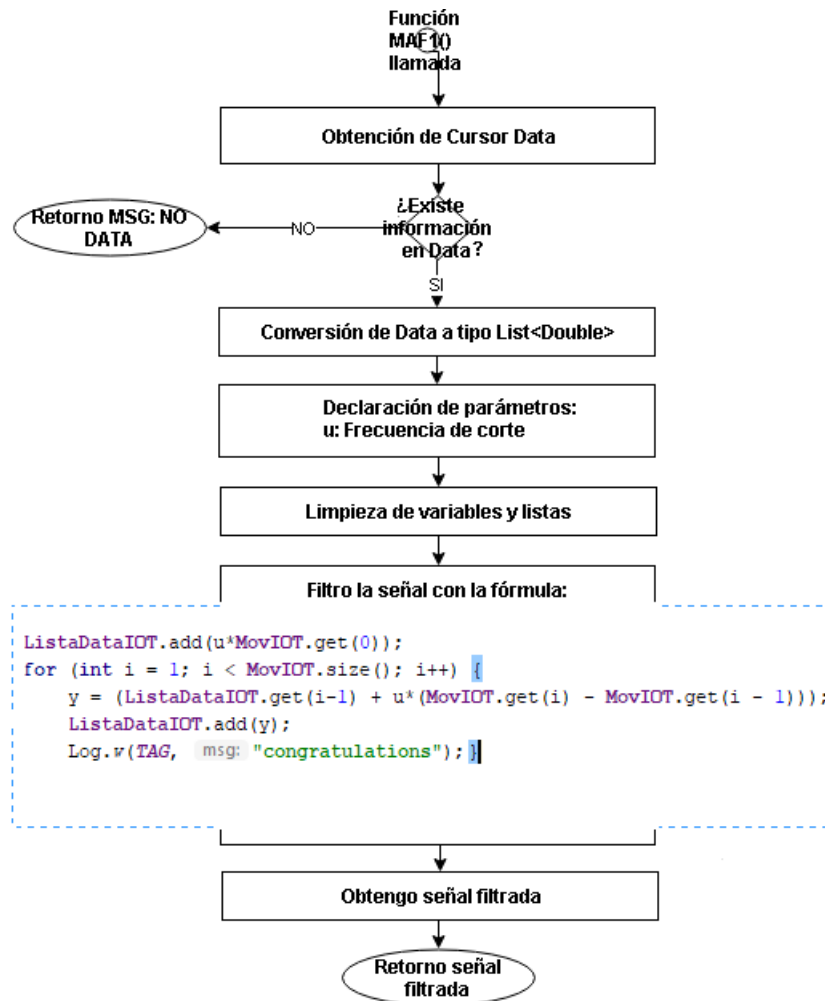


Figura 4.19: Algoritmo de cálculo del filtro Built.io IOT. Fuente propia

**Filtro BlackMan Filter (BMF)** Filtro por ventanas, proporciona una mejor atenuación en la señal que MAF pero mayor carga computacional. Es por eso que la mayor diferencia en estos filtros es la velocidad de ejecución, debido a que BMF hace uso de la convolución, un algoritmo lento [24]. Ver algoritmo en la Figura 4.20.

## Histograma

El histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados.

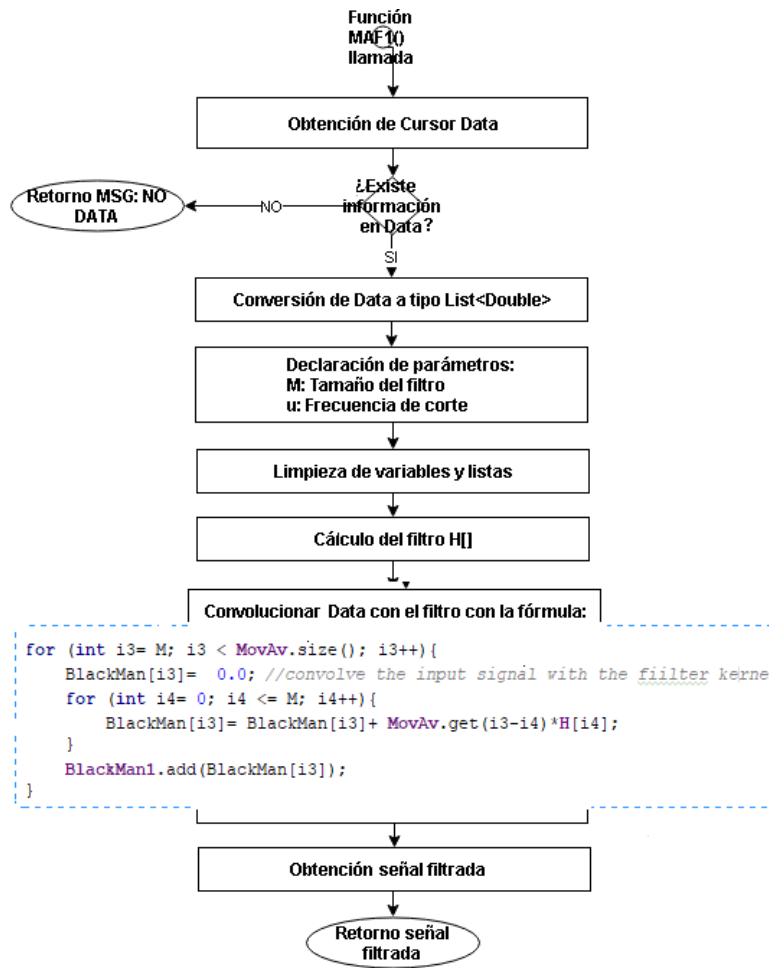


Figura 4.20: Algoritmo de cálculo del filtro BlackMan Filter BMF. Fuente propia

Permite observar una preferencia, o tendencia, por parte de la muestra o población por ubicarse hacia una determinada región de valores dentro del espectro de valores posibles que pueda adquirir la característica. Son muy utilizados en la ciencia estadística.

**Función Histogram()** Esta función calcula el histograma de cualquier señal, ver Figura 4.21. Para ser implementada necesita pasar la señal por la función Binned() previamente, sino la carga computacional será muy alta.

**Función Binned()** Lógica que convierte los números decimales en enteros para darle solución a la gran carga computacional que traen los números flotantes, ver Figura 4.22. Una vez ejecutada esta función se procede a realizar la función Histogram().

**Función Mean()** Función utilizada para determinar los valores probabilísticos. En este caso, se calcula el valor medio y la desviación estándar. Ver lógica en la Figura 4.23.

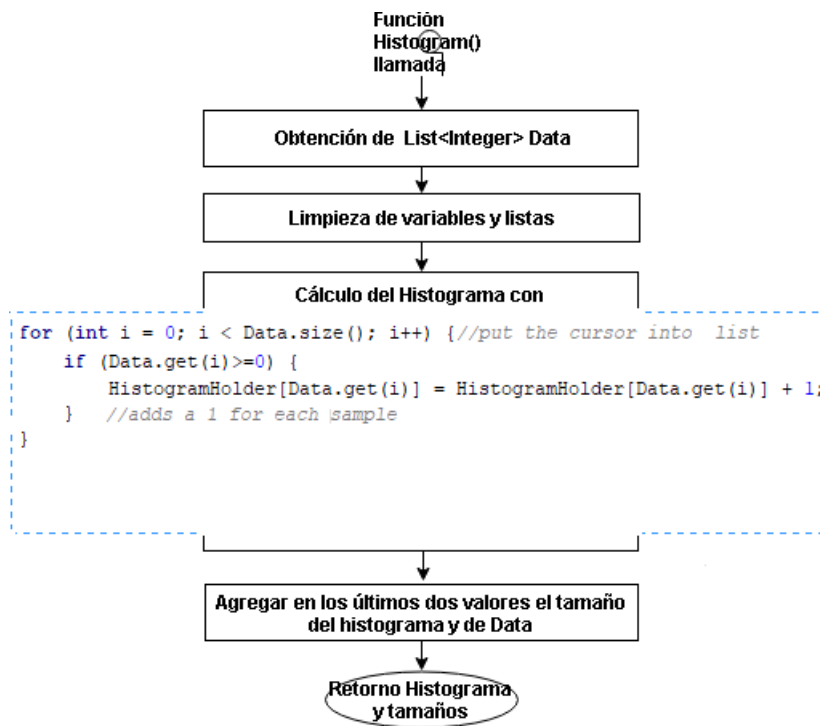


Figura 4.21: Lógica para el cálculo de un histograma. Fuente propia

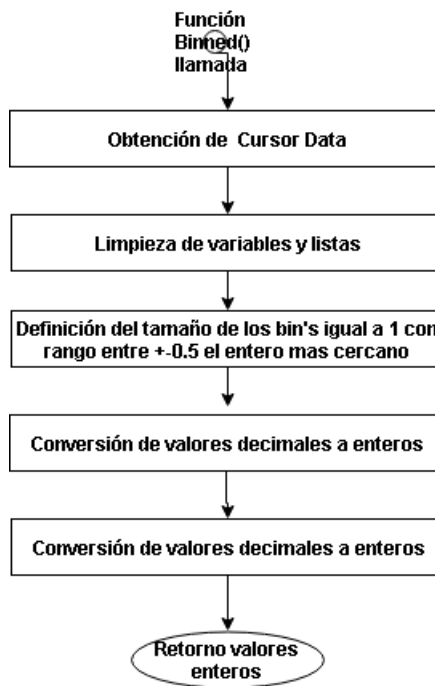


Figura 4.22: Lógica de solución Binned para histogramas. Fuente propia

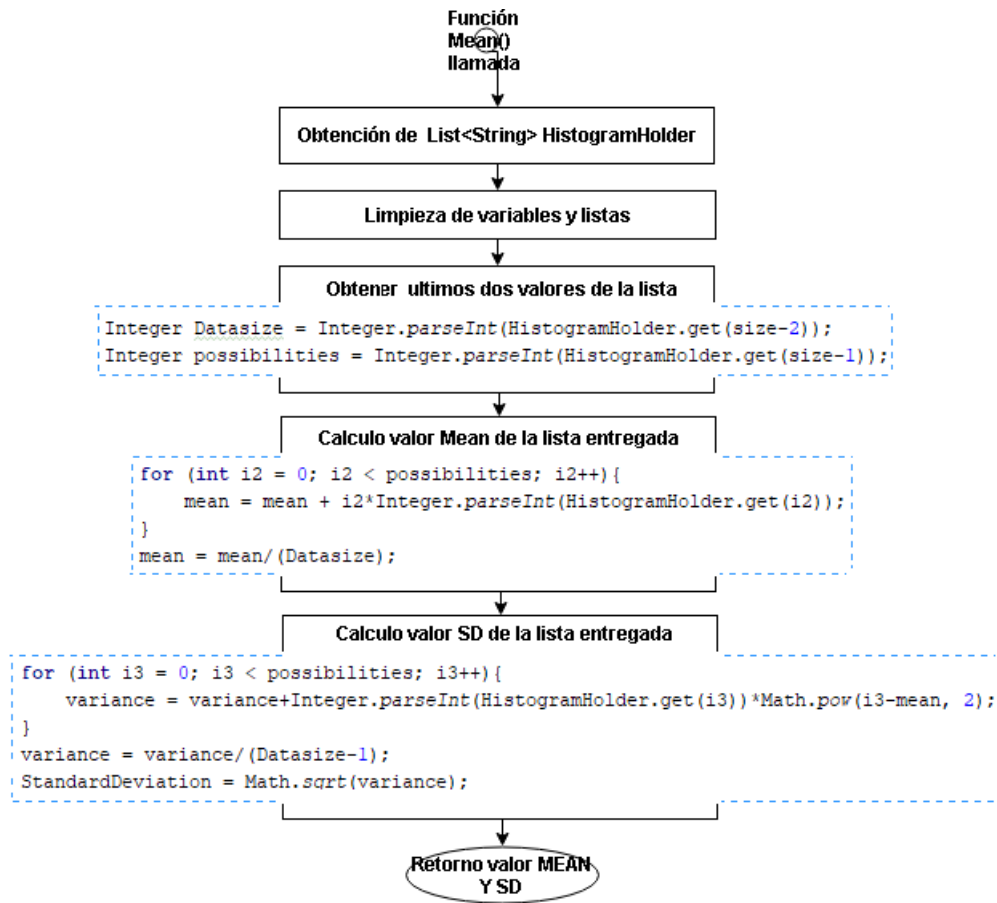


Figura 4.23: Lógica para el cálculo del valor medio y desviación estándar. Fuente propia

## 4.2. BATERÍA

Esta etapa se rige por los pasos expuestos en la Figura 3.5 con el fin de determinar el tiempo de vida útil del prototipo diseñado y el tipo de batería que será utilizada.

### 4.2.1. Cálculo de Energía Consumida

Como se plantea en la aproximación metodológica, actividad B1, para calcular el consumo de energía de la unidad secundaria wearable se selecciona un dispositivo existente en el mercado, como lo es el *INA219 High Side DC Current Sensor Breakout* [68], ver Figura 4.24. Este chip, a diferencia de los medios normales para la medición de corriente, es capaz de medir el cambio de consumo de corriente en diferentes periodos de tiempo, además de no necesitar ejercer cambios de tierras para realizar sus funciones. Potenciada con fuentes entre 3 y 5 Voltios, con mediciones de corriente entre  $\pm 3.2$  Amperios y un ADC de 12 bits. Su precio en el mercado es de USD \$9.95.

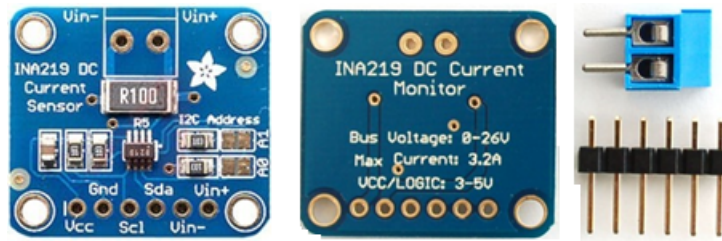


Figura 4.24: Dispositivo INA219 DC Current Sensor

Se utiliza la placa de desarrollo *Arduino Mega 2560* para alimentar el chip INA219 y comunicar los datos mediante el protocolo I2C. En la Figura 4.25 se muestra la conexión entre el sensor de corriente, la placa Arduino, el dispositivo wearable y su respectiva batería, descrita anteriormente. El diagrama de conexión se observa en la Figura 4.26.

