



**Universidad de Valladolid**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Telecomunicación (Valladolid)

Grado de Ingeniería en Tecnologías de  
Telecomunicación

**Desarrollo y validación de una aplicación para la  
evaluación de la exposición humana a las  
vibraciones de cuerpo entero según la norma  
UNE- ISO 2631-1**

Alumno: Pablo Izquierdo Conde

Tutores: Jaime Gómez Gil

Fco. Javier Gómez Gil

## **DESCRIPCIÓN DEL TFG**

**TITULO:** Desarrollo y validación de una aplicación para la evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero según la norma UNE- ISO 2631-1

**AUTOR:** Pablo Izquierdo Conde

**TUTOR:** Jaime Gómez Gil, Departamento de Teoría de la Señal,  
Comunicaciones e Ingeniería Telemática, E.T.S.I.  
Telecomunicación, Universidad de Valladolid

**COTUTOR:** Francisco Javier Gómez Gil, Departamento de Ingeniería  
Electromecánica de la Universidad de Burgos

**DEPARTAMENTO:** Departamento de Teoría de la Señal, Comunicaciones e  
Ingeniería Telemática

## **MIEMBROS DEL TRIBUNAL**

**PRESIDENTE:** Alonso Alonso Alonso

**VOCAL:** Jaime Gómez Gil

**SECRETARIO:** Javier Manuel Aguiar Pérez

**SUPLENTE:** José Fernando Diez Higuera

**FECHA DE LECTURA:**

**CALIFICACIÓN:**

# Resumen

## INTRODUCCIÓN

Las vibraciones a las que un trabajador se ve sometido durante su jornada laboral pueden terminar afectando negativamente a su salud. En la actualidad, existen numerosos dispositivos comerciales que se encargan de medir las vibraciones acumuladas que recibe un trabajador a lo largo de una jornada de trabajo. Estos dispositivos constan de un hardware que permita la adquisición de datos para poder caracterizar las vibraciones, y tras realizar los cálculos oportunos, mostrar la dosis de vibraciones recibidas por el trabajador.

## OBJETIVOS

El principal objetivo del trabajo es desarrollar una aplicación en Android que nos permita, de manera sencilla, obtener el valor de la dosis de vibración normalizada a partir de los datos tomados por el acelerómetro del teléfono móvil donde este instalada la aplicación.

## MATERIAL

Entre los materiales que se han utilizado se encuentran: varios teléfonos móviles diferentes sobre los que se ha probado la aplicación, el entorno de desarrollo Android Studio, utilizado para la programación, el *software* MATLAB, utilizado para procesar los datos obtenidos por la aplicación y un banco de trabajo que nos ha permitido simular vibraciones.

## METODOLOGIA

Este trabajo ha consistido en el desarrollo de una aplicación en Android que mida las dosis de vibraciones acumuladas que recibe un trabajador. Para realizar esta tarea, se han usado los acelerómetros incluidos en el teléfono, así como distintos algoritmos que nos permiten calcular, a partir de los datos tomados por el sensor, la dosis acumulada de vibraciones.

## RESULTADOS

Una vez realizada la aplicación, esta se ha probado utilizando un banco de *Squeak & Rattle* para obtener las vibraciones. Se han realizado pruebas con vibraciones aleatorias utilizando tres teléfonos distintos para probar la precisión de la aplicación en hardware diferente. El mejor caso ha sido el del teléfono Asus, para el cual se ha obtenido un error del 4.73 %.

## CONCLUSIONES

Con este trabajo se ha comprobado que se puede aprovechar el *hardware* incluido en los teléfonos móviles de hoy en día para tareas que en un principio no estaban contempladas por los desarrolladores. A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir también que la aplicación no va a poder ofrecer la misma precisión que un equipo profesional de medición y, por tanto, no va a poder sustituirlo. Sin embargo, el uso de la aplicación puede ser útil para obtener una primera aproximación de cuál es la dosis recibida y posteriormente, realizar un estudio con un equipo profesional.

**Palabras clave:** vibraciones de cuerpo entero, Android, acelerómetro, *smartphone*, salud, dosis de vibraciones.

# Abstract

## INTRODUCTION

Vibrations to which a worker is subjected during his workday may affect negatively to his health. Nowadays, there are several devices that measure the vibration a worker receives through a work day. Such devices have a hardware that allows data acquisition to characterize the vibrations, and, after doing the appropriate calculations, showing the dose of vibration received by the worker.

## OBJECTIVES

The main goal of this project is to develop an Android application that allows us , in a simple way, to obtain the dose of vibration from the data taken by the sensors in the phone where the app is installed.

## MATERIALS

We have used different mobile phones, on which the app has been tested, the IDE Android Studio, used for programming, MATLAB software, used to process the date obtained by the app and a work bench that allowed us to simulate vibrations.

## METHODOLOGY

This project consists of the development of an Android application that measures the amount of vibration received by a worker. To do this, accelerometers included in the phone will be used as so will be different algorithms that allow us to calculate, from the data collected by the sensor, the amount of vibrations received.

## RESULTS

Once the application is developed, it has been tested using a Squeak & Rattle bench to obtain the vibrations. We have done random tests using three different phones to check the accuracy of the app when used in different hardware. Best case has been with Asus phone, for which we have obtained an error of 4.73 %.

## CONCLUSIONS

With this project it has been proved that the hardware in mobile phones can be used for tasks different than what developers had in mind. In view of the results, we can also conclude that the app cannot offer the same accuracy than a professional measurement equipment and therefore, the app will not be able to replace it. Nevertheless, the app can be useful to obtain a first approach of what is the received dose and later, carry out a study with professional equipment.

**Keywords:** whole-body vibrations, Android, accelerometer, smartphone, health, amount of vibrations.

# Agradecimientos

*Este Trabajo de Fin de Grado no habría sido posible sin todas las personas que están cerca de mí cada día y me apoyan incondicionalmente.*

*Por tanto, quiero agradecer, en primer lugar, a los tutores de este proyecto por enseñarme todo lo necesario para poder realizar el trabajo y poner a mi disposición todas las herramientas para conseguirlo.*

*A mis padres, ya que ellos son los principales responsables de que yo haya llegado hasta aquí.*

*A mis amigos, por estar cada día ahí y sacarme una sonrisa en los peores momentos.*

*A todos estos y muchos más: ¡Gracias!*

# Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>5</b>
<b>Índice</b> .....	<b>6</b>
<b>Índice de figuras y tablas</b> .....	<b>9</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>12</b>
1.1. Ámbito del proyecto.....	12
1.2. Objetivos .....	12
1.3. Fases y métodos .....	13
1.4. Organización de la memoria .....	14
<b>Capítulo 2. Estado del arte</b> .....	<b>15</b>
2.1. Estudio de la norma UNE-ISO 2631-1.....	15
2.1.1. Introducción .....	15
2.1.2. Objeto y campo de aplicación.....	16
2.1.3. Símbolos y subíndices.....	16
2.1.4. Medición de las vibraciones.....	18
2.1.5. Evaluación de la vibración .....	19
2.1.5.1. Método de evaluación básico usando el valor eficaz de la aceleración ponderada .....	19
2.1.5.2. Método del valor eficaz móvil de la aceleración ponderada .....	19
2.1.5.3. Método del valor de dosis de vibración a la cuarta potencia.....	20
2.1.5.4. Ponderación en frecuencia.....	20
2.2. Efectos de las vibraciones en la salud .....	22
2.2.1. Datos estadísticos sobre la exposición de los trabajadores a vibraciones .....	22
2.2.2. Mecanismo de acción de las vibraciones .....	24
2.2.3. Manifestaciones clínicas de los efectos de las vibraciones .....	24
2.2.4. Criterios para la prevención de los efectos de las vibraciones .....	26
2.3. Estudio de artículos científicos relacionados .....	27
2.3.1. Cuong 2013. “Effects of tyre inflation pressure and forward speed on vibration of an unsuspended tractor”.....	27
2.3.1.1. Materiales y métodos .....	27
2.3.1.2. Condiciones de las pruebas .....	28
2.3.1.3. Resultados .....	29
2.3.2. Deboli 2017. “Whole-body vibration: Measurement of horizontal and vertical transmissibility of an agricultural tractor seat” .....	29

2.3.2.1. Materiales y métodos .....	29
2.3.2.2. Características de operación.....	29
2.3.2.1. Instrumentos .....	30
2.3.2.2. Resultados .....	30
2.3.2.3. Discusión.....	32
2.4. Conclusiones .....	33
<b>Capítulo 3. Materiales.....</b>	<b>34</b>
3.1. Smartphone Motorola Moto G 3ª Generación.....	34
3.2. Smartphone Asus Zenfone 550ML .....	36
3.3. iPhone 6.....	37
3.4. Banco de <i>squeak &amp; rattle</i> .....	38
3.4.1. Excitador SILVER y brazo vibrador .....	39
3.4.2. Acelerómetros instalados .....	40
3.4.2.1. Acelerómetros de realimentación.....	40
3.4.3. Acelerómetros de medida de vibraciones.....	40
3.5. Adquisición de datos .....	42
3.6. Software del banco de pruebas.....	44
3.6.1. Random Vibration Control.....	44
3.7. Software Signal Express.....	44
3.8. Software Android Studio.....	45
3.9. Software MATLAB.....	47
3.10. Conclusiones .....	48
<b>Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación.....</b>	<b>49</b>
4.1. Requisitos del teléfono móvil.....	49
4.2. Estructura de la aplicación .....	49
4.3. Adquisición de datos .....	49
4.3.1. Sensores en Android.....	50
4.3.2. Implementación en la aplicación.....	51
4.3.3. Tasa de adquisición de datos .....	52
4.4. Procesamiento de los datos .....	54
4.4.1. Cálculo de la FFT .....	54
4.4.1.1. Fundamentación teórica .....	55
4.4.1.2. Implementación en la aplicación.....	57
4.4.2. Agrupación por tercios de octava.....	58
4.4.2.1. Fundamentación teórica .....	58
4.4.2.2. Implementación en la aplicación.....	60
4.4.3. Ponderación en frecuencia .....	60