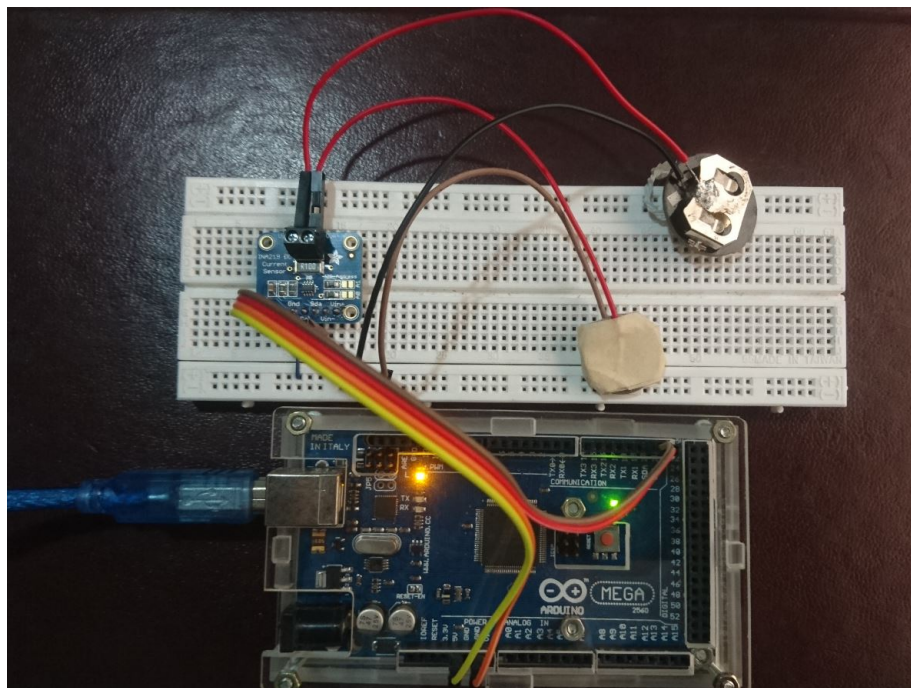


Figura 4.25: Conexión entre el sensor de corriente, el arduino, la batería y el módulo secundario wearable



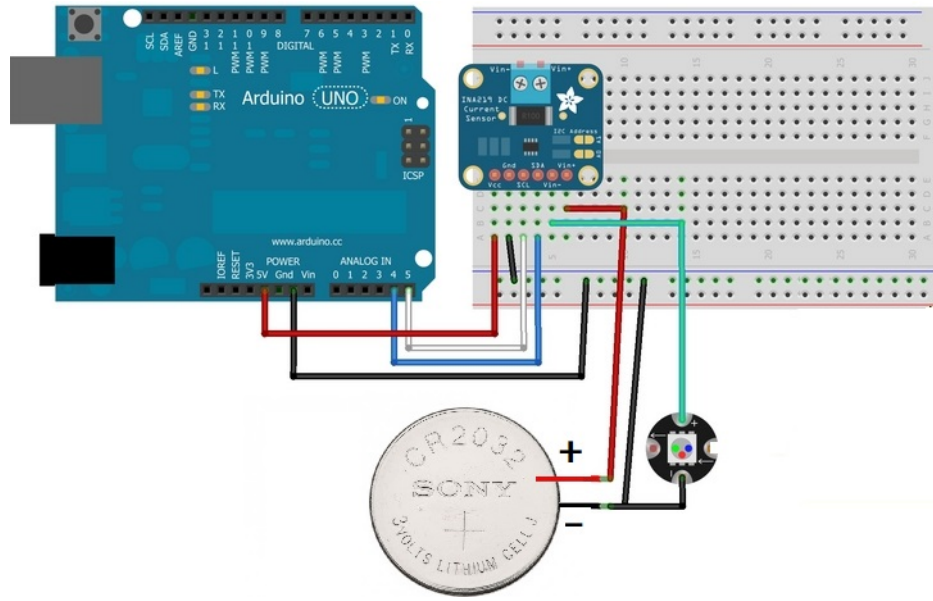


Figura 4.26: Diagrama de conexión del sensor INA219. Extraída de [68]

Con el fin de calcular el consumo de corriente promedio en miliamperios (mA), se procede a tomar mediciones de corriente en intervalos de tiempo fijos. Haciendo uso del Monitor Serial de la interfaz Arduino se muestran los valores de corriente obtenidos del chip INA219, ver Figura 4.27.

Los parámetros utilizados para este procedimiento se encuentran en la Tabla 4.6.

Parámetro	Valor
Número de mediciones	305 muestras
Intervalo entre muestras	200 ms
Período de tiempo medido	1 minuto

Tabla 4.6: Parámetros de medición del sensor de corriente utilizado

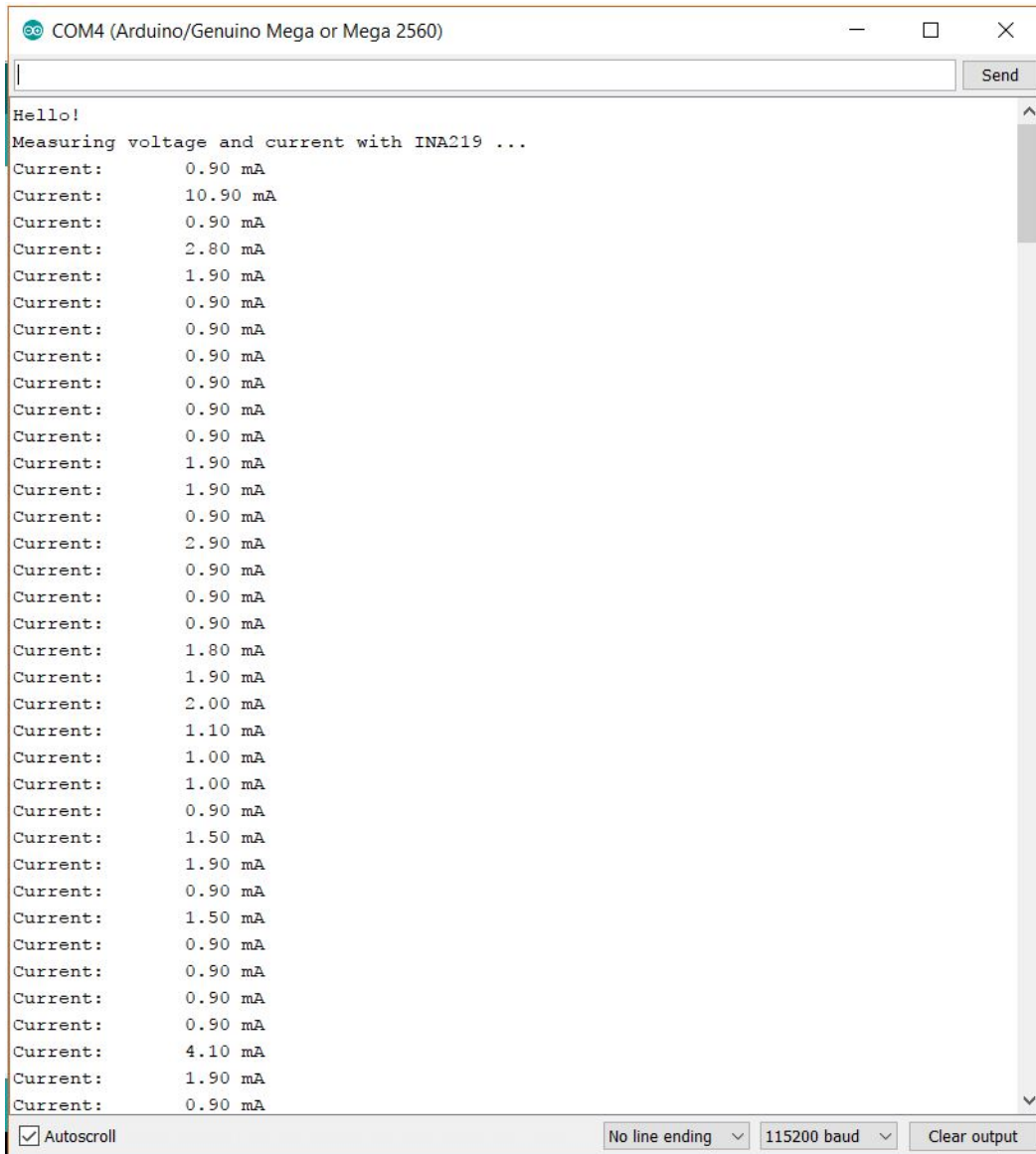


Figura 4.27: Datos de corriente en tiempo real mostrados en el monitor serial

En la Figura 4.28, se observa el comportamiento de la corriente en el dispositivo wearable.

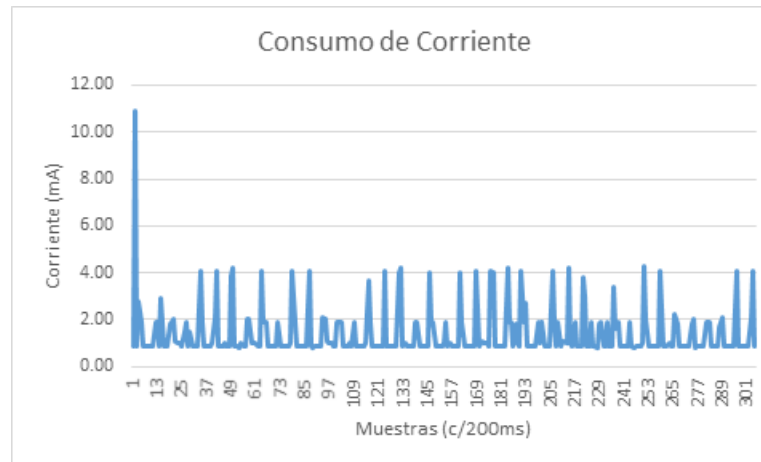


Figura 4.28: Comportamiento de corriente en el dispositivo wearable. Fuente propia

De acuerdo con estos valores se determina el consumo de corriente promedio, el cual es de 1,423 miliamperios (mA).

#### 4.2.2. Opciones de Energía

La actividad B2, opciones de batería, ofrecen tipos de batería comunes para wearable pero de acuerdo a las especificaciones del dispositivo YJ-16009-NRF51822, se debe utilizar una batería tipo botón o moneda, correspondiente a las exigencias del fabricante, en este caso, de referencia *CR2032*.

#### 4.2.3. Selección de Batería

Esta actividad, generalmente, depende del dispositivo seleccionado como módulo secundario wearable, debido a que en muchos casos estas unidades ya cuentan con un tipo de batería preestablecido para su funcionamiento. Como en nuestro caso, en selección de batería (actividad B3) se dispone de una batería tipo moneda *Sony CR2032* cuyas especificaciones se indican en la Tabla 4.7.

<b>Batería Seleccionada</b>	
Tipo de batería	Moneda/Botón
Voltaje nominal	3 voltios
Capacidad nominal	220 mAh

Tabla 4.7: Especificaciones de la batería Sony CR2032. Extraída de [69]

Ahora, con estos valores de capacidad nominal y consumo de corriente se procede a calcular el tiempo de vida de la batería, utilizando la Ecuación 3.1.

$$\frac{220 \text{ mAh}}{1,423 \text{ mA}} = 154,6 \text{ Horas}$$

Finalmente, se estima que el tiempo de la vida útil de la batería es de 155 horas aproximadamente.

### 4.3. VESTIBILIDAD

En esta etapa se utilizan las guías de vestibilidad (W1) para el diseño de la carcasa.

#### 4.3.1. Definición de Parámetros de Vestibilidad

Las especificaciones de la actividad W2 se establecen de acuerdo a las dimensiones del dispositivo secundario wearable. Estas se describen en la Tabla 4.8.

Guía de vestibilidad	Definición de uso
<i>Posición</i>	La posición escogida para este diseño es en el tobillo exterior derecho
<i>Lenguaje de forma</i>	Se ha diseñado la carcasa de manera tal que siga la forma de la pierna con una superficie cóncava de hasta 3 mm como visto en la Figura 4.29.
<i>Movimiento humano</i>	La localización en el tobillo no restringe ningún músculo al agarrarse la carcasa.
<i>Percepción humana</i>	El tamaño de la carcasa es inferior a los 12.8 cm por lo tanto cumple con la norma.
<i>Tamaño</i>	Las dimensiones se observan en la Figura 4.30, Figura 4.31 y la Figura 4.32. Para usuarios de diferentes tamaños, solo se debe cambiar a una banda de agarre apropiada para la persona.
<i>Acceso cómodo</i>	Para colocar la carcasa en el cuerpo del usuario, el diseño cuenta con soportes para tiras a ambos lados de material <i>Velcro</i> de 1.6 cm de ancho, como se ve en la Figura 4.33.

Tabla 4.8: Parámetros para el diseño de la carcasa del proyecto prototipo wearable

#### 4.3.2. Diseño de Carcasa

El diseño de la carcasa, actividad W3, ha sido implementado en 3D con la herramienta CAD online, *TinkerCad* [70]. Los resultados del diseño se muestran en las figuras descritas en la tabla anterior, junto con sus dimensiones dadas en unidades de milímetros (mm).

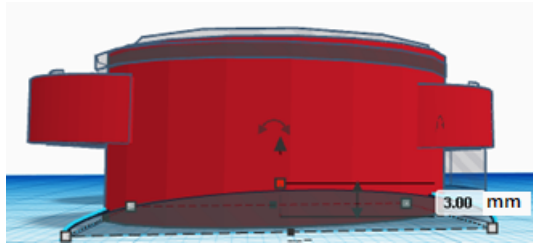


Figura 4.29: Base cóncava de la carcasa adaptada al tobillo en milímetros

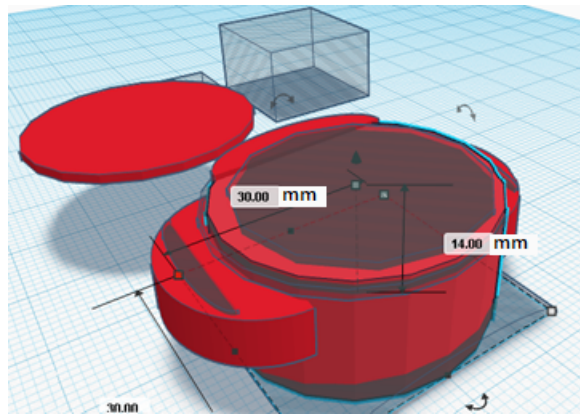


Figura 4.30: Ancho, alto y largo de la carcasa en milímetros

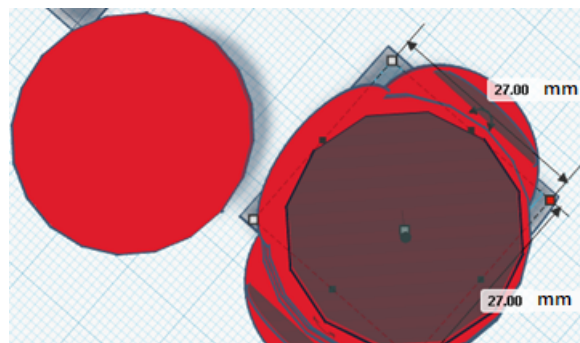


Figura 4.31: Ancho y largo interno de la carcasa en milímetros

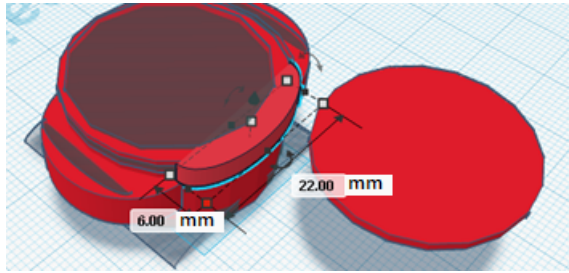


Figura 4.32: Amarre para la tapa de la carcasa en milímetros

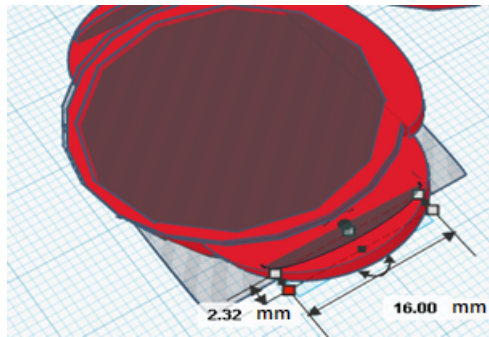


Figura 4.33: Sujetadores del amarre de la carcasa en milímetros

#### 4.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se emplea la aproximación metodológica recorriendo las etapas de Funcionalidad, Batería y Vestibilidad junto con las actividades planteadas en ellas. Se obtiene un prototipo funcional capaz de capturar datos de las actividades físicas descritas en la primera etapa. Dicha aproximación presenta de forma sencilla, organizada e ilustrada los fundamentos para el diseño de dispositivos wearables en las zonas inferiores del cuerpo humano planteando un enfoque de desarrollo lineal.

El tiempo de vida del dispositivo secundario wearable es de cientos de horas, lo cual cumple con las especificaciones de Bluetooth Low Energy que tratan de minimizar la potencia consumida y aumentar el tiempo de duración en funcionamiento a varios días obedeciendo con los requerimientos de batería planteados para el desarrollo de wearables.

El diseño del prototipo wearable con base en la aproximación metodológica definida en el trabajo, concluye ser una práctica guía de referencia para la elaboración de dispositivos wearable dentro de la academia superando retos como la duración de la batería, comunicación inalámbrica, procesamiento de datos y portabilidad. Además, el desarrollo del prototipo no demanda grandes recursos financieros, humanos ni de tiempo de trabajo.

## 5. CAPÍTULO V. EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO FUNCIONAL

La evaluación del prototipo wearable funcional diseñado con la aproximación se define en este capítulo. De esta manera, se explican las pruebas realizadas con los usuarios exponiendo los resultados obtenidos. Finalmente, se presenta un análisis estadístico descriptivo e inferencial de las señales captadas por el wearable.

### 5.1. PRUEBAS

En esta sección se ejecutan las pruebas al prototipo funcional realizado con la aproximación, más específicamente en la etapa de Funcionalidad. Cabe recordar que el dispositivo está dividido en dos partes: el módulo primario wearable y el módulo secundario wearable.

Para la recolección de los datos se deben ejecutar ambos módulos al mismo tiempo. De este modo, se establece una conexión entre ellos para el envío de información desde el módulo secundario wearable al primario. La evaluación del prototipo se realiza con tres usuarios los cuales cumplen con el perfil de usuario objetivo, planteado en la Tabla 4.1. La posición donde es ubicado el wearable, es el tobillo derecho exterior, como se indica en la Tabla 4.8.

En la Tabla 5.1, se presentan las características de los usuarios, junto con el lugar de realización de las pruebas. Estas personas cumplen con el perfil de usuario objetivo.

<b>Usuario 1</b>	
Nombre	Edwar Javier Girón Buitrón
Edad	25 años
Estatura	166 cm
Peso	66 kg
Lugar de la prueba	Facultad de Ingeniería Electrónica Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán
<b>Usuario 2</b>	
Nombre	Cristian Camilo Castillo Polindara
Edad	21 años
Estatura	179 cm
Peso	75 kg
Lugar de la prueba	Transversal 9A # 60N - 89 Piso 2, Popayán

<b>Usuario 3</b>	
Nombre	Andrés Fabián Tálaga Sandoval
Edad	28 años
Estatura	174 cm
Peso	86 kg
Lugar de la prueba	Transversal 9A # 60N - 89 Piso 2, Popayán

Tabla 5.1: Características de los usuarios que realizan las pruebas

En la Figura 5.1, se pueden apreciar los usuarios que realizan las pruebas, quienes tienen puesto el dispositivo en su cuerpo. Así mismo, en la Figura 5.2 se muestra la posición del wearable sobre el tobillo del usuario.



Figura 5.1: Usuarios quienes realizan las pruebas





Figura 5.2: Posicionamiento del wearable en el cuerpo del usuario

Para comenzar la prueba se configura un metrónomo<sup>1</sup> a 96 BPM para cada paso de baile, como lo indica la Tabla 4.2. La aplicación utilizada fue *Metronome Beats* versión 3.9.1 (disponible en la Tienda Play Store) la cual determina la velocidad del movimiento durante la prueba, el comienzo y el final de cada paso, con el fin de mantener un movimiento periódico lo máximo posible.

Así mismo, se realiza una marcación en el piso de la siguiente manera: una marca en el lado izquierdo, una en el lado derecho, una en el frente, otra en el centro y dos atrás. Esto con el objetivo de que las condiciones del experimento sean similares para las tres personas, como se observa en la Figura 5.1.

Cada marca tiene una distancia de 30 cm con respecto a la central, para así delimitar la zona de acción, es decir, el golpe del pie al realizar el paso de baile. Antes de la primera prueba de cada movimiento, se toma un vídeo donde se muestra la ejecución del paso de baile hecha por el individuo. Esto con el objetivo de parametrizar todas las muestras. En el Anexo D (digital), se encuentran los videos realizados de las pruebas con los usuarios.

Una vez la persona esté en posición, con ayuda del metrónomo se da inicio al movimiento “*Paso lateral*” e inmediatamente se inicia la aplicación Android desde el smartphone (módulo primario wearable) para recibir los datos de aceleración del wearable y almacenarlos. Como ya se ha definido previamente, en la duración del epoch, el usuario realiza el movimiento del paso de baile durante un minuto, logrando recolectar suficientes muestras. Al finalizar se detiene la comunicación entre módulos y se procede a transformar los datos en variables esperadas de la actividad física, vistas en la Tabla 4.3.

---

<sup>1</sup>Es un aparato, aplicación en este caso, que se utiliza para indicar tiempo o pulso de las composiciones musicales.

Cuando los datos se almacenan, se repite este proceso dos veces más con el mismo movimiento. Se hace exactamente igual para el “*Paso adelante-atrás*” y el “*Paso atrás-atrás*”, es decir, al final se tienen nueve conjuntos de datos provenientes de tres señales captadas de los tres pasos de baile. Este mismo procedimiento se realiza con los demás usuarios.

En la Figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5 se describen los movimientos a estudiar, denominados, en su orden “*Paso Lateral*”, “*Paso Adelante-atrás*” y “*Paso Atrás-atrás*”.

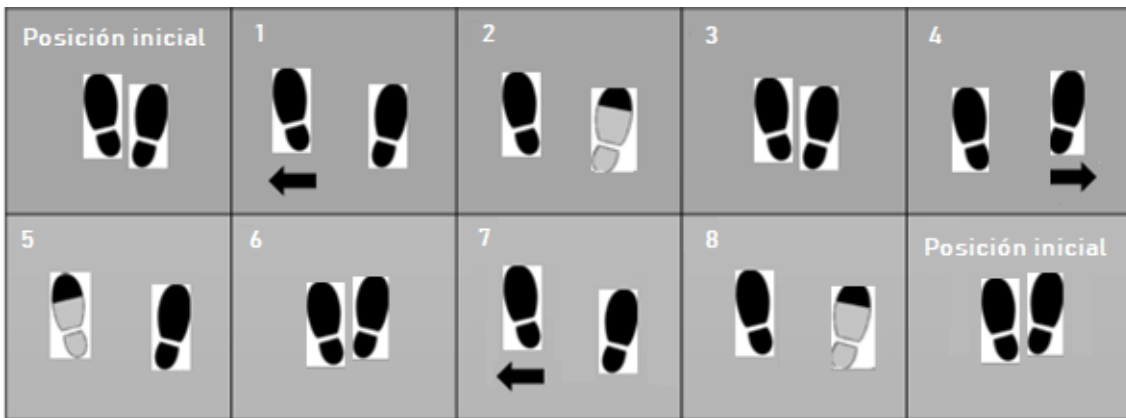


Figura 5.3: Caracterización del movimiento paso lateral. Fuente propia



Figura 5.4: Caracterización del movimiento paso adelante-atrás. Fuente propia

donde significa que el pie está asentado contra el suelo y es cuando hace un levantamiento leve de la planta del pie, flexionando la rodilla y dejando la punta del pie sobre el suelo.



Figura 5.5: Caracterización del movimiento paso atrás-atrás. Fuente propia

Los datos de aceleración capturados en cada repetición son transformados en su valor de magnitud total mediante la Ecuación 5.1.

$$At = \sqrt{Ax^2 + Ay^2 + Az^2} \quad (5.1)$$

donde  $At$ : Magnitud de aceleración total

$Ax$ : Aceleración en el eje  $x$

$Ay$ : Aceleración en el eje  $y$

$Az$ : Aceleración en el eje  $z$

## 5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO

El análisis descriptivo, como su nombre lo indica, describe y resume las observaciones obtenidas sobre un fenómeno. Ayuda a comprender la estructura de los datos, para así detectar tanto un patrón de comportamiento general como apartamientos del mismo [71]. Una forma de realizar ésto es mediante gráficos de sencilla realización e interpretación.

Así que, con la magnitud total de aceleración y mediante el uso de histogramas se calcula el valor estadístico de la media y desviación estándar de las señales brutas y filtradas.

La gráfica de las señales de magnitud de aceleración total en una ventana para los tres usuarios realizando el primero, segundo y tercer movimiento, se observan en la Figura 5.6, Figura 5.8 y Figura 5.10 respectivamente. De la misma manera, la Figura 5.7, Figura 5.9 y Figura 5.11 son gráficas de la misma señal pero durante todo el tiempo del experimento, es decir, un minuto. Esto con el fin de observar la periodicidad de la información.