4.4.3.1. Fundamentación teórica .....	60
4.4.3.2. Implementación en la aplicación.....	62
4.4.4. Adición de los periodos de muestreo .....	63
4.4.5. Cálculo del valor de dosis diaria normalizada.....	64
4.5. Conclusiones .....	65
<b>Capítulo 5. Experimentos sobre la mesa de vibraciones.....</b>	<b>66</b>
5.1. Pruebas random.....	66
5.1.1. Norma UNE-ISO 7096 y perfil EM5 .....	66
5.1.2. Preparación de las pruebas .....	70
5.1.3. Comparación de las secuencias temporales.....	72
5.1.4. Comparación de los espectros obtenidos.....	73
5.1.5. Comparación de los tercios de octava obtenidos.....	74
5.1.6. Cálculo del valor de A(8).....	76
5.1.6.1. Errores en los cálculos de A(8) en el teléfono.....	76
5.1.6.2. Comparación de los valores de A(8) de la aplicación con los valores teóricos calculados .....	78
5.1.7. Distribución de los tiempos de cálculo durante la ejecución de la aplicación .....	80
<b>Conclusiones .....</b>	<b>84</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>86</b>
<b>Anexo: Manual de usuario de la aplicación.....</b>	<b>89</b>
Icono de la aplicación.....	89
Uso de la aplicación .....	89

# Índice de figuras y tablas

Figura 1 Ejes del cuerpo humano .....	18
Figura 2 Curvas de ponderación en frecuencia para las ponderaciones principales .....	21
Figura 3 Curvas de ponderación en frecuencia para las ponderaciones adicionales .....	21
Figura 4 Exposición a riesgos. Evaluación 2005-2015 (%) .....	22
Figura 5 Ramas de actividad en las que son más frecuentes las vibraciones en el puesto de trabajo .....	23
Figura 6 Ocupaciones en las que son más frecuentes las vibraciones en el puesto de trabajo ....	23
Figura 7 Tractor de pruebas e instrumentos: (1) compresor de aire; (2), (6), (7) acelerómetros; (3) sensor de presión de aire; (4) tractor de pruebas; (5) ordenador; (8) sistema de adquisición y análisis de datos LMS; (9) transformadores; (10) baterías.....	28
Figura 8 Esquema del sistema de medida y adquisición .....	28
Figura 9 Cuatro campos de pruebas: a) arcilla, b) césped, c) asfalto, d) camino de tierra .....	31
Figura 10 Posiciones de los acelerómetros en el anclaje del asiento (izquierda), y sobre el asiento (derecha).....	31
Figura 11 Gráfica de los valores totales de vibración medidos en la plataforma y en el asiento del tractor al cruzar todas las superficies a la misma velocidad de 2,78 m/s con presiones de ruedas de 90 y 160 kPa. ....	31
Figura 12 Gráfica de los valores totales de vibración medidos en la plataforma y en el asiento del tractor al cruzar todas las superficies a la velocidad de 2,78 m/s y 5,56 m/s con presión de ruedas de 160 kPa. ....	32
Figura 13 Valores totales de vibración (medio, mínimo y máximo) en la plataforma (izquierda) y en el asiento (derecha) obtenidos en las superficies de pruebas con las siguientes configuraciones: sin lastre -Nb; sin suplemento - Ni; con lastre - Yb; con suplemento -Yi).....	32
Figura 14 Motorola Moto G 3ª Generación .....	34
Figura 15 Asus Zenfone 550ML .....	36
Figura 16 iPhone 6 .....	37
Figura 17 Banco de Squeak & Rattle utilizado en los experimentos .....	39
Figura 18 Excitador SILVER y brazo vibrador con el teléfono de pruebas y los acelerómetros instalados.....	39
Figura 19 Sensibilidad del acelerómetro según su montaje .....	40
Figura 20 Acelerómetros B&K 4507 .....	41
Figura 21 Detalle de la instalación de los acelerómetros sobre el brazo vibrador. El de realimentación lleva la etiqueta verde y los otros corresponden a los ejes x (rosa), y (azul) y z (naranja) .....	41
Figura 22 Esquema de un sistema de adquisición de datos.....	42
Figura 23 Sistema DAQ montado para las pruebas. Se puede ver la conexión de los acelerómetros con el dispositivo DAQ, y la conexión de este con el PC .....	42
Figura 24 Chasis NI cDAQ 9172 con el módulo NI 9234 al que están conectados los acelerómetros .....	43
Figura 25 Conexión de los acelerómetros con el módulo del DAQ.....	43

Figura 26 Random Vibration Control. Gráfica del perfil del experimento .....	44
Figura 28 Captura de pantalla del programa NI Signal Express .....	45
Figura 29 Software para el desarrollo de aplicaciones Android Studio .....	45
Figura 30 Archivos del proyecto en la vista de Android.....	46
Figura 31 Ventana principal de Android Studio .....	46
Figura 32 Software MATLAB para el procesamiento de datos .....	47
Figura 33 Escritorio predeterminado de MATLAB .....	48
Figura 34 Esquema del tratamiento de los datos en la aplicación .....	49
Figura 35 Sistema de coordenadas de Android .....	50
Figura 36 Ejemplo de señal en frecuencia muestreada sin aliasing .....	52
Figura 37 Ejemplo de señal en frecuencia muestreada con aliasing .....	53
Figura 38 Procedimiento a seguir para el cálculo del valor final de la dosis de vibración .....	54
Figura 39 Esquema del efecto de la Transformada de Fourier aplicada a una señal continua....	54
Figura 40 Gráfica de ponderación en frecuencia.....	61
Figura 41 Filtros paso-bajo, paso-alto y DSP especificados en la norma UNE-ISO 7096 para la clase señal de entrada EM 5 .....	67
Figura 42 Coeficientes de ponderación de frecuencias $W_k$ , $W_d$ y $W_f$ .....	68
Figura 43 Fragmento del perfil de simulación calculado para poder introducirlo en el software del banco de trabajo .....	70
Figura 44 Posición del teléfono de pruebas durante los experimentos .....	70
Figura 45 Capturas de pantalla de la aplicación Vibration para iOS .....	71
Figura 46 Comparación de las secuencias temporales para 100% de EM 5 de los tres teléfonos	72
Figura 47 Comparación de las secuencias temporales para $1.72 \text{ m/s}^2$ para los tres teléfonos ....	72
Figura 48 Comparación del espectro obtenido para cada uno de los teléfonos.....	73
Figura 49 Comparación de los espectros de los tres teléfonos, solo se han representado las frecuencias relevantes, ya que a partir de 20 Hz no son importantes.....	74
Figura 50 Comparación de los tercios de octava para cada teléfono .....	75
Figura 51 Comparación de los valores por tercios de octava después de aplicar el filtro $W_k$ .....	75
Figura 52 Gráfica del error en el cálculo de $A(8)$ para el teléfono Motorola.....	77
Figura 53 Gráfica del error en el cálculo de $A(8)$ para el teléfono Asus.....	78
Figura 54 Comparación de los valores de $A(8)$ obtenidos por cada teléfono para cada valor del EM 5.....	79
Figura 55 Errores relativos en el valor de $A(8)$ obtenido con cada dispositivo y para cada valor de EM 5.....	80
Figura 56 Distribución de los tiempos de cálculo en la aplicación .....	82
Figura 59 Icono de la aplicación .....	89
Figura 60 Pantalla de inicio.....	89
Figura 61 Menú de selección de la posición respecto del asiento.....	90
Figura 62 Pantalla de selección del número de horas de referencia y datos por período .....	90

Figura 63 Inicio de la medición.....	91
Figura 64 Pantalla que se muestra durante la toma de datos.....	91
Figura 65 Pantalla de resultados finales.....	91
Figura 66 Petición de permiso de almacenamiento al usuario .....	92
Figura 67 Pantalla de selección del nombre del fichero.....	92
Figura 68 Mensaje emergente que indica que el fichero se ha guardado correctamente .....	92
Figura 69 Pantalla con el menú de información sobre legislación.....	93
Figura 70 Pantalla con la ayuda sobre la aplicación .....	93
Tabla 1 Directrices para la aplicación de las curvas de ponderación en frecuencia para ponderaciones principales .....	17
Tabla 2 Directrices para la aplicación de las curvas de ponderación en frecuencia para factores de ponderación adicionales .....	17
Tabla 3 Esquema de los efectos de las vibraciones de cuerpo entero a tenor de la frecuencia de exposición y el origen de estas.....	26
Tabla 4 Criterios para la prevención de vibraciones .....	27
Tabla 5 Características del tractor de pruebas.....	30
Tabla 6 Características del asiento .....	30
Tabla 7 Principales clases e interfaces del framework para sensores .....	51
Tabla 8 Frecuencias de muestreo máximas para varios dispositivos móviles.....	53
Tabla 9 Ejemplo del número de operaciones necesarias para hacer la DFT y la FFT en función de N.....	57
Tabla 10 Frecuencias en tercios de octava .....	59
Tabla 11 Coeficientes para la ponderación en frecuencia .....	61
Tabla 12 Frecuencias de corte de los filtros para el perfil de pruebas EM 5 .....	67
Tabla 13 Valores de A(8) para las pruebas random .....	69
Tabla 14 Comparación de los valores de A(8) obtenidos con la aplicación y calculados con Matlab para el teléfono Motorola .....	76
Tabla 15 Comparación de los valores de A(8) obtenidos con la aplicación y calculados con Matlab para el teléfono Asus .....	77
Tabla 16 Valores de A(8) obtenidos por la aplicación para cada dispositivo tras 200 segundos de exposición .....	78
Tabla 17 Errores relativos obtenidos con la aplicación para el valor de A(8) para 200 segundos de exposición .....	79
Tabla 18 Tiempos de cálculo obtenidos tras los 200 segundos de muestreo .....	81
Tabla 19 Tiempos de muestreo para los diferentes periodos .....	83

# Capítulo 1. Introducción

Los vehículos, la maquinaria y diversas actividades industriales someten a las personas a vibraciones mecánicas aleatorias y transitorias que pueden interferir en las actividades y en la salud. Por este motivo, existe una legislación para proteger la salud de los trabajadores que tiene muy en cuenta la ergonomía, que es el estudio de las condiciones de adaptación de un lugar de trabajo, máquina, vehículo, etc., a las características físicas y psicológicas del trabajador, para establecer los límites de la dosis de vibración permitida. Una vez establecidos los límites, es necesario contar con herramientas de medición que nos den resultados de la dosis de vibración precisos para poder garantizar que no se sobrepasen los límites y proteger la salud de los trabajadores.

## 1.1. Ámbito del proyecto

En la actualidad, los dispositivos utilizados en la industria para la medición de las dosis de vibraciones son *dispositivos* con hardware de adquisición de datos dedicado exclusivamente al cálculo de la dosis de vibración acumulada.

Existen dispositivos que miden las vibraciones directamente sobre el cuerpo humano, como el PCE-VM 31 de la marca PCE Ibérica. En este caso, es un dispositivo portátil que permite medir tanto vibraciones de cuerpo entero, como vibraciones mano-brazo siguiendo la norma ISO 2631.

Este equipo también cuenta con un *software* específico que permite analizar, procesar y registrar los resultados en el ordenador, también existe la posibilidad de utilizar un accesorio para medir las vibraciones en el asiento del conductor.

Como se puede observar, este equipo está diseñado específicamente para esta utilidad. Hoy en día, el dispositivo más utilizado en todo el mundo es el teléfono móvil, que cada vez incluye más utilidades diferentes.

En las tiendas online, existen cada vez más aplicaciones que buscan entretener o facilitar la vida a los usuarios. Además, los terminales incorporan un número creciente de sensores, como, por ejemplo, el acelerómetro.

En este proyecto se pretende unificar las dos ideas anteriores, es decir, conseguir utilizar el *hardware* del teléfono móvil para medir y posteriormente calcular la dosis acumulada de vibración sin tener que acudir a un dispositivo dedicado exclusivamente a tal fin, sino sacando el máximo provecho al *smartphone*. De esta forma, será mucho más fácil realizar estas mediciones, ya que supondrá un ahorro económico, y, además, al ser más accesible, se fomentará la realización de estas mediciones para que más trabajadores puedan comprobar si las vibraciones a las que se ven sometidos están afectando negativamente a su salud o no.

Para llegar a este objetivo, se pretende tomar los datos de aceleración dados por los acelerómetros del teléfono Android y posteriormente, realizar los cálculos descritos en la norma UNE-ISO 2631 de julio de 2008 para llegar al resultado final de la dosis normalizada de vibración en referencia a distintos valores de tiempo.

Finalmente, se interpretarán los resultados para ver si están dentro de los límites legales marcados por la legislación, en concreto, por el Real Decreto 1311/2005 del 4 de noviembre, sobre protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.

## 1.2. Objetivos

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado consiste en el desarrollo y evaluación de una aplicación en Android para medir y procesar las vibraciones mecánicas de cuerpo entero para

calcular la dosis acumulada de vibración y comprobar que se encuentra dentro de los límites legales. Esta aplicación hará uso de los acelerómetros del teléfono móvil.

Entre los objetivos secundarios de este Trabajo Fin de Grado se encuentran:

- Estudiar artículos relacionados con la medición de las vibraciones en maquinaria agrícola y realizar una comparación entre varios artículos.
- Aprender a desarrollar una aplicación para dispositivos Android, utilizando el entorno de desarrollo Android Studio.
- Aprender a tomar los datos de aceleración utilizando los sensores del teléfono móvil.
- Realizar los cálculos necesarios para llegar a valores de referencia tomados por la legislación y compararlos con los límites establecidos por ella.
- Conocer las características de los distintos teléfonos móviles utilizados para las pruebas de la aplicación.
- Procesamiento de los datos obtenidos a partir de la aplicación mediante el *software* MATLAB.
- Conseguir desarrollar una aplicación fácil de usar e interpretar.
- Realizar las pruebas pertinentes para validar los resultados de la aplicación.
- Evaluar los resultados finales de la aplicación en simuladores de vibraciones.
- Realizar experimentos de campo para comprobar cómo se comporta la aplicación en condiciones de trabajo reales.
- Aprender a realizar artículos científicos para poder realizar la memoria de este proyecto.

### 1.3. Fases y métodos

Para realizar un trabajo más eficiente en este proyecto es necesario organizarlo en fases que se van a describir a continuación:

1. Adquisición de los conocimientos necesarios para el análisis del problema. Estudio de las vibraciones que influyen sobre el operario.
2. Estudio de artículos relacionados con el problema a resolver para realizar una comparativa.
3. Adquisición de los conocimientos necesarios para poder desarrollar una aplicación en Android, haciendo los ensayos necesarios mediante aplicaciones de prueba.
4. Estudio del funcionamiento de los distintos sensores del *smartphone* y sobre cómo poder obtener datos de ellos.
5. Desarrollo de la aplicación cuya finalidad es la obtención de la dosis acumulada de vibración que recibe un trabajador.
6. Exportación de los datos adquiridos de aceleración en el dominio del tiempo y de la frecuencia obtenidos por la aplicación desarrollada.

7. Diseño de script en MATLAB para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos.
8. Realización de experimentos con *hardware* y *software* específicos para la validación de la aplicación.
9. Obtención de las conclusiones del proyecto.

## **1.4. Organización de la memoria**

La memoria se ha estructurado en 6 capítulos:

El Capítulo 1 consiste en una introducción a este Trabajo Fin de Grado, estableciendo los objetivos, métodos y el ámbito en el que se desarrolla.

El Capítulo 2 se ha realizado un estudio de la norma ISO 2631-1 de julio de 2008, que es la legislación vigente en el ámbito de la evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero, además de un estudio de los efectos nocivos de las vibraciones y de varios artículos científicos relacionados con el ámbito del proyecto.

En el Capítulo 3 se realiza un estudio de los diferentes materiales utilizados y las diferentes herramientas de software utilizadas para el desarrollo de la aplicación y la evaluación de esta y los dispositivos hardware y maquinaria con los que se han llevado a cabo los experimentos en esta memoria.

En el Capítulo 4 se explica el proceso de desarrollo de la aplicación exponiendo los fundamentos teóricos de cada paso y su implementación el código.

En el Capítulo 5 se expondrán los resultados de los experimentos realizados en la mesa de vibraciones, obteniendo las conclusiones oportunas en cada una de las pruebas.

## Capítulo 2. Estado del arte

En este capítulo se estudiará la legislación española sobre la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero. Esta está recogida en la norma UNE-ISO 2631-1 de julio de 2008 y en ella se expone como deben ser medidas las vibraciones mecánicas, como deben ser evaluadas y los posibles efectos nocivos sobre la salud y el bienestar de las personas. Posteriormente, se realizará un estudio de diversos artículos científicos relacionados con el tema de la medición de las vibraciones mecánicas en el caso de maquinaria agrícola donde se analizará tanto el método para la extracción de datos, como el procesado de estos.

### 2.1. Estudio de la norma UNE-ISO 2631-1

ISO, International Organization for Standardization, es una federación mundial de organismos nacionales de normalización. Es una organización no gubernamental con 161 miembros. A través de sus miembros, junta a expertos para compartir conocimientos y desarrollar Estándares Internacionales voluntarios y relevantes para el mercado que apoyan la innovación y proveen soluciones a desafíos globales [1].

La Asociación Española de Normalización, UNE, es el organismo legalmente responsable del desarrollo y difusión de las normas técnicas en España. Las normas indican cómo debe ser un producto o cómo debe funcionar un servicio para que sea seguro y responda a lo que el consumidor espera de él. UNE aporta su experiencia y conocimiento en materia de normas y de productos y servicios relacionados a organizaciones de todo el mundo, desarrollando una gran actividad de cooperación internacional [2].

#### 2.1.1. Introducción

La Norma UNE 2631 [3] es idéntica a la norma internacional ISO 2631:1997. Esta segunda edición anula y reemplaza a la primera edición, norma ISO 2631:1985, y elimina la norma ISO 2631-3:1985.

La Norma ISO 2631 consta de las siguientes partes, bajo el título general de *Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero*:

- *Parte 1: Requisitos generales*
- *Parte 2: Vibraciones continuas y de choque inducido en edificios (1 a 80 Hz).*

Nos centraremos en la Parte 1: Requisitos generales cuyo propósito principal es definir métodos de cuantificación de vibraciones de cuerpo entero en relación con:

- la salud humana y el bienestar;
- la probabilidad de percepción de las vibraciones
- la incidencia del mal del movimiento.

Esta parte de la norma trata sobre las vibraciones de cuerpo entero y excluye los efectos peligrosos de las vibraciones transmitidas directamente a los miembros, por ejemplo, herramientas mecánicas.

Esta parte de la norma no contiene límites de exposición a vibraciones. Sin embargo, en ella se definen métodos de evaluación para que puedan utilizarse como base para límites que puedan establecerse separadamente.

La vibración es a menudo compleja, contiene muchas frecuencias, ocurre en varias direcciones y varía con el tiempo. Los efectos de las vibraciones pueden ser múltiples. La exposición a vibraciones de cuerpo entero causa una distribución compleja de movimientos y fuerzas oscilatorias dentro del cuerpo. Pueden darse grandes variaciones entre sujetos con relación a los efectos biológicos. Las vibraciones de cuerpo entero pueden causar sensaciones, por ejemplo, malestar e irritación, influir en las aptitudes del comportamiento humano o presentar un riesgo para la seguridad y la salud, como un daño patológico o un cambio fisiológico. La presencia de fuerzas oscilatorias con pequeños movimientos puede ocasionar efectos similares.

### 2.1.2. Objeto y campo de aplicación

En esta parte de la Norma ISO 2631 se definen métodos para la medición de vibraciones de cuerpo entero, periódicas, aleatorias y transitorias. Se indican los principales factores que se combinan para determinar el grado a la que la exposición a vibraciones sería aceptable.

Aunque no se abarcan los efectos potenciales sobre el comportamiento humano, la mayoría de las directrices sobre la medición de vibraciones de cuerpo entero también se aplican a esta área. Esta parte de la norma también define métodos preferidos de montaje de transductores para determinar la exposición humana. No se aplica en la evaluación de choques de magnitud extrema tales como los accidentes de vehículos.

Esta parte de la Norma ISO 2631 se aplica a movimientos transmitidos al cuerpo humano en su conjunto: los pies de una persona; las nalgas, espalda y pies de una persona que está sentada o la zona de contacto de una persona que está tumbada. Este tipo de vibraciones se encuentra en vehículos, maquinaria, en edificios y cerca de máquinas en funcionamiento.