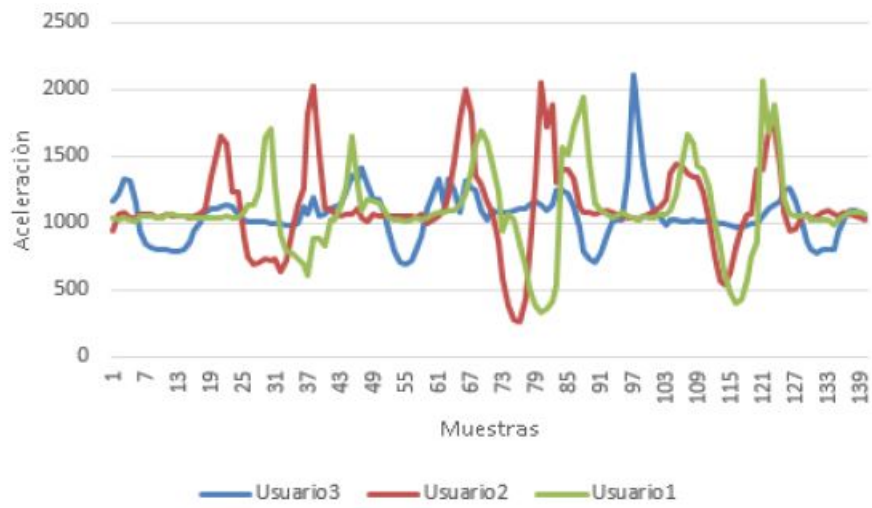


Figura 5.6: Gráfica de magnitud de aceleración total en una ventana de tiempo. Primer movimiento

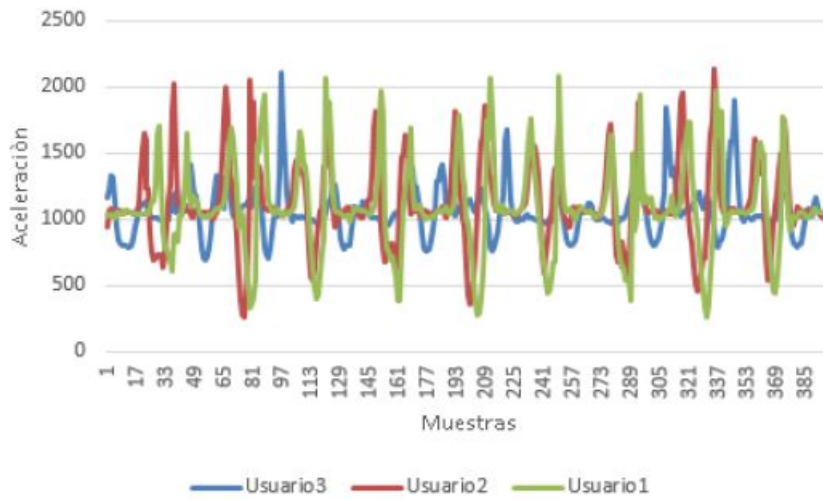


Figura 5.7: Gráfica de magnitud de aceleración total durante todo el tiempo de prueba. Primer movimiento - 1 minuto

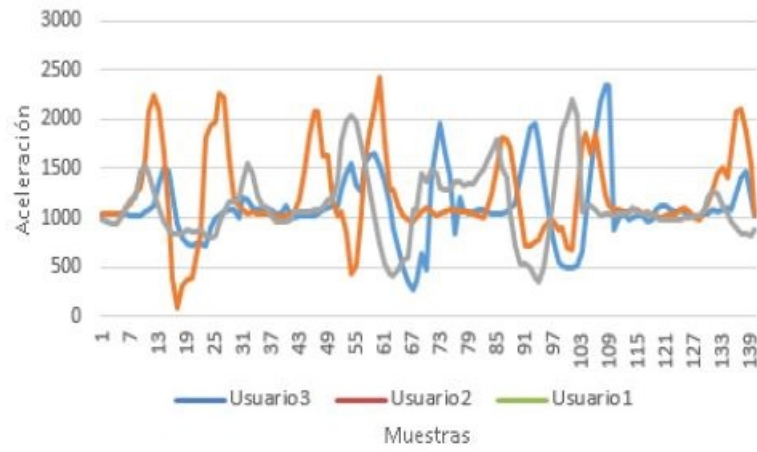


Figura 5.8: Gráfica de magnitud de aceleración total en una ventana de tiempo. Segundo movimiento

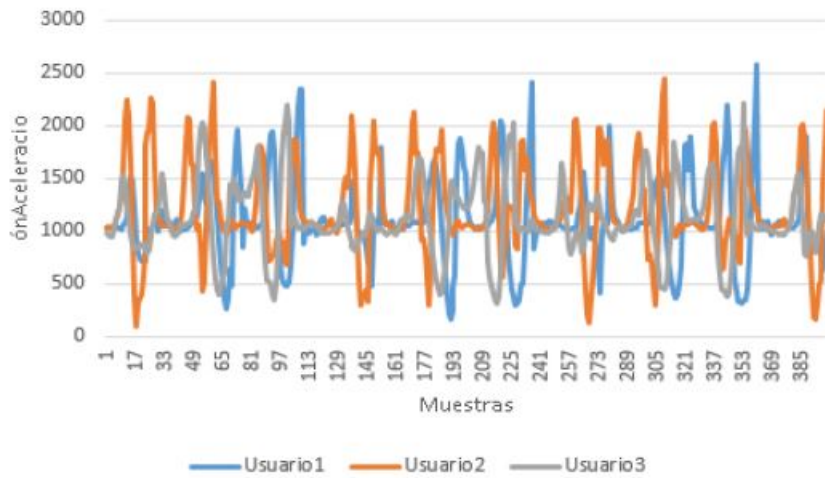


Figura 5.9: Gráfica de magnitud de aceleración total durante todo el tiempo de prueba. Segundo movimiento - 1 minuto

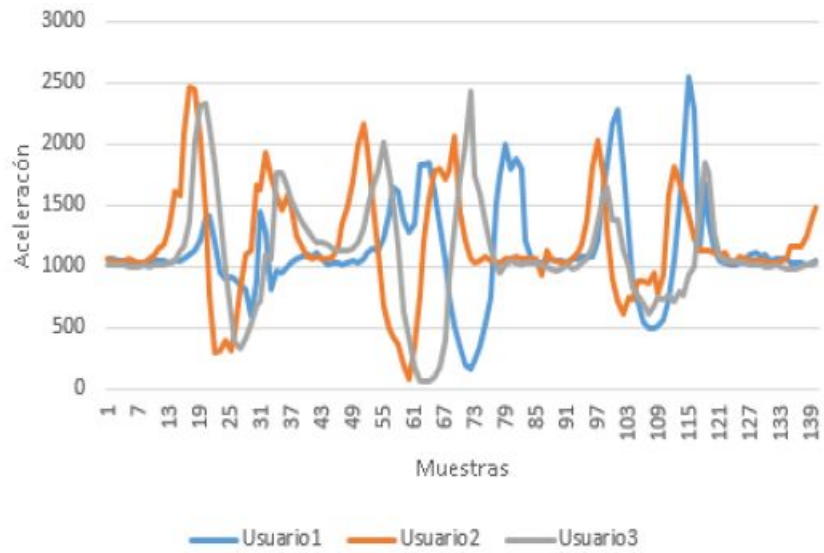


Figura 5.10: Gráfica de magnitud de aceleración total en una ventana de tiempo. Tercer movimiento

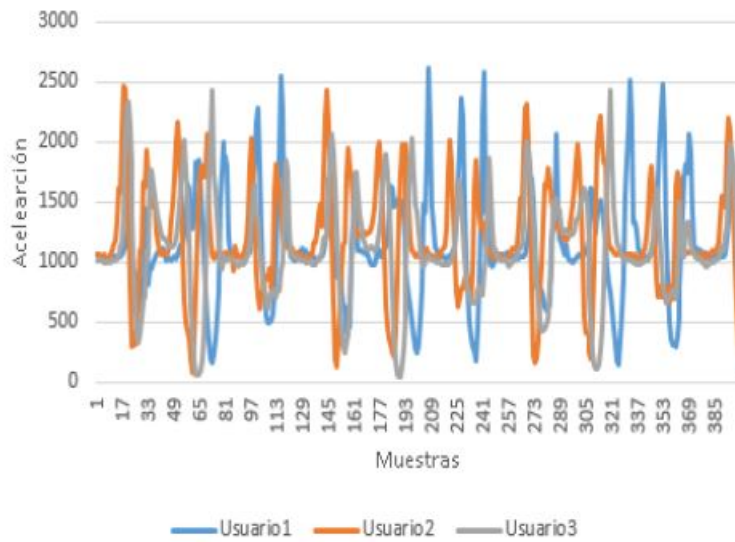


Figura 5.11: Gráfica de magnitud de aceleración total durante todo el tiempo de prueba. Tercer movimiento - 1 minuto

De las anteriores gráficas se aprecia que los tres pasos de baile se generan alrededor de las 130 muestras, equivalente a 96 BPM o una ventana. También, se nota que estas señales van por debajo de 1000 *mg* cuando se disminuye la aceleración debido a un golpe con el suelo.

El desfase de las señales entre usuarios es evidente, aún así, la forma de la gráfica mantiene una constancia entre máximos y mínimos para todos los usuarios y movimientos realizados. Este desfase se debe al margen de error al momento del inicio del movimiento con cada usuario.

Ahora, en la aplicación del módulo primario se gráficán los distintos valores de la media y desviación estándar de la señal dividida en ventanas de 130 muestras para cada usuario realizando el primero, segundo y tercer movimiento. Estas se observan en la Figura 5.12, Figura 5.14 y Figura 5.16 respectivamente. De la misma manera, la Figura 5.13, Figura 5.15 y Figura 5.17 son gráficas del valor de la media y desviación estándar de la misma señal pero durante todo el tiempo de la prueba, es decir, un minuto.

Este valor de 130 muestras se explica más adelante, en el análisis de correlación Pearson.

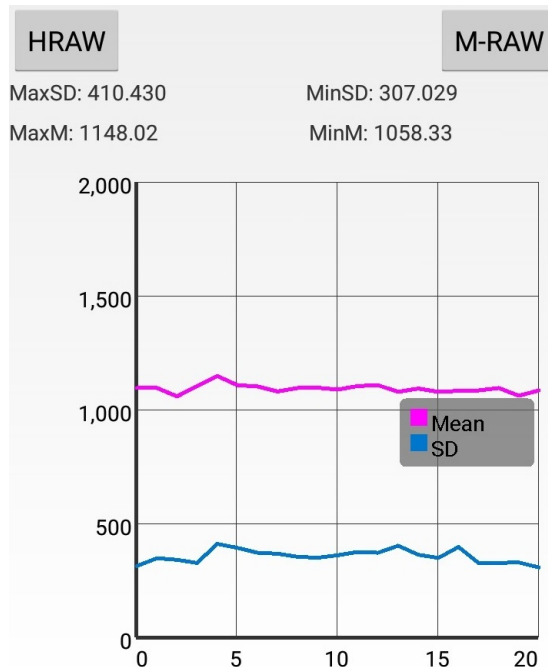


Figura 5.12: Gráfica de los valores máximos y mínimos de la media y desviación estándar por ventanas de la señal bruta. Primer movimiento

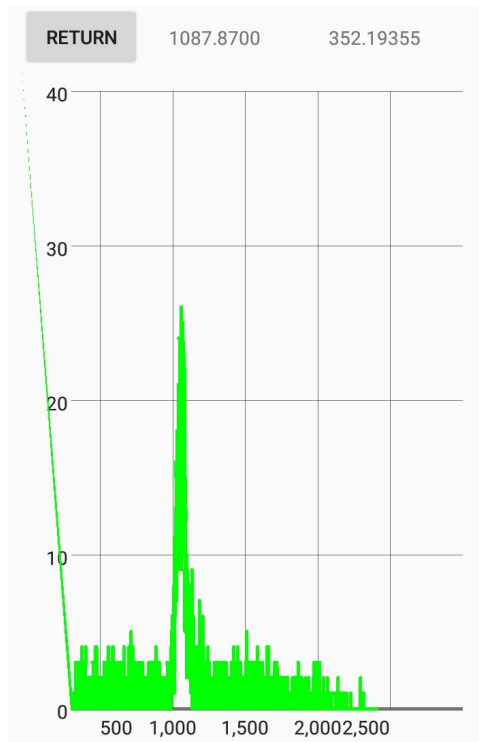


Figura 5.13: Histograma con la media y desviación estándar de toda la señal bruta. Primer movimiento

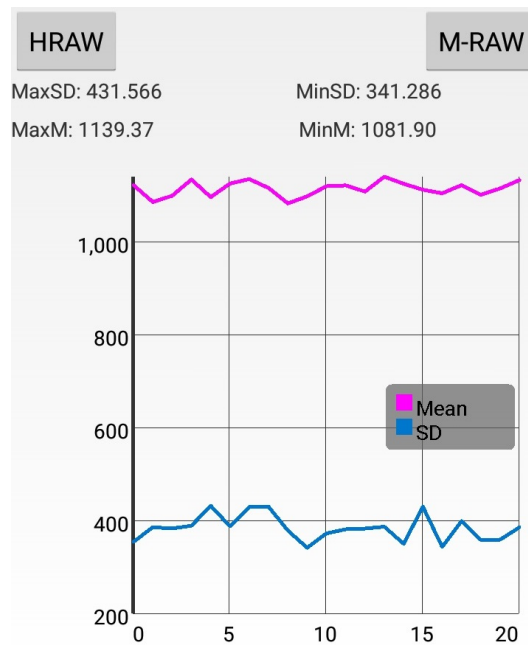


Figura 5.14: Gráfica de los valores máximos y mínimos de la media y desviación estándar por ventanas. Segundo movimiento



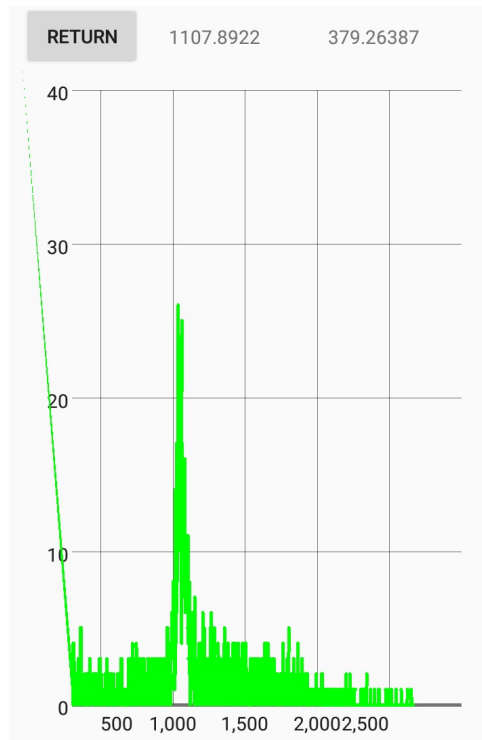


Figura 5.15: Histograma con la media y desviación estándar de toda la señal bruta. Segundo movimiento

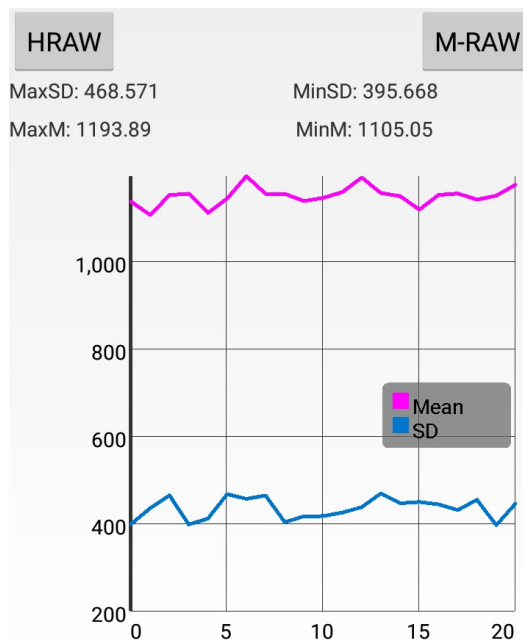


Figura 5.16: Gráfica de los valores máximos y mínimos de la media y desviación estándar por ventanas. Tercer movimiento

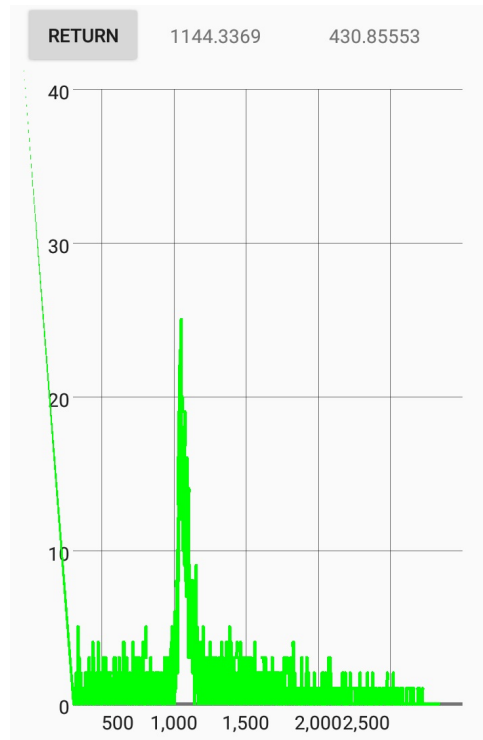


Figura 5.17: Histograma con la media y desviación estándar de toda la señal bruta. Tercer movimiento

De las anteriores gráficas se alcanzan a detectar 20 movimientos continuos. Además, los valores máximos y mínimos presentados en la parte superior de la gráfica establecen el rango en donde se encuentran las características estadísticas de la señal en cada ventana.