### 2.1.3. Símbolos y subíndices

#### Símbolos

$a$	Aceleración de la vibración. La aceleración traslacional se expresa en metros por segundo cuadrado ( $m/s^2$ ) y la aceleración rotacional en radianes por segundo cuadrado ( $rad/s^2$ ).
$H(p)$	Función de transferencia, o ganancia, de un filtro expresada como una función de la frecuencia angular imaginaria.
$p = 2 \pi j f$	Frecuencia angular imaginaria.
$W$	Ponderación en frecuencia.

#### Subíndices

$c, d, e, f, j, k$	Se refieren a las diferentes curvas de ponderación en frecuencia recomendadas para la evaluación con respecto a la salud, bienestar, percepción y mal del movimiento (ver Tabla 1 y Tabla 2).
$w$	Se refiere a los valores de aceleración ponderada en frecuencia.
$x, y, z$	Se refieren a la dirección de la vibración traslacional o rectilínea.  Para vibración rotacional, se refieren al eje de rotación, $r$ . La rotación sobre los ejes $x, y, z$ se denomina balanceo, cabeceo y guiñada respectivamente (ver Figura 1).
$v$	Se refiere al vector suma de todas las aceleraciones ponderadas en los ejes $x, y, z$ .

Ponderación en frecuencia	Salud	Bienestar	Percepción	Mal del movimiento
$W_k$	eje z, superficie de asiento	eje z, superficie de asiento eje z, de pie  tumbado vertical, excepto cabeza  ejes x, y, x, pies (sentado)	eje z, superficie de asiento eje z, de pie  tumbado vertical, excepto cabeza	-
$W_d$	eje x, superficie de asiento eje y, superficie de asiento	eje x, superficie de asiento eje y, superficie de asiento  ejes x, y, de pie tumbado horizontal  ejes y, z, respaldo del asiento	eje x, superficie de asiento eje y, superficie de asiento  ejes x, y, de pie tumbado horizontal	-
$W_f$	-	-	-	vertical

Tabla 1 Directrices para la aplicación de las curvas de ponderación en frecuencia para ponderaciones principales

Ponderación en frecuencia	Salud	Bienestar	Percepción	Mal del movimiento
$W_c$	eje x, respaldo del asiento	eje x, respaldo del asiento	eje x, respaldo del asiento	-
$W_e$	-	ejes $r_x, r_y, r_z$ superficie de asiento	ejes $r_x, r_y, r_z$ superficie de asiento	-
$W_j$	-	tumbado vertical (cabeza)	tumbado vertical (cabeza)	-

Tabla 2 Directrices para la aplicación de las curvas de ponderación en frecuencia para factores de ponderación adicionales

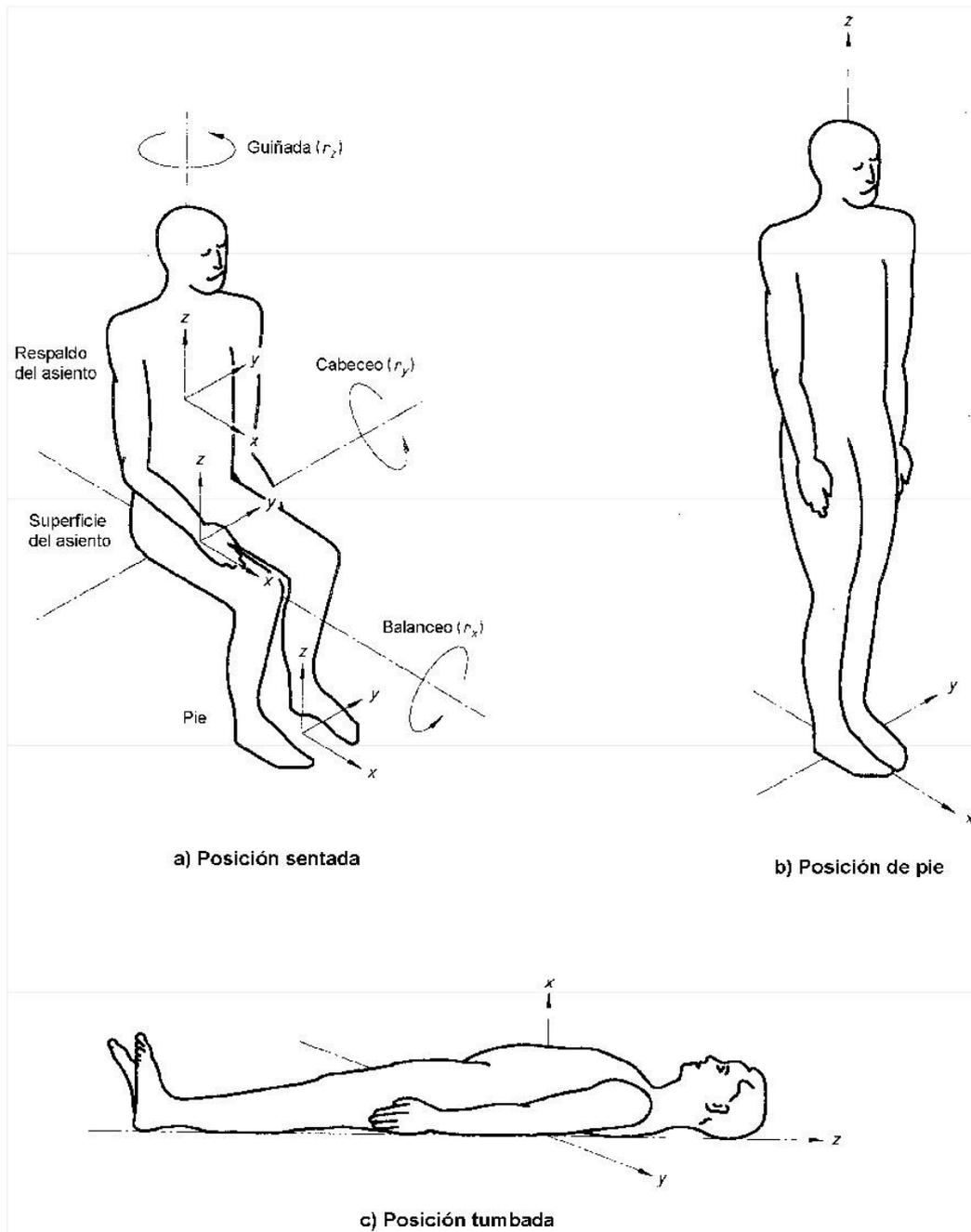


Figura 1 Ejes del cuerpo humano

#### 2.1.4. Medición de las vibraciones

La cantidad primaria de la magnitud de las vibraciones debe ser la aceleración. En el caso de bajas frecuencias y bajas magnitudes de vibración, por ejemplo, en edificios y barcos, se pueden realizar mediciones de velocidad y después convertirlas a aceleración.

Las vibraciones deben medirse con relación a un sistema de coordenadas que parta desde un punto desde el que se considera que las vibraciones entran en el cuerpo humano. En la Figura 1 se muestran los principales sistemas de coordenadas pertinentes.

Los transductores deben situarse para determinar la vibración en el punto de contacto entre el cuerpo humano y la fuente de vibración. La vibración que se transmite al cuerpo debe medirse sobre la superficie entre el cuerpo y dicha superficie.

En la norma se definen procedimientos de evaluación de las vibraciones que incorporan métodos para el promedio de vibraciones en el tiempo y en bandas de frecuencia. La respuesta en frecuencia del transductor de vibraciones y la señal asociada acondicionada antes del procesado de la señal deber ser apropiada al rango de frecuencias especificado en la norma.

La duración de la medición debe ser lo suficiente como para asegurar una precisión estadística razonable y que la vibración sea típica de las exposiciones que están siendo evaluadas. Debe registrarse la duración de la medición.

## 2.1.5. Evaluación de la vibración

### 2.1.5.1. Método de evaluación básico usando el valor eficaz de la aceleración ponderada

En la norma se expresa que la evaluación de la medición debe incluir siempre mediciones del valor eficaz de la aceleración ponderada (r.m.s.).

El valor r.m.s. de la aceleración ponderada se expresa en metros por segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ) para vibración traslacional y en radianes por segundo al cuadrado ( $rad/s^2$ ) para vibración rotacional. El valor r.m.s. de la aceleración ponderada debe calcularse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$a_w = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

donde

$a_w(t)$  es la aceleración ponderada en función del tiempo, en metros por segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ) o radianes por segundo al cuadrado ( $rad/s^2$ );

$T$  es la duración de la medición, en segundos.

En los casos donde este método básico puede subestimar los efectos de las vibraciones, valores de pico elevados, choques esporádicos, vibraciones transitorias, se determina también en la norma medidas alternativas descritas a continuación: el valor eficaz móvil de la aceleración ponderada o el valor de dosis de vibración a la cuarta potencia.

### 2.1.5.2. Método del valor eficaz móvil de la aceleración ponderada

El método del valor eficaz móvil de la aceleración ponderada tiene en cuenta choques esporádicos y vibraciones transitorias mediante el uso de una pequeña constante de tiempo de integración. La magnitud se define como un valor máximo de vibración transitoria (MTVV), dado como el máximo en el tiempo de  $a_w(t_0)$ , definido por:

$$a_w(t_0) = \left[ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

donde

$a_w(t)$  es la aceleración instantánea ponderada en frecuencia;

$\tau$  es el tiempo de integración para el promedio móvil;

$t$  es el tiempo (variable de integración);

$t_0$  es el tiempo de observación (tiempo instantáneo).

### 2.1.5.3. Método del valor de dosis de vibración a la cuarta potencia

El método del valor de dosis de vibración a la cuarta potencia es más sensible a los picos que el método de evaluación básico ya que usa como base para el promedio la cuarta potencia en lugar de la segunda potencia del histórico del tiempo de la aceleración. El valor de dosis de vibración a la cuarta potencia (VDV) se define como:

$$VDV = \left[ \int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}$$

donde

$a_w(t)$  es la aceleración instantánea ponderada en frecuencia;

$T$  es la duración de la medición.

### 2.1.5.4. Ponderación en frecuencia

La manera en la que las vibraciones afectan a la salud, al bienestar, a la percepción y al mal del movimiento es dependiente del índice de frecuencia de la vibración. Se requieren diferentes ponderaciones en frecuencia para los diferentes ejes de vibración. Se incluye una ponderación en frecuencia especial para la evaluación de las vibraciones de baja frecuencia que afectan al mal del movimiento.