Por otra parte, los histogramas de la señal determinan que la conducta de la actividad estudiada aparentemente tiene una tendencia no normal debido a su base plana y máximo elevado. Además, se aprecia el cálculo de la media y la desviación estándar de la señal total. También es importante señalar que los resultados de media y desviación estándar resultantes del histograma, se localizan dentro de los límites de la señal dividida por ventanas, concluyendo así que la señal total representa el movimiento de baile estudiado y que existe una periodicidad en la información capturada.

Finalmente, las gráficas de la señal con los filtros MAF, BUILT.IO Y BMF aplicados a la señal original (datos brutos) del primer movimiento para todos los usuarios, se presentan en la Figura 5.18, Figura 5.19 y Figura 5.20 respectivamente. Así mismo, los valores estadísticos de la media y la desviación estándar (de la señal pura y filtrada) obtenidos con el uso de histogramas y ventanas del primer movimiento para todos los usuarios son planteados en la Tabla 5.2, Tabla 5.3, Tabla 5.4, Tabla 5.5, Tabla 5.6, Tabla 5.7, Tabla 5.8 y Tabla 5.9.

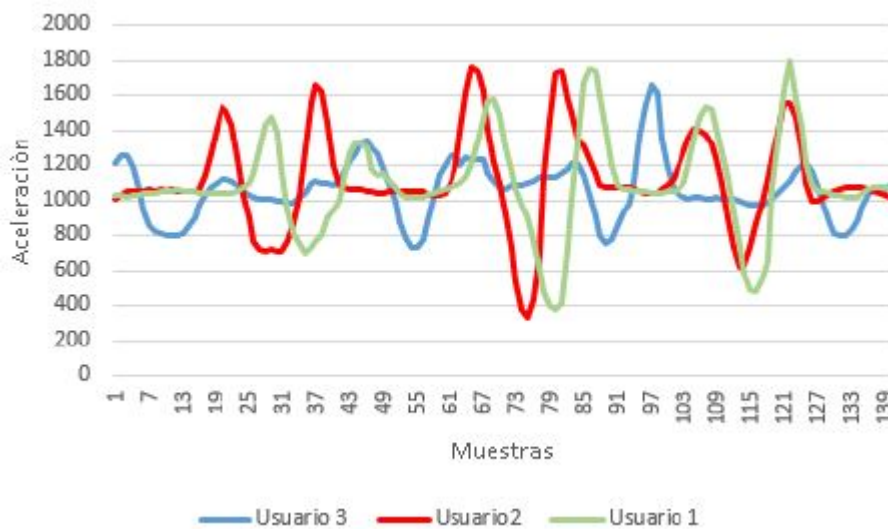


Figura 5.18: Gráfica de magnitud total de aceleración aplicado el filtro MAF. Primer movimiento

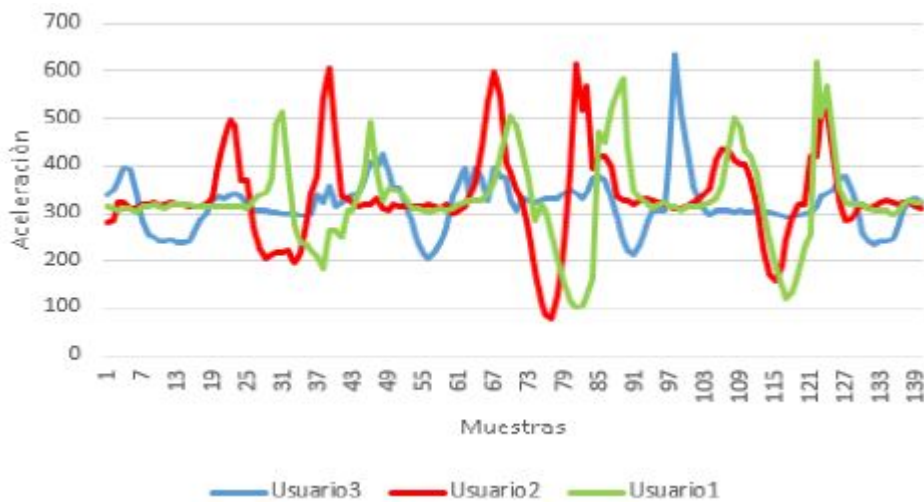


Figura 5.19: Gráfica de magnitud total de aceleración aplicado el filtro BUILT.IO. Primer movimiento

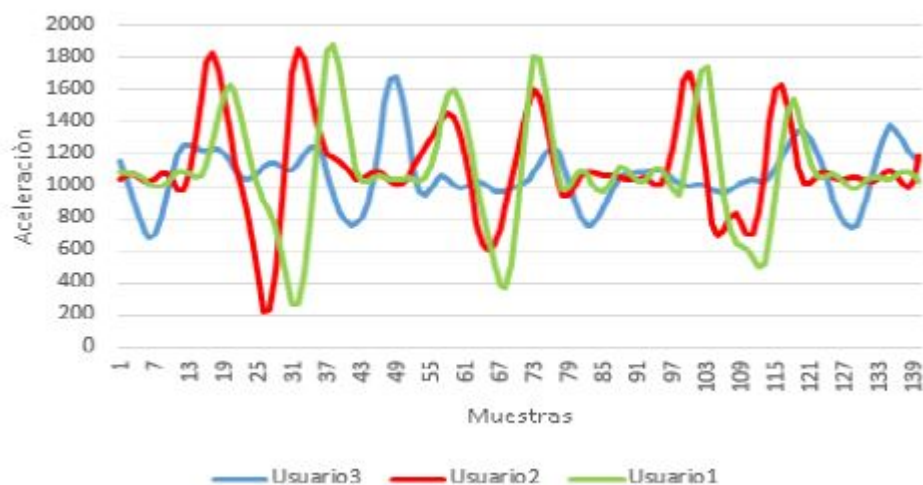


Figura 5.20: Gráfica de magnitud total de aceleración aplicado el filtro BMF. Primer movimiento

Usuario	Repetición	Valor Media Mínimo	Valor Media Máximo	Valor Media Exacto
1	1	1058.33	1148.02	1087.870
	2	1053.58	1126.06	1084.635
	3	1051.71	1119.25	1081.797
2	1	1101.69	1158.52	1102.004
	2	1101.54	1168.68	1118.167
	3	1118.99	1179.43	1144.158
3	1	1035.82	1078.48	1040.086
	2	1040.14	1068.02	1026.012
	3	1028.16	1090.20	1043.151

Tabla 5.2: Valores de la media de aceleración bruta. Primer movimiento

Usuario	Repetición	Valor DE Mínimo	Valor DE Máximo	Valor DE Exacto
1	1	307.03	410.43	352.194
	2	273.48	368.38	326.086
	3	286.42	395.70	335.251
2	1	285.87	352.89	302.723
	2	293.13	359.56	315.724
	3	290.02	385.25	341.313
3	1	148.47	220.33	162.227
	2	121.41	213.05	136.165
	3	142.04	221.40	158.923

Tabla 5.3: Valores de la desviación estándar de aceleración bruta. Primer movimiento

<b>Usuario</b>	<b>Repetición</b>	<b>Valor Media Mínimo</b>	<b>Valor Media Máximo</b>	<b>Valor Media Exacto</b>
1	1	1065.71	1149.20	1091.730
	2	1056.16	1125.49	1085.440
	3	1052.23	1123.77	1085.440
2	1	1104.95	1153.94	1131.020
	2	1101.76	1168.91	1134.020
	3	1120.81	1172.92	1148.880
3	1	1040.34	1079.51	1057.360
	2	1037.94	1069.96	1051.210
	3	1031.95	1089.84	1051.520

Tabla 5.4: Valores de la media de aceleración bruta con filtro MAF. Primer movimiento

<b>Usuario</b>	<b>Repetición</b>	<b>Valor DE Mínimo</b>	<b>Valor DE Máximo</b>	<b>Valor DE Exacto</b>
1	1	267.53	347.06	302.670
	2	236.56	310.44	277.840
	3	238.28	337.72	288.100
2	1	248.23	301.62	276.940
	2	252.23	311.40	283.030
	3	250.03	328.67	296.740
3	1	130.85	180.29	159.510
	2	108.60	180.00	142.040
	3	127.09	193.41	151.400

Tabla 5.5: Valores de la desviación estándar de aceleración bruta con filtro MAF. Primer movimiento

<b>Usuario</b>	<b>Repetición</b>	<b>Valor Media Mínimo</b>	<b>Valor Media Máximo</b>	<b>Valor Media Exacto</b>
1	1	317.50	344.41	327.510
	2	316.07	337.82	325.382
	3	315.51	335.78	324.543
2	1	330.51	347.56	339.290
	2	330.46	350.60	340.180
	3	335.70	353.83	344.580
3	1	310.75	323.55	317.230
	2	312.04	320.41	315.350
	3	308.45	327.06	315.460

Tabla 5.6: Valores de la media de aceleración bruta con filtro BUILT.IO. Primer movimiento

Usuario	Repetición	Valor DE Mínimo	Valor DE Máximo	Valor DE Exacto
1	1	92.11	123.13	105.661
	2	82.04	110.52	97.831
	3	85.93	118.71	100.587
2	1	85.76	105.87	96.260
	2	87.94	107.87	97.930
	3	87.01	115.57	103.490
3	1	44.54	66.10	55.330
	2	36.42	63.91	49.120
	3	42.61	66.42	51.100

Tabla 5.7: Valores de la desviación estándar de aceleración bruta con filtro BUILT.IO. Primer movimiento

Usuario	Repetición	Valor Media Mínimo	Valor Media Máximo	Valor Media Exacto
1	1	1057.33	1130.99	1088.273
	2	1060.72	1118.17	1086.970
	3	1057.06	1117.88	1086.850
2	1	1089.49	1163.16	1133.120
	2	1112.67	1157.50	1135.720
	3	1128.72	1173.14	1148.730
3	1	1042.17	1072.29	1057.750
	2	1035.21	1079.37	1051.710
	3	1036.86	1070.97	1051.130

Tabla 5.8: Valores de la media de aceleración bruta con filtro BMF. Primer movimiento

Usuario	Repetición	Valor DE Mínimo	Valor DE Máximo	Valor DE Exacto
1	1	305.42	393.35	339.432
	2	240.55	357.94	315.220
	3	268.80	390.37	321.840
2	1	280.47	347.54	312.160
	2	285.61	362.95	320.610
	3	286.03	362.74	336.390
3	1	159.25	205.50	175.660
	2	127.03	193.63	154.42
	3	139.42	211.48	163.210

Tabla 5.9: Valores de la desviación estándar de aceleración bruta con filtro BMF. Primer movimiento

El comportamiento al aplicar el filtro *Moving Average Filter* es un suavizado en la señal donde los datos aumentan la similitud entre ellos para todas las columnas y la desviación estándar disminuye aumentando la certeza de la información. Con el filtro *Built.io* se mantiene la forma de la señal pero disminuye la amplitud de todos los datos. Finalmente, el filtro *Blackman Filter* muestra que la similitud de los datos entre muestras aumenta pero la desviación estándar se mantiene igual.

Aún así, los cambios en los datos no son muy notorios lo que demuestra que los experimentos se realizaron en ambientes libres de ruido eléctrico. También, se evidencia una diferencia entre las señales de diferentes pasos de baile, demostrando la individualidad de cada muestra. Esto es reflejado con mayor fuerza en el análisis inferencial descrito en la siguiente sección.

### 5.2.1. Coeficiente de Correlación Pearson

El “*Coeficiente de Correlación de Pearson*” es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas [72]. A diferencia de la covarianza, la correlación Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. Los rangos de valor van de  $+1$  a  $-1$ , lo que indica una perfecta relación lineal positiva y negativa respectivamente entre ambas variables. Un valor de  $0$  aparece cuando no existe correlación.

Así, para comprobar la suposición de que las señales estudiadas son periódicas se realiza un análisis de Correlación Pearson del movimiento “Paso lateral” para cada uno de los tres usuarios del experimento en la tercera repetición. Así, se tendría un máximo positivo ( $+1$ ), o muy cercano a este valor, en caso de que a medida que cambie una variable, la otra también lo haga exactamente.

Para realizar el análisis se toma una variable para ser comparada consigo misma y así, encontrar cuando existe periodicidad. Por tanto, se despliega en dos columnas diferentes la misma variable y se hacen una serie de iteraciones las cuales consisten en efectuar la correlación de Pearson entre las dos columnas. En cada iteración se desfasa una de las columnas con respecto a la otra, dando como resultado máxima correlación positiva en la primera iteración cuando son exactamente iguales. La Figura 5.21 muestra los resultados de este análisis.