Las dos ponderaciones en frecuencia principales, relacionadas con la salud, el bienestar y la percepción se presentan en la Tabla 1:

$W_k$  para la dirección z y para la dirección tumbada vertical (excepto cabeza);

$W_d$  para las direcciones x e y, y para la dirección tumbada horizontal.

En la Tabla 1 también se presenta una ponderación en frecuencia principal, relacionada con el mal del movimiento, nombrada  $W_f$ .

En la Tabla 2 se presentan ponderaciones en frecuencia adicionales para los casos especiales de

- mediciones en el respaldo del asiento ( $W_c$ );
- medición de la vibración rotacional ( $W_e$ );
- medición de la vibración bajo la cabeza de una persona tumbada ( $W_j$ ).

Las curvas de ponderación en frecuencia pueden verse en la Figura 2 y la Figura 3.

Las ponderaciones pueden realizarse tanto por métodos digitales como analógicos. Estos métodos se definen en el anexo A de la Norma ISO 2631-1.

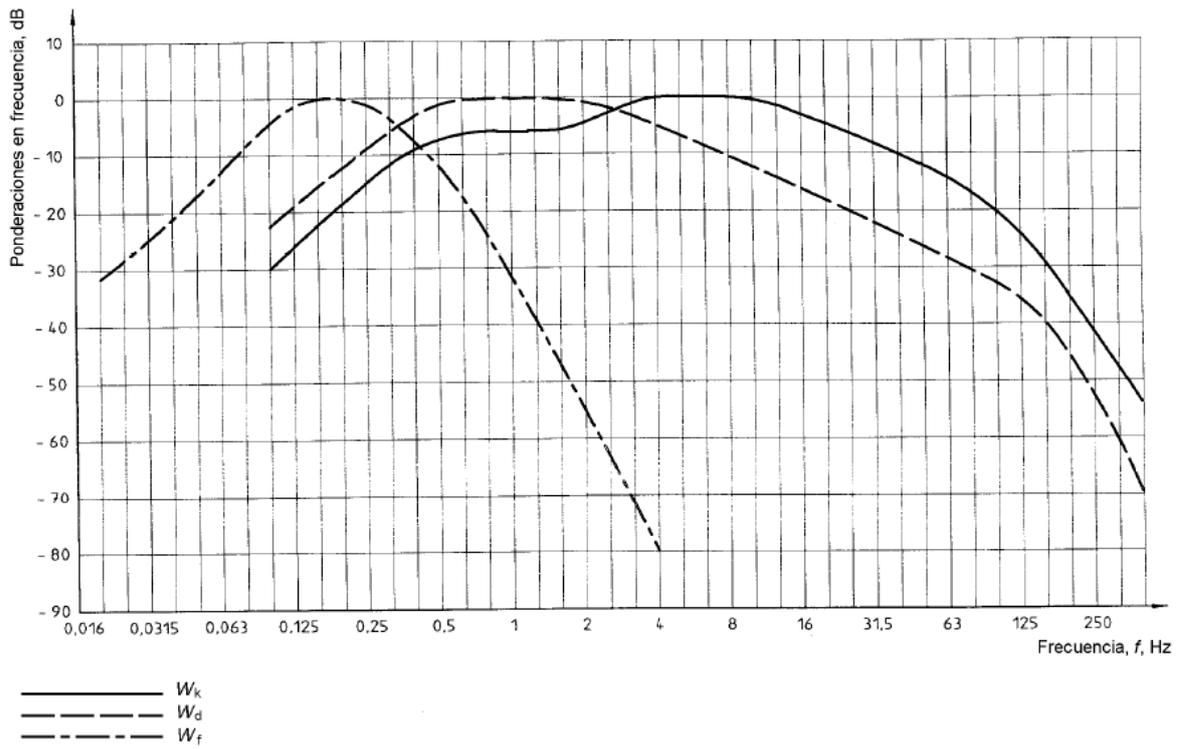


Figura 2 Curvas de ponderación en frecuencia para las ponderaciones principales

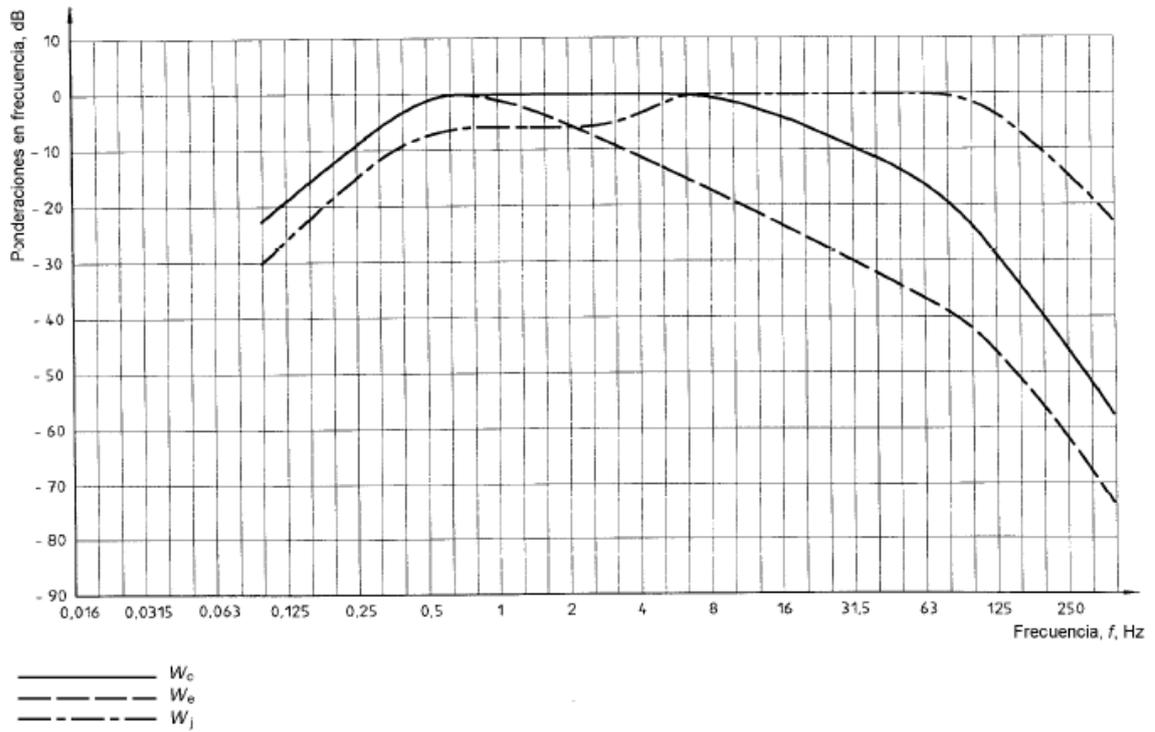


Figura 3 Curvas de ponderación en frecuencia para las ponderaciones adicionales

## 2.2. Efectos de las vibraciones en la salud

En este punto se va a exponer cómo afectan las vibraciones de cuerpo entero a la salud de los trabajadores. En primer lugar, se dará una visión estadística de que sectores están más afectados por la presencia de vibraciones en el trabajo. Posteriormente, se dará una visión de las manifestaciones clínicas efectos de la exposición a vibraciones. Por último, se expondrán como pueden realizarse tareas de prevención y vigilancia para evitar efectos negativos sobre la salud de los trabajadores.

### 2.2.1. Datos estadísticos sobre la exposición de los trabajadores a vibraciones

En la Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo del año 2015 realizada por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo existe un apartado sobre la Exposición a riesgos físicos, ambientales y ergonómicos [4].

En este apartado se presentan los resultados sobre la exposición de los trabajadores a los siguientes riesgos: ruido, temperatura, vibraciones, respiración de humos o gases o polvo, respiración de vapores, manipular o tener la piel en contacto con productos o sustancias químicas, respirar el humo del tabaco de otras personas y manipular o tener contacto con materiales que pueden ser infecciosos.

Los riesgos más señalados por los trabajadores son las altas y bajas temperaturas (36% y 25% de los trabajadores, respectivamente, en 2015) y el ruido fuerte que obliga a levantar la voz para hablar con la gente (28% en 2015). La exposición a vibraciones se encuentra en el 19% y ha ido reduciéndose con los años, 24% en 2010 y 27% en 2005. Ver Figura 4.

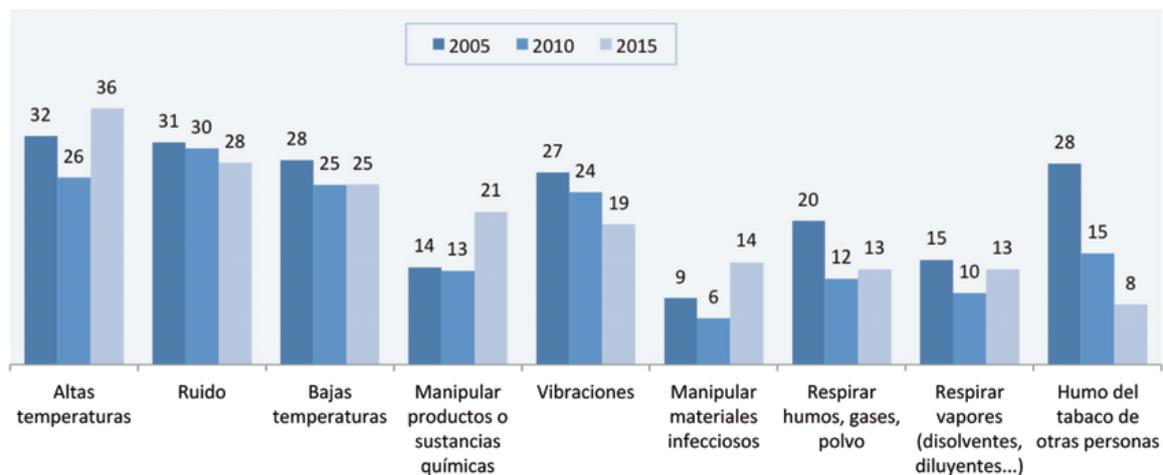


Figura 4 Exposición a riesgos. Evaluación 2005-2015 (%)

En la Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo del año 2011 se dan más datos sobre las vibraciones en el trabajo. En ella se señala que el 13,9% de los trabajadores se ven sometidos a vibraciones en su puesto de trabajo. De ellas, el 8,5% refiera a vibraciones *mano-brazo*, el 2,8% a vibraciones *de cuerpo entero* y el 2,6% a vibraciones *de ambos tipos*. Además, los hombres se ven más afectados que las mujeres, un 21,8% frente a un 5,1% [5].