Al desfasar los datos se observan máximos más cercanos en periodos de 126 muestras para los tres usuarios, lo que concuerda casi exactamente con nuestro supuesto de periodicidad. Por tanto, el hecho de que los tres usuarios tengan la misma periodicidad en la información indica que el uso del metrónomo logra que las pruebas se realicen con buena precisión.

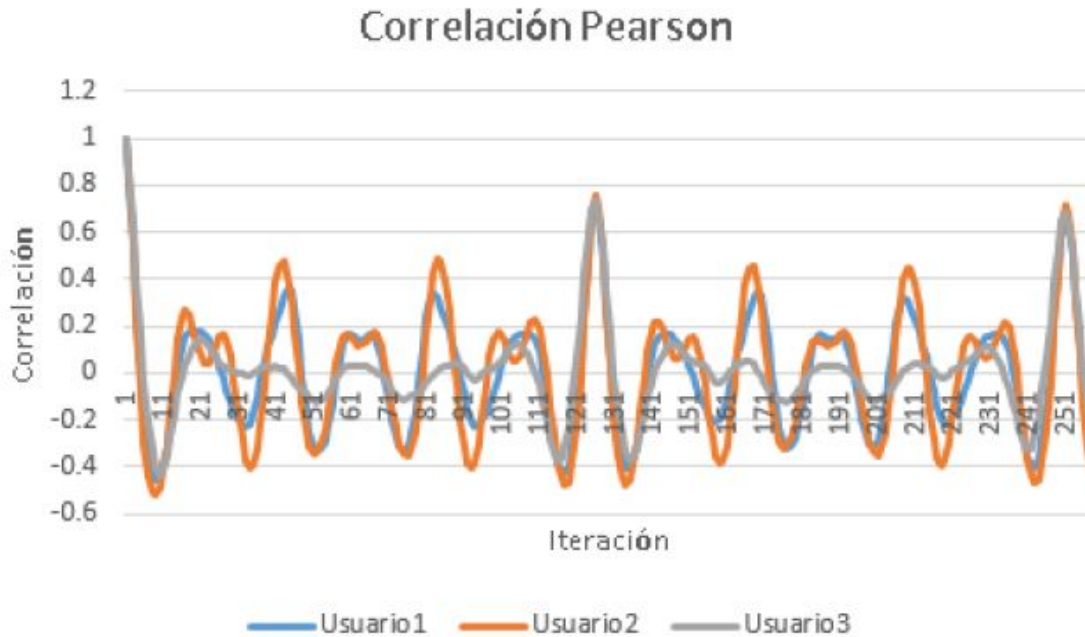


Figura 5.21: Resultados del análisis de Correlación Pearson para todos los usuarios en el segundo movimiento

### 5.2.2. Tests de Normalidad

Para verificar que las variables son normalmente distribuidas se realiza un test de normalidad con el software SPSS. Los datos obtenidos se aprecian en la Tabla 5.10.

	Statistic	Std. Error	Statistic/Std. Error
<b>Kurtosis</b>	0.707	0.077	9.18
<b>Skewness</b>	1.793	0.154	11.64

Tabla 5.10: Kurtosis y Skewness de la señal para el paso adelante-atrás del usuario 1. Fuente: SPSS

Para tener una distribución normal es necesario que la división entre los datos de *Statistic* y *Std. Error* estén contenidos en un rango entre -1.96 y 1.96. Por lo anterior, el primer test indica que la señal tiene una *distribución no normal*.

El siguiente test, realizado en SPSS, es el *Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnova Test Statistic* [73]. Para este test, la hipótesis nula siempre será que “*la información es normalmente distribuida*”. Esta hipótesis será rechazada en caso de que el valor de significancia sea menor a 0.05. Los resultados de este test se presentan en la Tabla 5.11.



Tests de Normalidad						
	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Aceleración	0.091	1004	0.000	0.956	1004	0.000

Tabla 5.11: Test de normalidad de la señal para el paso adelante-atrás del usuario 1. Fuente: SPSS

Como se observa, los valores de significancia son inferiores a 0.05 para ambos test. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula indicando que la señal tiene una *distribución no normal*.

### 5.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL

El análisis de estadística inferencial comprende métodos y técnicas que se usan para modelar patrones en los datos y extraer inferencias acerca de la población bajo estudio [74]. Con ello se transforma la información en conocimiento. En este caso, el análisis sirve para mostrar el comportamiento general de la señal y permite validar la confiabilidad del dispositivo previamente diseñado.

En este punto se tienen dos variables cuantitativas: aceleración y datos de correlación Pearson, y dos variables cualitativas: usuario y prueba. Además, a partir del análisis estadístico descriptivo se comprueba que son señales de distribución no normal, por lo tanto al tener variables cuantitativas, cualitativas y cuya distribución de sus señales es no normal se opta por utilizar el test *U de Mann Whitney* [75] con ayuda del software *SPSS Statistics* para determinar la similitud entre los resultados.

Este tipo de prueba compara dos conjuntos de datos diferentes clasificados por grupo para asegurar o negar ciertas hipótesis nulas del problema. Se define la primera hipótesis nula como: “*Los datos cíclicos obtenidos con el análisis Pearson entre usuarios del mismo movimiento y misma repetición no son distintos*” y como segunda hipótesis nula: “*Los datos entre pruebas del mismo usuario, movimiento y repetición no son diferentes*”. Así, se determina la veracidad de la información y se infiere la conducta estadística de los movimientos físicos estudiados, además de observar la eficacia de los filtros.

#### 5.3.1. Primera Hipótesis Nula

Para responder la primera hipótesis se realiza una comparación entre usuarios. A cada banco de datos de los usuarios se le efectúa un análisis para encontrar su periodicidad utilizando la herramienta *Microsoft Excel* para la correlación Pearson. Con estos datos se procede a realizar el test.

Con U de Mann Whitney es posible definir si dos señales independientes con distribución

no normal son estadísticamente similares, para esto se plantea una hipótesis nula  $H_0$  la cual debe confirmar la igualdad estadística entre dos bancos de datos y una hipótesis alternativa  $H_1$  que niega la primera hipótesis. El valor entregado por SPSS con el cual se niega o acepta la  $H_0$  es el  $p$ -value<sup>2</sup>. En caso de que el valor de  $p$ -value sea menor a 0.05 se niega la hipótesis nula, de lo contrario se acepta.

Una vez obtenido los resultados de SPSS, ver Figura 5.22, se observa que todos los test U de Mann Whitney entre movimientos de diferentes usuarios arrojan valores  $p$ -value mayores a 0.05, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula: “*Los datos cíclicos obtenidos con el análisis Pearson entre usuarios del mismo movimiento y misma repetición no son distintos*”. Es importante resaltar que este análisis se realiza con valores de Correlación Pearson para la tercera repetición.

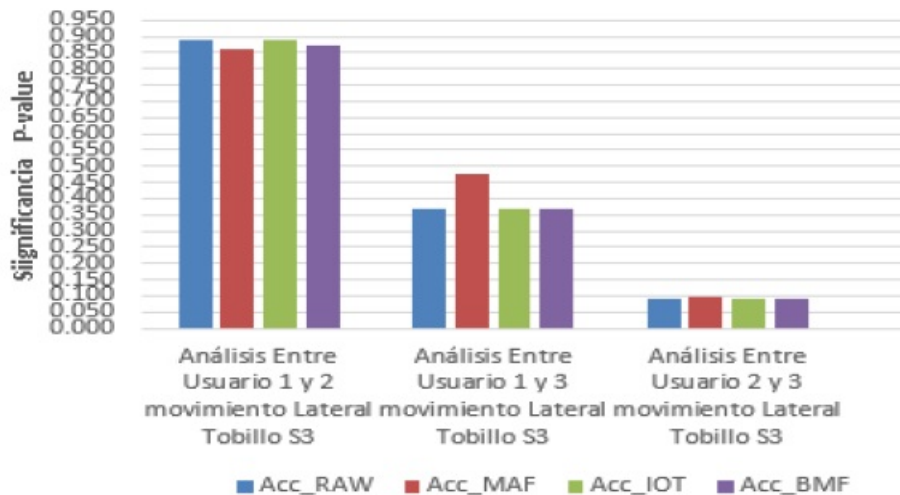


Figura 5.22: Resultados  $p$ -value del test U de Mann Whitney entre usuarios. Movimiento lateral, tercera repetición

### 5.3.2. Segunda Hipótesis Nula

Para comprobar la segunda hipótesis nula, con SPSS se realizan tests U de Mann Whitney entre señales del mismo movimiento e igual usuario, comprobando si los datos capturados por el prototipo wearable representan el paso de baile o son aleatorios.

En la Tabla 5.12, Tabla 5.13 y Tabla 5.14 se encuentra el resultado de todos los  $p$ -value hallados al realizar estos test. La columna *Comparación* son los pasos de baile con las repeticiones a comparar. Las demás columnas muestran los valores  $p$ -value de la

<sup>2</sup> $p$ -value se define como la probabilidad correspondiente al estadístico de ser posible bajo la hipótesis nula.

señal de *Aceleración bruta (datos puros)* y la señal filtrada con *MAF*, *BUILT.IO* y *BMF*, respectivamente.

<b>Comparación</b>	<b>Aceleración bruta</b>	<b>Aceleración MAF</b>	<b>Aceleración BUILT.IO</b>	<b>Aceleración BMF</b>
1ra-2da repetición Paso adelante-atrás	0.179	0.211	0.183	0.415
1ra-3ra repetición Paso adelante-atrás	0.328	0.246	0.335	0.389
2da-3ra repetición Paso adelante-atrás	0.712	0.935	0.711	0.929
1ra-2da repetición Paso lateral	0.209	0.126	0.211	0.363
1ra-3ra repetición Paso lateral	0.398	0.236	0.422	0.299
2da-3ra repetición Paso lateral	0.709	0.756	0.679	0.871
1ra-2da repetición Paso atrás-atrás	0.908	0.765	0.934	0.663
1ra-3ra repetición Paso atrás-atrás	0.440	0.269	0.444	0.360
2da-3ra repetición Paso atrás-atrás	0.516	0.426	0.500	0.170
<b>Total promedio</b>	<b>0.489</b>	<b>0.441</b>	<b>0.491</b>	<b>0.496</b>

Tabla 5.12: Resultados p-value del test U de Mann Whitney para el usuario 1

<b>Comparación</b>	<b>Aceleración bruta</b>	<b>Aceleración MAF</b>	<b>Aceleración BUILT.IO</b>	<b>Aceleración BMF</b>
1ra-2da repetición Paso adelante-atrás	0.764	0.838	0.799	0.659
1ra-3ra repetición Paso adelante-atrás	0.406	0.517	0.415	0.364
2da-3ra repetición Paso adelante-atrás	0.607	0.666	0.585	0.639
1ra-2da repetición Paso lateral	0.550	0.544	0.555	0.498
1ra-3ra repetición Paso lateral	0.081	0.039	0.082	0.038
2da-3ra repetición Paso lateral	0.253	0.144	0.253	0.152

1ra-2da repetición Paso atrás-atrás	0.509	0.340	0.517	0.581
1ra-3ra repetición Paso atrás-atrás	0.323	0.164	0.318	0.118
2da-3ra repetición Paso atrás-atrás	0.734	0.673	0.718	0.329
<b>Total promedio</b>	<b>0.470</b>	<b>0.436</b>	<b>0.472</b>	<b>0.375</b>

Tabla 5.13: Resultados p-value del test U de Mann Whitney para el usuario 2

Comparación	Aceleración bruta	Aceleración MAF	Aceleración BUILT.IO	Aceleración BMF
1ra-2da repetición Paso adelante-atrás	0.594	0.471	0.572	0.346
1ra-3ra repetición Paso adelante-atrás	0.212	0.134	0.213	0.137
2da-3ra repetición Paso adelante-atrás	0.448	0.385	0.467	0.546
1ra-2da repetición Paso lateral	0.212	0.166	0.199	0.272
1ra-3ra repetición Paso lateral	0.842	0.988	0.848	0.707
2da-3ra repetición Paso lateral	0.137	0.148	0.129	0.438
1ra-2da repetición Paso atrás-atrás	0.650	0.633	0.645	0.385
1ra-3ra repetición Paso atrás-atrás	0.777	0.731	0.800	0.972
2da-3ra repetición Paso atrás-atrás	0.469	0.433	0.483	0.388
<b>Total promedio</b>	<b>0.482</b>	<b>0.454</b>	<b>0.484</b>	<b>0.466</b>

Tabla 5.14: Resultados p-value del test U de Mann Whitney para el usuario 3

Con los valores de las tablas anteriores se analiza la significancia, las cuales se observan en la Figura 5.23, Figura 5.24 y Figura 5.25 concluyendo que todos los resultados p-value son mayores a 0.05, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula “*Los datos entre pruebas del mismo usuario, movimiento y repetición no son diferentes*” demostrando así que el dispositivo diseñado es capaz de capturar el movimiento de baile realizado por el usuario.