Por sector de actividad, los trabajadores del sector de la Construcción son los que están expuestos en vibraciones en mayor porcentaje, 29,8% en *mano o brazo*, 6,1% en *cuerpo entero* y 7,7% de *ambos tipos*, seguidos por el sector de la Industria, 16,4% en *mano o brazo*, 5,3% en *cuerpo entero* y 5,2% de *ambos tipos*. Ver Figura 5.

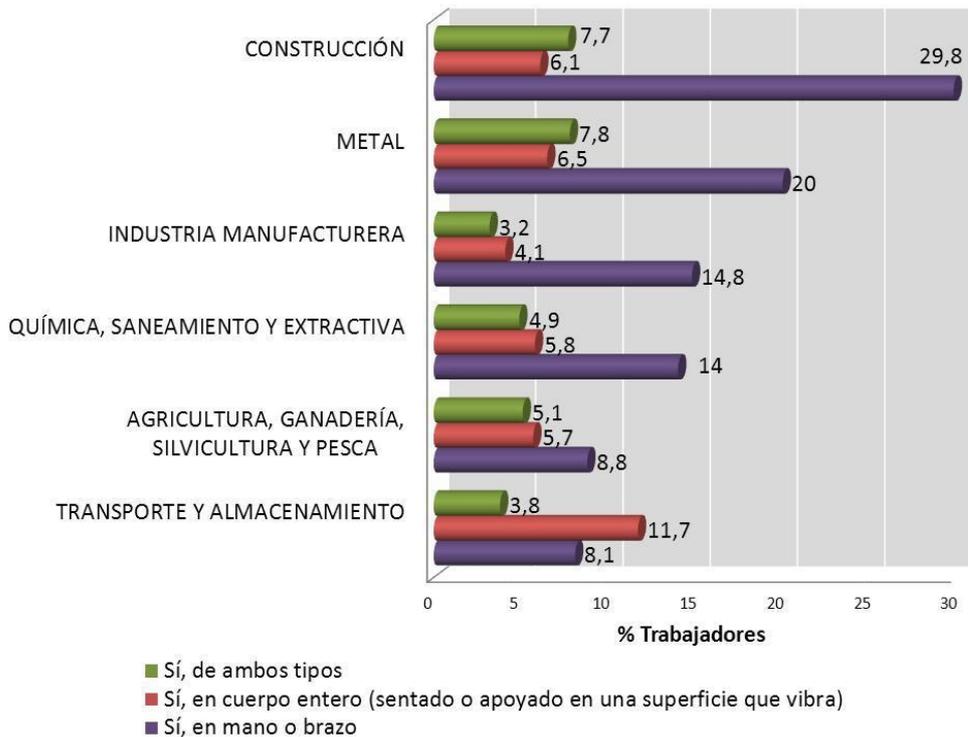


Figura 5 Ramas de actividad en las que son más frecuentes las vibraciones en el puesto de trabajo

Por ocupación, los trabajadores que indican en mayor medida la percepción de vibraciones en su puesto de trabajo son: los Trabajadores de la construcción y la minería y los Obreros industriales. Las ocupaciones más expuestas a vibraciones que afectan al cuerpo entero son: Conductores de vehículos y Obreros industriales. Por su parte, las que destacan en mano brazo y de ambos tipos son: Trabajadores de la construcción y la minería y Mecánicos y empleados de taller. Ver Figura 6.

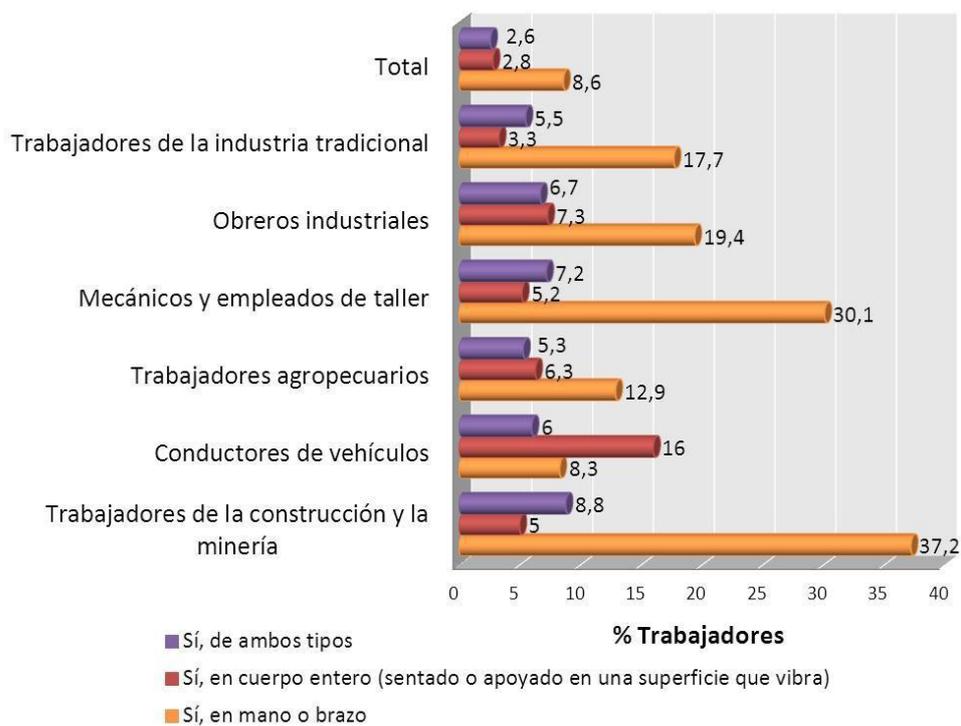


Figura 6 Ocupaciones en las que son más frecuentes las vibraciones en el puesto de trabajo

### **2.2.2. Mecanismo de acción de las vibraciones**

Las vibraciones llegan o penetran en el organismo a través de las extremidades pudiendo ocasionar efectos indeseables bien en las propias extremidades (vibraciones mano-brazo), bien en el resto del cuerpo (vibraciones de cuerpo entero, transmitidas por las extremidades inferiores o por la posición de sentado sobre una superficie que emite vibraciones) [6].

Respecto a la percepción de las vibraciones conviene destacar que el organismo no dispone de un receptor especializado en la captación de las vibraciones, sino que son captadas por receptores situados en diversas zonas corporales: oído interno, los ojos (que informan de los movimientos), los músculos que contienen receptores sensibles al estiramiento, las articulaciones y los tendones.

Sobre esta base, el mecanismo de acción de las vibraciones se basa en el hecho de que el cuerpo humano, al igual que cualquier estructura mecánica, tiene frecuencias de resonancia a las que presenta dos tipos de respuesta mecánica, la transmisibilidad y la impedancia.

Con relación a las vibraciones mano-brazo, la transmisión de las vibraciones depende de las características físicas de la vibración (magnitud, frecuencia, dirección) y de la respuesta dinámica de la mano. Así las vibraciones de baja frecuencia transmitidas a través del brazo son poco atenuadas a lo largo de la mano y el antebrazo. La atenuación en el codo va a depender de la postura del brazo del trabajador, ya que la transmisión de vibraciones suele disminuir a medida que aumenta el ángulo de flexión en la articulación del codo. Sin embargo, en la exposición a altas frecuencias, la transmisión de vibraciones disminuye progresivamente a medida que aumenta la frecuencia, y por encima de 150 a 200 Hz la mayor parte de la energía de vibración se disipa en los tejidos de la mano y los dedos. Por otra parte, y respecto a la impedancia, se sabe que influye la constitución corporal y las diferencias estructurales de las diversas partes de la extremidad superior, habiéndose puesto de manifiesto que las variaciones de impedancia dependen considerablemente de la frecuencia y dirección del estímulo de la vibración.

Respecto a las vibraciones de cuerpo entero, la transmisibilidad en el organismo va a depender en gran medida de la frecuencia de la vibración, del eje de la vibración y de la postura del cuerpo. Así, una vibración vertical percibida a través de un asiento va a causar vibraciones en varios ejes: tronco, cuello y cabeza. La transmisibilidad suele alcanzar su valor máximo alrededor de las frecuencias comprendidas entre 3 y 10 Hz. A su vez la impedancia del cuerpo indica la fuerza que se requiere para que el cuerpo se mueva a cada frecuencia y aunque depende de la masa corporal, nuestro organismo suele presentar resonancia en torno a la frecuencia de 5 Hz [7].

En la gran mayoría de los casos, la exposición a las vibraciones de cuerpo entero se produce como consecuencia del manejo de vehículos en posición de sentado, en donde las vibraciones se transmiten a través del asiento y del respaldo del conductor. Cuando se realizan trabajos sobre superficies que vibran, la vibración se transmite a través de los pies.

### **2.2.3. Manifestaciones clínicas de los efectos de las vibraciones**

Se va a considerar separadamente el síndrome de vibración mano-brazo y el síndrome de vibración de cuerpo entero.

#### **Síndrome de vibración mano – brazo**

Este síndrome puede dar origen a alteraciones vasculares, alteraciones neurológicas y a trastornos musculoesqueléticos.

##### *Alteraciones vasculares*

Los trastornos vasculares debidos a la exposición a vibraciones van a depender de una serie de factores entre los que habrá que contemplar en primer lugar la dosis de vibración recibida con relación al tiempo de exposición y en segundo lugar hay que prestar atención a una serie de factores de riesgo o modificadores de efectos que van a condicionar la aparición de estos

trastornos y la intensidad del mismo: temperatura, flujo de aire, humedad, ruido y características individuales como alteraciones preexistentes del metabolismo lipídico o diabetes y hábitos tales como el fumar cigarrillos o el uso de determinados medicamentos.

La característica fundamental de las alteraciones vasculares debidas a la exposición a vibraciones es la palidez de los dedos de la mano y que es la manifestación más importante del fenómeno o síndrome de Raynaud, conocido también como enfermedad vaso espástica traumática, enfermedad del dedo blanco o dedo blanco inducido por vibraciones [8].

#### *Alteraciones neurológicas*

Los trastornos neurológicos debidos a la exposición a vibraciones no están lo suficientemente estudiados, al menos desde un punto de vista estrictamente neurológico, aunque sí se han puesto de manifiesto, con más frecuencia, los trastornos asociados a efectos musculares, esto es, al binomio que constituyen las lesiones neuro-musculares.