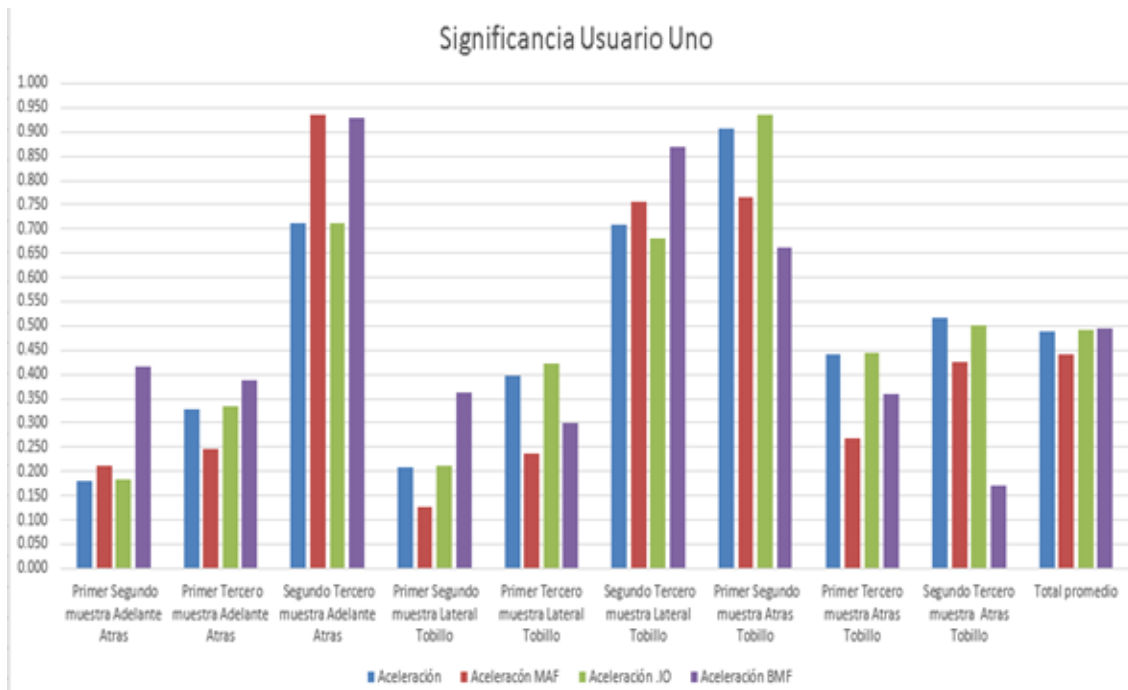


Figura 5.23: Valores de significancia del usuario 1

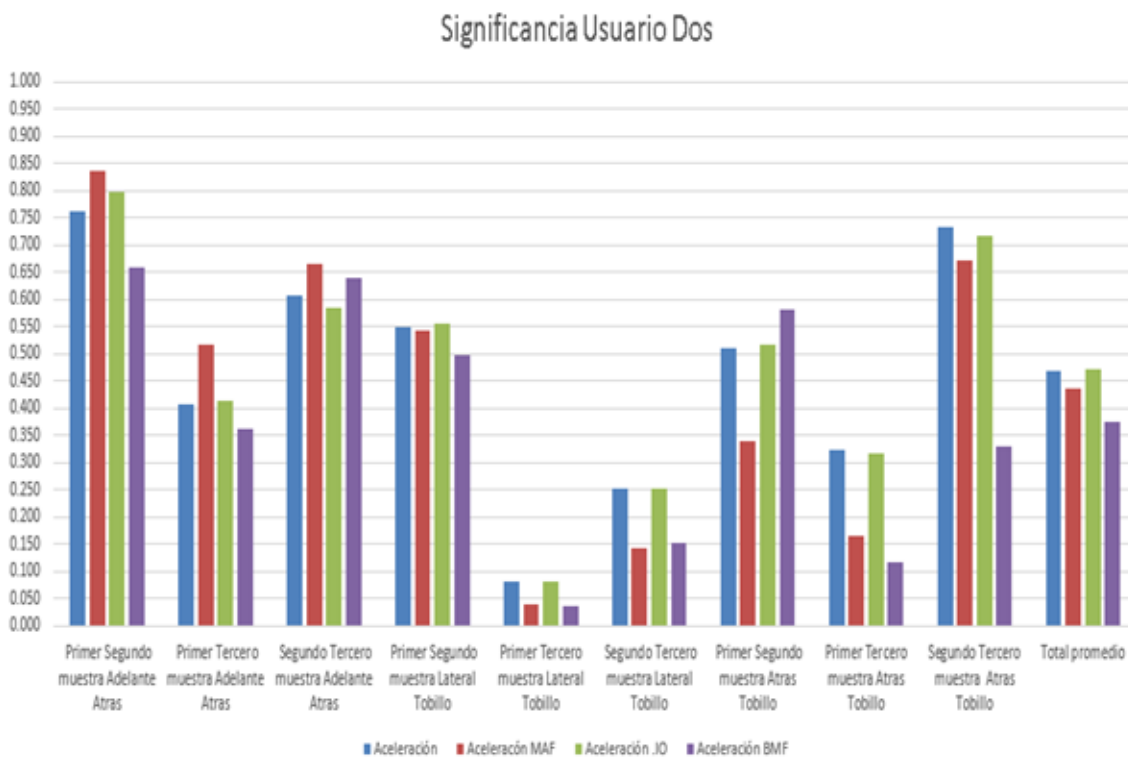


Figura 5.24: Valores de significancia del usuario 2

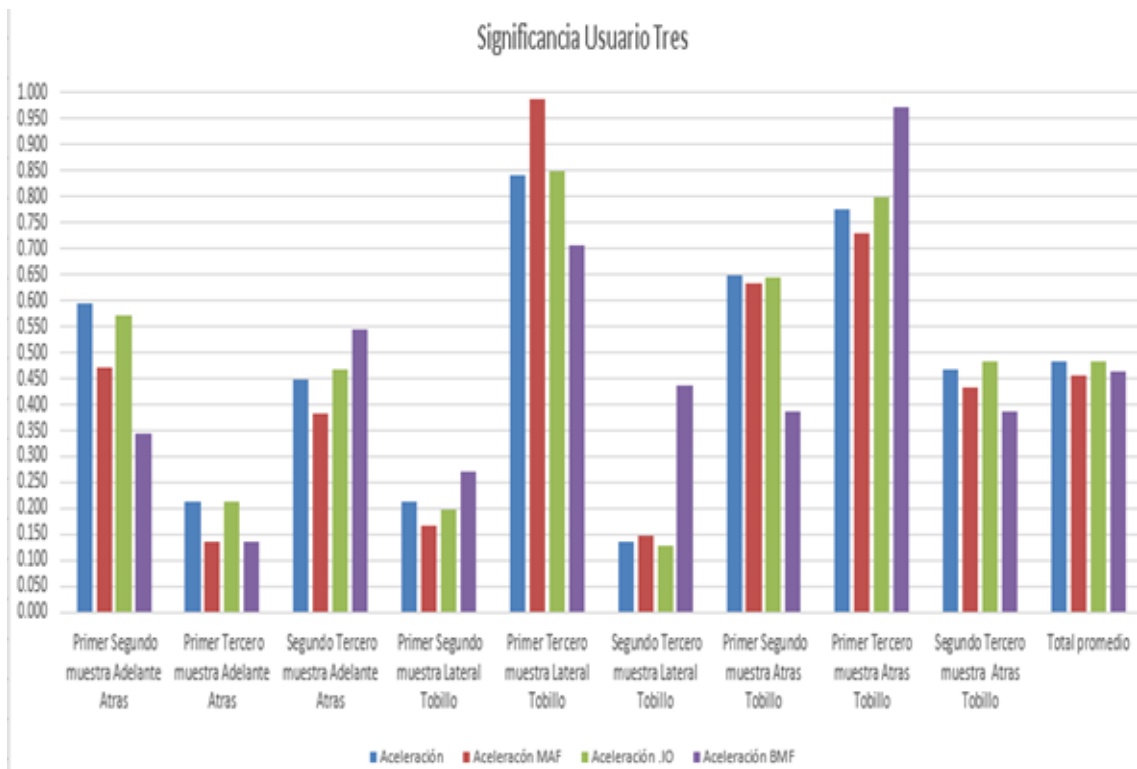


Figura 5.25: Valores de significancia del usuario 3

De las gráficas anteriores se concluye que el uso de filtros pasa baja BlackMan y Moving Average Filter no ayuda a mejorar la significancia p-value de la señal, por el contrario tiende disminuirla, lo que implica que aunque la muestra sea suavizada y se eliminen picos no deseados, se pierden características esenciales de ésta. Exceptuando el filtro BUILT.IO que, aunque no elimina las frecuencias altas de la señal, la vuelve más estable y con mayor significancia.

Con los análisis realizados se determina el comportamiento de las señales para los movimientos de salsa planteados. La estadística descriptiva muestra que los datos tienen un comportamiento periódico. Se observa mediante los histogramas y los tests de normalidad que las distribuciones de los datos son no normales lo que permite utilizar el test U de Mann Whitney determinando que los datos recogidos con el acelerómetro son confiables. Esto afirma que se ha construido un prototipo wearable funcional, mediante la aproximación metodológica diseñada, que cumple los requisitos inicialmente planteados.

## 5.4. CONCLUSIONES

La señal capturada del movimiento de cada usuario es periódica, con ciclos de 126 muestras, según lo encontrado al realizar varios análisis de Correlación Pearson con los datos capturados.

Con ayuda del test U de Mann Whitney y los datos de Correlación Pearson se concluye que los datos obtenidos de varias iteraciones entre usuarios diferentes en el mismo movimiento son estadísticamente similares entre sí.

Los datos recolectados por el mismo usuario con el dispositivo prueban ser estadísticamente similares. Esto se comprueba mediante el test U de Mann Whitney aceptando la segunda hipótesis nula.

Con la información capturada con el dispositivo, obtenido de la aproximación metodológica previamente elaborada, y los resultados encontrados en los diferentes análisis permiten comprobar que se ha construido un dispositivo wearable funcional y confiable.





## 6. CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A continuación se recopilan las principales conclusiones basadas en los objetivos del proyecto y el desarrollo de los mismos. Igualmente, se presentan recomendaciones acerca de posibles trabajos futuros.

### 6.1. CONCLUSIONES

- Se ha elaborado una aproximación metodológica dirigida a las partes inferiores del cuerpo humano, basada en los resultados obtenidos de un análisis bibliométrico y revisión documental con ayuda de herramientas computacionales para la visualización de tendencias y patrones en la literatura científica.
- Del análisis con el software CiteSpace, no toda la información ofrece aportes útiles para el desarrollo del trabajo, por tanto, es necesario realizar una revisión manual a los datos obtenidos con el objetivo de identificar las bases del conocimiento científico buscado.
- La aproximación metodológica elaborada define tres etapas de diseño, denominadas Funcionalidad, Batería y Vestibilidad, donde se plantean actividades en cada una de ellas con el fin de implementar soluciones tipo wearable, capaces de capturar datos de determinadas actividades físicas. Esta planteada desde un enfoque de desarrollo lineal para organizar de forma clara y sencilla los fundamentos del diseño de dispositivos wearable en las zonas inferiores del cuerpo humano.
- El tiempo de vida útil de la batería del prototipo wearable, más exactamente del módulo secundario wearable, se ha calculado para durar cientos de horas de uso moderado. Por tanto, se cumple con las especificaciones de Bluetooth Low Energy que tratan de minimizar la potencia consumida y aumentar el tiempo de duración en funcionamiento a varios días obedeciendo con los requerimientos de batería planteados para el desarrollo de wearables.
- Se ha realizado un estudio de caso utilizando la aproximación metodológica diseñada previamente, dando como resultado un prototipo wearable. Finalmente, se realiza una fase de pruebas al dispositivo el cual recolecta datos de tres movimientos realizados por tres usuarios diferentes. Así, con los datos recolectados se realizan análisis estadísticos U de Mann Whitney entre usuarios y pruebas, comprobando que estos datos son estadísticamente similares. Estos resultados son válidos para la población objetivo predefinida.
- La señal procedente de las pruebas realizadas con cada usuario es periódica, con ciclos de 126 muestras, según el resultado de los análisis de Correlación Pearson.

## 6.2. TRABAJOS FUTUROS

- Realizar un análisis bibliométrico con CiteSpace y otros software de análisis de tendencias, incrementando las cadenas de búsqueda y el número de documentos con el fin de enriquecer la presente aproximación metodológica.
- Utilizar la aproximación metodológica en diferentes tipos de movimiento físico, por ejemplo, pasos de baile más avanzados, movimientos para la rehabilitación de extremidades, entre otros.
- Agregar a la aproximación metodológica una etapa de Estandarización donde se desarrollen API's, SDK y sus estándares.
- Establecer un identificador de movimientos con las características físicas y estadísticas estudiadas en el desarrollo de este prototipo, verificando su precisión. De este modo, entrar en el campo de *Machine Learning*.
- Desarrollar prototipos funcionales utilizando tecnología Bluetooth Low Energy pero con periféricos conectados al mismo tiempo.
- Determinar cómo afecta el tiempo de vida de la batería de un prototipo wearable al incrementar las tareas a ejecutar en el módulo secundario wearable.
- Emplear diferentes técnicas de análisis de datos estadístico descriptivo e inferencial para movimientos de actividad física con una cantidad mayor de muestras.

## Bibliografía

- [1] “Wearable - Qué es la tecnología wearable”, *Quees.info*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.quees.info/que-es-wearable.html>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [2] P. Fernandez, “Wearable technology: beyond augmented reality”, *Libr. Hi Tech News*, vol. 31, no. 9, 2014.
- [3] S. Walker, “Wearable Technology - Market Assessment”, *An IHS Whitepaper. IHS Electronics & Media*, sep. 2013.
- [4] I. López Villar, “Dispositivos inteligentes en el deporte. ¿Éxito o fracaso?”, trabajo de fin de grado, Univ. de la Rioja, La Rioja, España, 2014.
- [5] P. S. Freedson, *et al.*, “Assessment of Physical Activity Using Wearable Monitors: Recommendations for Monitor Calibration and Use in the Field”, *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 44, no. 1, pp. S1–S4, ene. 2012.
- [6] M. J. Cobo, *et al.*, “SciMAT: A New Science Mapping Analysis Software Tool”, *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 8, pp. 1609–1630, ago. 2012.
- [7] P. M. Butala, *et al.*, “Wireless system for monitoring and real-time classification of functional activity”, en *4th Int. Conf. Commun. Syst. Netw. COMSNETS 2012*, pp. 1–5.
- [8] T. Starner, “The Challenges of Wearable Computing: Part 1”, *IEEE Micro*, vol. 21, no. 4, pp. 44–52, ago. 2001.
- [9] T. Starner, “The Challenges of Wearable Computing: Part 2”, *IEEE Micro*, vol. 21, no. 4, pp. 54–67, ago. 2001.
- [10] R. T. Floyd y C. W. Thompson, *Manual of structural kinesiology*. McGraw-Hill New York, NY, 2009.
- [11] M. J. Cobo Martín, “Scimat: Herramienta Software para el Análisis de la Evolución del Conocimiento Científico. Propuesta de una Metodología de Evaluación”, tesis doctoral, Univ. de Granada, Granada, España, 2011.
- [12] M. Munoz-Organero y A. Lotfi, “Human Movement Recognition Based on the Stochastic Characterisation of Acceleration Data”, *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1464, sep. 2016.
- [13] N. Alshurafa, *et al.*, “Designing a Robust Activity Recognition Framework for Health and Exergaming Using Wearable Sensors”, *IEEE J. Biomed. Health Inf.*, vol. 18, no. 5, pp. 1636–1646, sep. 2014.