Algunos estudios han postulado que la exposición continua a vibraciones puede originar trastornos de los nervios periféricos.

#### *Trastornos músculo- esqueléticos*

Los trastornos musculoesqueléticos (TME) se pueden definir como lesiones que afectan principalmente a los tejidos blandos del aparato locomotor, esto es, músculos, tendones, nervios y articulaciones. El síntoma predominante es el dolor, asociado a inflamación, pérdida de fuerzas y dificultad para realizar algunos movimientos.

### **Síndrome de vibración de cuerpo entero**

*Los síntomas que producen las vibraciones de cuerpo entero se relacionan, en general, con efectos de tipo agudo tales como la incomodidad y la reducción de la capacidad de trabajo debido a la fatiga que las vibraciones producen en el organismo, aunque también se han puesto de manifiesto alteraciones de tipo crónico sobre determinados órganos del cuerpo. Ver*

#### Tabla 3.

##### *Mal del transporte*

Los trabajadores del Sector Transporte pueden sufrir el llamado “mal del transporte”, especialmente aquellos que trabajan a bordo de embarcaciones, ya sean de mercancías, buques de pesca o del transporte de viajeros. En general los vehículos transmiten al organismo las vibraciones por ellos producidas, en una gama de frecuencias que oscilan entre 0,8 y 2 Hz (a bordo de embarcaciones entre 0,1 y 0,3 Hz) y los efectos variarán en función del tiempo de estimulación. Entre los síntomas se encuentran palidez, sudoración fría, náuseas y vómitos.

##### *Alteraciones del sistema nervioso central y de la esfera psíquica.*

Las manifestaciones más frecuentes se caracterizan por malestar general, vértigo, cefaleas e irritabilidad. Cuando concurren una serie de interacciones entre el órgano vestibular, el aparato de la visión y la esfera psíquica se pueden producir ilusiones ópticas acompañadas de mareos. Como ejemplo puede valer la sensación de movimiento o desplazamiento cuando se está sentado en un vagón de un tren parado y se mueve el tren situado en la vía contigua.

##### *Alteraciones de la columna vertebral*

La exposición a vibraciones de cuerpo entero, tanto de altas como de bajas frecuencias, puede ocasionar daños en la columna vertebral, habiéndose demostrado que tanto la intensidad de la vibración como el tiempo de exposición, implican un aumento del riesgo, mientras que los periodos de descanso disminuyen el mismo.

### Alteraciones oftalmológicas

A nivel del órgano de la visión se pueden presentar: déficit de la agudeza visual, ilusiones ópticas y nistagmus, siendo este un movimiento involuntario e incontrolable de los ojos que puede ser horizontal, vertical, rotatorio, oblicuo o una combinación de ellos. El nistagmo está asociado a un mal funcionamiento en las áreas cerebrales que se encargan de controlar el movimiento, pero en este contexto de la exposición a vibraciones merecen especial mención los llamados nistagmus periféricos bien por causa neuromuscular o por alteraciones del laberinto.

### Otras alteraciones

Destacan alteraciones gastrointestinales; alteraciones renales; trastornos circulatorios caracterizados por una relativa frecuencia de hemorroides y varices, aunque relacionados también con posturas sentadas de larga duración como ocurre en los conductores de transporte público y alteraciones sobre los órganos reproductores femeninos, entre los que destacan la inflamación de anexos y los desórdenes menstruales.

FRECUENCIA	ORIGEN DE LA VIBRACIÓN	EFECTO SOBRE EL ORGANISMO
<b>Muy baja (&lt; 1 Hz)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Transporte: avión, coche, barco, tren (movimiento de balanceo)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Estimulación del laberinto</li><li>Trastornos del SNC<sup>1</sup>: mareos y vómitos (mal del transporte)</li></ul>
<b>Baja (1 – 20 Hz)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Transporte de pasajeros y/o mercancías</li><li>Vehículos industriales, carretillas, etc.</li><li>Tractores y maquinaria agrícola</li><li>Maquinaria de obra</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Lumbalgias, hernias, lumbociáticas</li><li>Pinzamientos discales</li><li>Agravación de lesiones raquídeas</li><li>Síntomas neurológicos: variación del ritmo cerebral, dificultad del equilibrio.</li><li>Trastornos de la visión</li><li>Trastornos gastrointestinales</li><li>Trastornos renales</li><li>Trastornos neuropsíquicos</li></ul>

Tabla 3 Esquema de los efectos de las vibraciones de cuerpo entero a tenor de la frecuencia de exposición y el origen de estas

## 2.2.4. Criterios para la prevención de los efectos de las vibraciones

Una vez llevada a cabo una evaluación de riesgos en el lugar de trabajo y una vez medida la exposición a las vibraciones por medio de las técnicas pertinentes, la prevención técnica debe tender a disminuir la vibración que se transmite a cualquier zona del cuerpo humano mediante una serie de acciones que se pueden agrupar en tres apartados:

1. Reducción de la vibración en origen: a nivel de la fuente emisora de vibraciones. Es el fabricante de las herramientas o de la maquinaria el responsable de conseguir no solo que la intensidad de la vibración sea tolerable, sino que los accesorios que tengan estos equipos como empuñaduras, asientos, etc., tengan un diseño ergonómico adecuado.
2. Aislamiento de vibraciones: para minimizar la transmisión de vibraciones, mediante el uso de aislantes a nivel de los elementos elásticos en los apoyos de las máquinas, a nivel de las empuñaduras de las herramientas, los asientos, etc.
3. Utilización de equipos de protección personal: en aquellas situaciones en que no sea posible minimizar la vibración transmitida al cuerpo, se deberán utilizar equipos de

<sup>1</sup> Sistema Nervioso Central

protección individual, como guantes, cinturones o botas, que aíslen la transmisión de vibraciones.

En la Tabla 4 y a modo de resumen, se concretan algunos criterios preventivos en función del tipo de vibración transmitida.

<b>PREVENCIÓN DE LAS VIBRACIONES</b>	
<b>VIBRACIONES MANO-BRAZO</b>	<b>VIBRACIONES DE CUERPO ENTERO</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información a los trabajadores acerca de la exposición y el riesgo</li> <li>• Formación de los trabajadores sobre el uso correcto de las herramientas vibrátiles</li> <li>• Elección de maquinaria con bajo nivel de vibración</li> <li>• Mantenimiento adecuado de los equipos</li> <li>• Sujetar las herramientas de trabajo con la menor fuerza posible</li> <li>• El hábito de fumar aumenta los efectos de las vibraciones</li> <li>• Utilización de equipos de protección individual adecuados, en especial guantes anti vibratorios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información a los trabajadores acerca de la exposición y el riesgo</li> <li>• Formación de los trabajadores sobre el uso correcto de las plataformas vibrátiles</li> <li>• Reducción de la exposición mediante técnicas apropiadas</li> <li>• Reducción de la exposición en su origen</li> <li>• Disminuir la transmisión de vibraciones</li> <li>• Control y evaluación periódica de vibraciones</li> <li>• Adoptar posturas idóneas durante el trabajo</li> <li>• Disminuir el tiempo de exposición:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ciclos de trabajo cortos</li> <li>○ rotación de los trabajadores</li> </ul> </li> </ul>

*Tabla 4 Criterios para la prevención de vibraciones*

## **2.3. Estudio de artículos científicos relacionados**

A continuación, se expondrán varios trabajos de investigación relacionados con la tarea de medir y procesar las vibraciones que se transmiten al asiento del conductor de un tractor. Nos centraremos, sobre todo, en la toma de datos y el procesado de estos, comparándolo con cómo se ha hecho en el caso de nuestra aplicación.

### **2.3.1. Cuong 2013. “Effects of tyre inflation pressure and forward speed on vibration of an unsuspended tractor”**

En esta investigación se estudia la relación entre la intensidad de las vibraciones, la velocidad del tractor, la humedad del suelo y la presión de las ruedas para diseñar los sistemas de suspensión en tractores. Este artículo ha sido llevado a cabo por Do Minh Cuong y otros miembros de la Universidad de Nanjing, China [9].

#### **2.3.1.1. Materiales y métodos**

Para las pruebas se ha utilizado un tractor modelo Changfa – CF200 sin ningún tipo de suspensión. Para determinar los niveles de vibración en el cuerpo del tractor se han utilizado dos acelerómetros de dirección única (CA-YD 185TNC con ancho de banda entre 0,5-5000 Hz y aceleración máxima de 1000 m/s<sup>2</sup>) acoplados al punto medio de los ejes frontal y posterior. Un acelerómetro triaxial (CA-YD 152A con ancho de banda entre 0,5-5000 Hz y aceleración máxima de 2500 m/s<sup>2</sup>) se ha acoplado al centro del tractor para medir las aceleraciones en los tres ejes ortogonales. Al mismo tiempo, se ha usado un sensor de presión de aire (NS-F 21121268) para medir la presión de las ruedas y se ha usado un compresor de aire para cambiarla. Para recoger los datos, se ha usado un sistema de adquisición y análisis LMS Test Xpress con una tasa de adquisición de 200 Hz. En la

Figura 7 se muestran los materiales utilizados y en la Figura 8 se muestra el esquema de los sistemas de adquisición de datos.

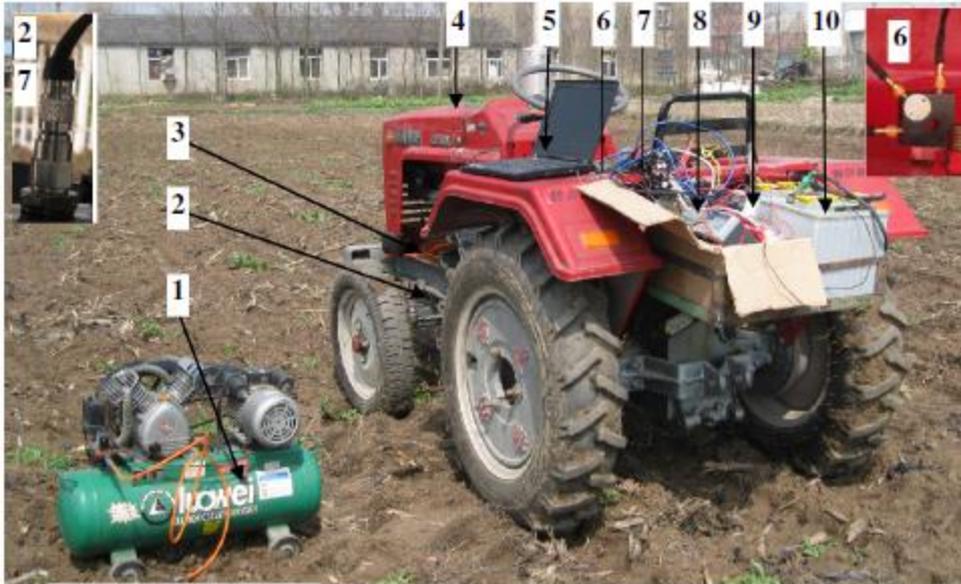


Figura 7 Tractor de pruebas e instrumentos: (1) compresor de aire; (2), (6), (7) acelerómetros; (3) sensor de presión de aire; (4) tractor de pruebas; (5) ordenador; (8) sistema de adquisición y análisis de datos LMS; (9) transformadores; (10) baterías.