- [14] R. Rajamanickam, S. Park, y S. Jayaraman, “A Structured Methodology for the Design and Development of Textile Structures in a Concurrent Engineering Framework”, *J. Text. Inst.*, vol. 89, no. 3, pp. 44–62, ene. 1998.
- [15] J. Bosse, “Salsa Dance and the Transformation of Style: An Ethnographic Study of Movement and Meaning in a Cross-Cultural Context”, *Dance Res. J.*, vol. 40, no. 01, pp. 45–64, 2008.
- [16] K. Townsend, “Introduction to Bluetooth Low Energy”, *Adafruit Learning System*, mar. 2015. [En línea]. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/introduction-to-bluetooth-low-energy/introduction>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [17] K. Townsend, *et al.*, *Getting Started with Bluetooth Low Energy: Tools and Techniques for Low-Power Networking*. Sebastopol, CA: O’Reilly Media, Inc., abr. 2014.
- [18] N. Ravi, *et al.*, “Activity Recognition from Accelerometer Data”, en *17th Conf. Innov. Appl. Artif. Intell.*, IAAI’05, Pittsburgh, Pennsylvania, jul. 2005, pp. 1541–1546.
- [19] M. Zañartu, “Introducción al procesamiento digital de señales y sus aplicaciones”, *Notas de clase para ELO313*, 2013. Dpto. de Electrónica, Univ. Tec. Federico Santa María, Chile. [En línea]. Disponible en: [http://profesores.elo.utfsm.cl/mzanartu/-ELO313/Docs/2013/ELO313\\_2013\\_01\\_Intro.pdf](http://profesores.elo.utfsm.cl/mzanartu/-ELO313/Docs/2013/ELO313_2013_01_Intro.pdf). [Accedido: 10-abr-2018].
- [20] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*, 2da ed. San Diego, CA: California Technical Publishing, 1999.
- [21] S. W. Smith, “Properties of Convolution: Common Impulse Responses”, en *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*, 2da ed., San Diego, CA: California Technical Publishing, 1999, pp. 123–140.
- [22] S. W. Smith, “Moving Average Filters: Implementation by Convolution”, en *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*, 2da ed., San Diego, CA: California Technical Publishing, 1999, pp. 277–284.
- [23] B. Samir, “Applying Low Pass Filter to Android Sensor’s Readings”, *Built.io Blog*, may 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.built.io/blog/applying-low-pass-filter-to-android-sensor-s-readings>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [24] S. W. Smith, “Windowed-Sinc Filters: Designing the Filter”, en *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*, 2da ed., San Diego, CA: California Technical Publishing, 1999, pp. 285–296.
- [25] A. N. Gonzalez, “¿Qué es Android?”, *Xataka Android*, feb. 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.xatakandroid.com/sistema-operativo/que-es-android>. [Accedido: 10-abr-2018].

- [26] S. Spinsante, *et al.*, “A Mobile Application for Easy Design and Testing of Algorithms to Monitor Physical Activity in the Workplace”, *Mob. Inf. Syst.*, vol. 2016, pp. 1–17, 2016.
- [27] S. Crea, *et al.*, “Development of Gait Segmentation Methods for Wearable Foot Pressure Sensors”, en *2012 Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, San Diego, CA, USA, pp. 5018–5021.
- [28] F. Gemperle, *et al.*, “Design for wearability”, en *Dig. Pap. Second Int. Symp. Wearable Comput. Cat No98EX215*, Pittsburgh, PA, USA, oct. 1998, pp. 116–122.
- [29] M. Canina y V. Ferraro, “Biodesign and Human Body: a New Approach in Wearable Devices”, *BiodesignLab, INDACO Dipartimento, Politecnico di Milano*, 2008.
- [30] T.-H. Hsieh, *et al.*, “A Wearable Walking Monitoring System for Gait Analysis”, en *2012 Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, San Diego, CA, USA, pp. 6772–6775.
- [31] C. Chen, “CiteSpace II: Detecting and Visualizing Emerging Trends and Transient Patterns in Scientific Literature”, *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 3, pp. 359–377, feb. 2006.
- [32] N. Hegde, M. Bries, y E. Sazonov, “A Comparative Review of Footwear-Based Wearable Systems”, *Electronics*, vol. 5, no. 4, p. 48, ago. 2016.
- [33] U. Anliker, *et al.*, “A Systematic Approach to the Design of Distributed Wearable Systems”, *IEEE Trans. Comput.*, vol. 53, no. 8, pp. 1017–1033, ago. 2004.
- [34] H. Chen, *et al.*, “A Review of Wearable Sensor Systems for Monitoring Body Movements of Neonates”, *Sensors*, vol. 16, no. 12, p. 17, dic. 2016.
- [35] N. F. Butte, U. Ekelund, y K. R. Westerterp, “Assessing Physical Activity Using Wearable Monitors: Measures of Physical Activity”, *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 44, no. 1S, pp. S5–S12, ene. 2012.
- [36] P.-A. Haddad, J.-P. Raskin, y D. Flandre, “Automated design of a 13.56 MHz Corner-robust Efficient Differential Drive Rectifier for 10 $\mu$ A load”, en *IEEE Int. Symp. Circuits Syst. ISCAS 2016*, Montreal, QC, Canada, pp. 1822–1825.
- [37] T. Zhang, *et al.*, “Fall Detection by Wearable Sensor and One-Class SVM Algorithm”, en *Intelligent Computing in Signal Processing and Pattern Recognition*; D.-S. Huang, K. Li, y G. W. Irwin, eds., vol. 345 de *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Heidelberg, Berlin: Springer, 2006, pp. 858–863.
- [38] W.-C. Teng y D.-J. Huang, “Gait Based Directional Bias Detection of Four-Legged Walking Robots”, en *Climbing and Walking Robots*; B. Miripour, ed., vol. 4693 de *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Rijeka: IntechOpen, 2010, p. 508.

- [39] J. Taborri, *et al.*, “Gait Partitioning Methods: A Systematic Review”, *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 66, ene. 2016.
- [40] D. Conradsson, *et al.*, “Monitoring training activity during gait-related balance exercise in individuals with Parkinson’s disease: a proof-of-concept-study”, *BMC Neurol.*, vol. 17, no. 1, p. 19, ene. 2017.
- [41] K. Y. Chen y D. R. Bassett, “The Technology of Accelerometry-Based Activity Monitors: Current and Future”, *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 37, no. 11, pp. S490–S500, nov. 2005.
- [42] K. Hung, Y. T. Zhang, y B. Tai, “Wearable Medical Devices for Tele-Home Healthcare”, en *26th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, San Francisco, CA, USA, sep. 2004, vol. 4, pp. 5384–5387.
- [43] L. Thoraval, *et al.*, “Data fusion of electrophysiological and haemodynamic signals for ventricular rhythm tracking”, *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 16, no. 6, pp. 48–55, dic. 1997.
- [44] M. J. Moron, *et al.*, “J2me and smart phones as platform for a Bluetooth Body Area Network for Patient-telemonitoring”, en *29th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2007*, Lyon, France, pp. 2791–2794.
- [45] E. M. Arnold, *et al.*, “A Model of the Lower Limb for Analysis of Human Movement”, *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 38, no. 2, pp. 269–279, feb. 2010.
- [46] D. R. Bassett, A. Rowlands, y S. G. Trost, “Calibration and Validation of Wearable Monitors”, *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 44, no. 1S, pp. S32–S38, ene. 2012.
- [47] D. Curone, *et al.*, “Heart Rate and Accelerometer Data Fusion for Activity Assessment of Rescuers During Emergency Interventions”, *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, vol. 14, no. 3, pp. 702–710, may 2010.
- [48] D. P. Heil, S. Brage, y M. P. Rothney, “Modeling Physical Activity Outcomes from Wearable Monitors”, *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 44, no. 1S, pp. S50–S60, ene. 2012.
- [49] M. Zhang y A. A. Sawchuk, “Motion Primitive-based Human Activity Recognition Using a Bag-of-features Approach”, en *Proc. 2nd ACM SIGHIT Int. Health Inform. Symp.*, IHI ’12, Nueva York, NY, USA, 2012, pp. 631–640.
- [50] A. Milenković, C. Otto, y E. Jovanov, “Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation”, *Comput. Commun.*, vol. 29, no. 13-14, pp. 2521–2533, ago. 2006.
- [51] A. Badam, *et al.*, “Software Defined Batteries”, en *Proc. 25th Symp. Oper. Syst. Princ.*, SOSp ’15, Nueva York, NY, USA, oct. 2015, pp. 215–229.

- [52] H. Zeng y Y. Zhao, “Sensing Movement: Microsensors for Body Motion Measurement”, *Sensors*, vol. 11, no. 1, pp. 638–660, ene. 2011.
- [53] J. Rueterbories, E. G. Spaich, y O. K. Andersen, “Gait event detection for use in FES rehabilitation by radial and tangential foot accelerations”, *Med. Eng. Phys.*, vol. 36, no. 4, pp. 502–508, abr. 2014.
- [54] D. J. Nowak y P. E. Schamid, “Introduction to Digital Filters”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-10, no. 2, pp. 210–220, jun. 1968.
- [55] “Oms | Actividad física”, *Organización Mundial de la Salud, WHO.*, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.who.int/dietphysicalactivity/pa/es/>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [56] “Devices Worn on the Legs | Wearables List”, *Vandrico Solutions Inc.*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://vandrico.com/wearables/device-categories/location/legs>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [57] “Wearable Technologies | WT”, *Wearable Technologies*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.wearable-technologies.com/>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [58] “Shop | Shimmersensing - Wearable body sensors | Wearable technology”, *Shimmer, Discovery in motion.*, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.shimmersensing.com/products/>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [59] M. Stemm y R. H. Katz, “Measuring and Reducing Energy Consumption of Network Interfaces in Hand-Held Devices”, *IEICE Trans. Commun.*, vol. E80-B, no. 8, pp. 1125–1131, ago. 1997.
- [60] “Características de las pilas de botón”, *Pilinet.es*, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://pilinet.es/articulos/12-noticias/informacion/24-caracteristicas-de-las-pilas-de-boton>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [61] C. K. Chan, *et al.*, “High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires”, *Nat. Nanotechnol.*, vol. 3, no. 1, pp. 31–35, ene. 2008.
- [62] H. Abe, T. Murai, y K. Zaghbi, “Vapor-grown carbon fiber anode for cylindrical lithium ion rechargeable batteries”, *J. Power Sources*, vol. 77, no. 2, pp. 110–115, feb. 1999.
- [63] D. Lavry, “Sampling Theory For Digital Audio”, *Lavry Engineering, Inc.*, p. 27, 2004.
- [64] holyiot Store, “nordic NRF51822 Bluetooth 4.0 BLE module accelerometer sensor lis2dh”, *Aliexpress.com | Alibaba Group - Online Shopping*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2Mcqhvi>. [Accedido: 10-abr-2018].

- [65] eZ. Systems, “nRF51822 / Bluetooth Low Energy/Products/Home”, *Nordic Semiconductor*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-low-energy/nRF51822>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [66] “Infocenter”, *Nordic Semiconductor*, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [67] “Android Studio and SDK Tools | Android Developers”, *Google*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://developer.android.com/studio/>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [68] L. Ada, “Wiring | Adafruit INA219 Current Sensor Breakout”, *Adafruit Learning System*, mar. 2015. [En línea]. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-ina219-current-sensor-breakout/wiring>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [69] “Datasheet Coin Type Manganese Dioxide Lithium MicroBattery CR2032”, *Sony Corporation*, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://www.sony.net/Products/MicroBattery/cr/pdf/cr2032\\_02.pdf](https://www.sony.net/Products/MicroBattery/cr/pdf/cr2032_02.pdf). [Accedido: 10-abr-2018].
- [70] “Tinkercad | Create 3d digital designs with online CAD”, *Autodesk, Inc.*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.tinkercad.com/>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [71] “Estadística Descriptiva - Etapas de una investigación”, *Notas de clase para PyEC12*. Dpto. de Matemática, Fac. de Ciencias Exactas y Naturales. Univ. de Buenos Aires, Argentina. [En línea]. Disponible en: [http://www.dm.uba.ar/materias/probabilidades\\_estadistica\\_C/2004/1/PyEC12.pdf](http://www.dm.uba.ar/materias/probabilidades_estadistica_C/2004/1/PyEC12.pdf). [Accedido: 10-abr-2018].
- [72] “Coeficiente de correlación de Pearson”, *Wikipedia, la enciclopedia libre*, jul. 2018. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente\\_de\\_correlaci3n\\_de\\_Pearson](https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_correlaci3n_de_Pearson). [Accedido: 10-abr-2018].
- [73] N. M. Razali y Y. B. Wah, “Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests”, *J. Stat. Model. Anal.*, vol. 2, no. 1, pp. 21–33, 2011.
- [74] I. Espejo Miranda, *et al.*, *Inferencia Estadística: Teoría y problemas*, 2da ed. Cádiz: UCA, Servicio de Publicaciones, 2015.
- [75] N. Nachar, “The Mann-Whitney U: A Test for Assessing Whether Two Independent Samples Come from the Same Distribution”, *Tutor. Quant. Methods Psychol.*, vol. 4, no. 1, pp. 13–20, 2008.