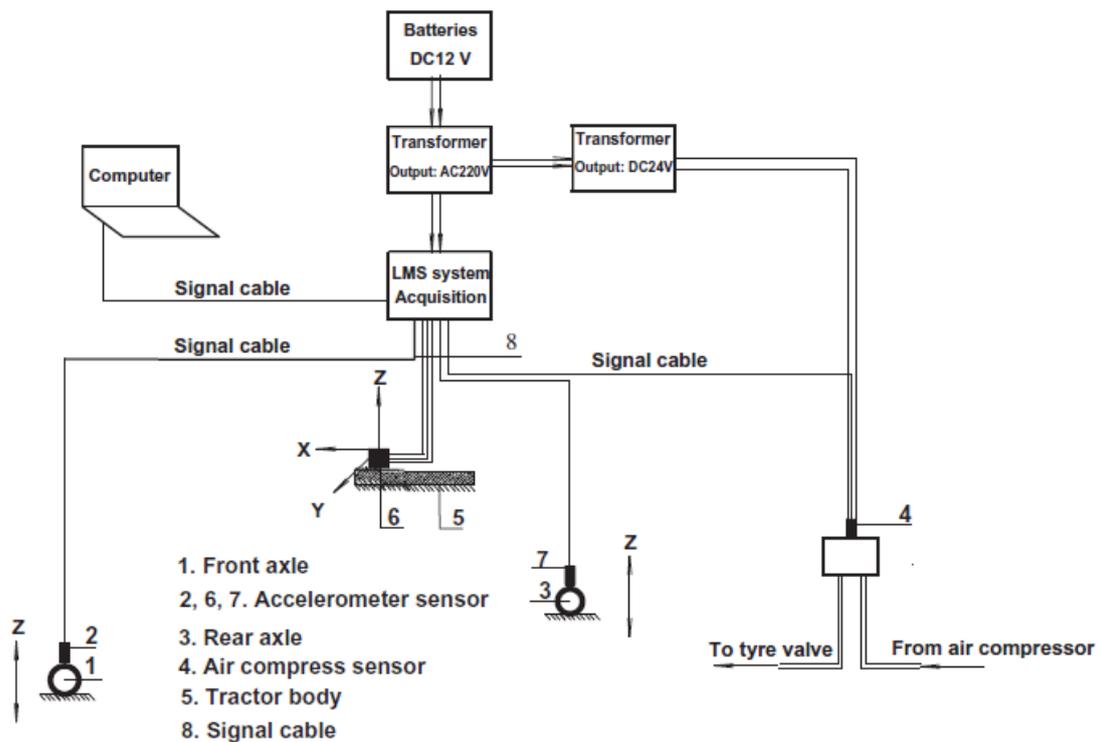


Figura 8 Esquema del sistema de medida y adquisición

### 2.3.1.2. Condiciones de las pruebas

Como campo de pruebas se utilizó un campo de cultivo en Nanjing, China. La textura del suelo era arcillosa y su composición era: arena 56%, fango 28%, y arcilla 16%. Para humedad del suelo del 48,3%, la resistencia a la penetración era de 17, 19 y 31 kPa para profundidades de 0-5, 5-10

y 15 cm respectivamente, mientras que para una humedad del 62,4%, la resistencia a la penetración era de 13, 17 y 24 kPa para profundidades de 0-5, 5-10 y 10-15 cm, respectivamente.

Cada prueba de campo se realizó en una pista distinta con una capa superficial de 15 cm, aproximadamente, y humedad del suelo de 48,3% y 62,4%. Las aceleraciones se midieron en una línea recta por un total de 90 casos: 75 de ellos a tres velocidades constantes de 1,16, 1,49 y 1,79 m/s durante las que se incrementó la presión de las ruedas de 90 a 210 kPa en la delantera y de 60 a 180 kPa en las traseras, para una humedad del 48,3%; 15 casos a una velocidad de 1,43 m/s durante la cual se incrementó la presión de las ruedas delanteras de 90 a 210 kPa y de 60 a 180 kPa en las ruedas traseras para una humedad del 62,4%. La temperatura era de 11 °C, Cada casi se realizó tres veces con un tiempo de medida de 30s.

### **2.3.1.3. Resultados**

*Variación del valor RMS de la aceleración para humedad del suelo del 48,3%*

Los valores de aceleración en el eje frontal, eje trasero y cuerpo del tractor siempre crecieron con la velocidad, pero no siempre crecieron con el aumento de la presión de las ruedas.

*Variación del valor RMS de la aceleración para humedad del suelo del 62,4%*

El experimento se repitió para valores de la humedad del suelo de 62,4% con cinco niveles de presión de las ruedas a velocidad constante de 1,43 m/s. Las tendencias de la aceleración para los ejes frontal y trasero y para el cuerpo de la aceleración fueron las mismas que en el caso anterior. Se encontraron importantes diferencias entre la magnitud de la aceleración en los ejes frontal y trasero. Cuando la presión de las ruedas delanteras aumentó de 90 a 210 kPa y la de las ruedas traseras aumentó de 60 a 180 kPa, los valores de aceleración r.m.s. aumentaron significativamente de 0,374 a 0,664 m/s<sup>2</sup> en el eje frontal y de 0,273 a 0,477 m/s<sup>2</sup> en el eje trasero. Por tanto, en un campo con un 62,4% de humedad, una reducción en la presión de las ruedas puede ser un método adecuado para reducir la vibración de los tractores.

## **2.3.2. Deboli 2017. “Whole-body vibration: Measurement of horizontal and vertical transmissibility of an agricultural tractor seat”**

En este trabajo se realizan pruebas utilizando un tractor para comprobar que los valores de vibraciones de los asientos de los tractores se encuentran dentro de los límites marcados por la normativa europea. Las pruebas se realizaron sobre diferentes terrenos, con dos velocidades y dos presiones de los neumáticos diferentes y para diferentes masas del tractor. Para cada configuración se repitieron las pruebas tres veces. Las aceleraciones se midieron en el asiento y en la plataforma de la cabina y los cálculos se han realizado siguiendo la norma ISO 2631. Esta investigación ha sido llevada a cabo por Roberto Deboli y más miembros del Instituto para la Agricultura y Maquinaria terrestre del Consejo Nacional de Investigación Italiano [10].

### **2.3.2.1. Materiales y métodos**

Para verificar los valores de confort dados por el asiento, las pruebas se han realizado usando un tractor 4WD definido como una clase II Categoría A por la Directiva 78/764/EEC. Se pueden ver las características del tractor en la Tabla 5 y las características principales del asiento en la Tabla 6.

### **2.3.2.2. Características de operación**

La velocidad del tractor se monitoriza por radar. Tres tipos de pruebas de campo se realizaron para investigar la transmisibilidad del asiento, con el tractor recorriendo cuatro superficies diferentes (Figura 9), pero con configuraciones diferentes:

1. Tractor descargado, dos presiones de neumáticos (90 y 160 kPa) y una velocidad (2,78 m/s)
2. Tractor descargado, una presión de neumáticos (160 kPa) y dos velocidades (2,78 m/s y 5,76 m/s)
3. Tractor descargado, con lastre y con lastre más suplemento, presión de 160 kPa y velocidad de 2,78 m/s.

Ítem	Unidad de medida	Valor
Potencia del tractor	kW	93
Desplazamiento	cm <sup>3</sup>	6720
Cilindros	n	6
Base de la rueda	mm	2661
Ancho de la pista frontal	mm	1407
Ancho de la pista trasera	mm	1426
Carga en vacío	kg	3770
Suspensión de la cabina		Silent-blocks
Suspensión de los ejes		Ninguna
Ruedas delanteras	320/70 R 24	
Ruedas traseras	480/70 R 30	

*Tabla 5 Características del tractor de pruebas*

Tipo de suspensión	Neumática
Tipo de dampers	Hidráulico
Categoría (directiva 78/764 EEC)	II y III
Aislador fore/aft	No
Suspensión lateral	No

*Tabla 6 Características del asiento*

### 2.3.2.1. Instrumentos

Las aceleraciones se han medido a lo largo de tres direcciones perpendiculares usando dos acelerómetros triaxiales. El primero se colocó en el suelo de la cabina del tractor y el segundo en la superficie del asiento del operador, ver Figura 10. La señal de salida de los acelerómetros se procesa en tiempo real a través de ocho canales NI (National Instruments, 9402). El Asistente de Vibración y Sonido de National Instruments se utilizó para el post procesamiento de los datos. El tiempo de adquisición de cada prueba fue siempre de más de 10 minutos.

### 2.3.2.2. Resultados

*Pruebas con diferentes presiones (90 y 160 kPa) y la misma velocidad (2,78 m/s) en diferentes superficies*

En el primer set de pruebas, la superficie cruzada fue el parámetro más influyente en los valores totales de la vibración tanto en el asiento como en la plataforma. En cuanto a la presión de las ruedas, una tendencia incremental en la vibración media se observó con la presión más alta, ver Figura 11.

*Pruebas con la misma presión (160 kPa) y diferentes velocidades (2,78 y 5,56 m/s) en diferentes superficies*

Con diferentes velocidades, se observan diferentes valores totales de vibración en casi todas las superficies, excepto en el césped, ver Figura 12. Tanto en la plataforma como en el asiento, se alcanzaron valores de aceleración mayores de 2 m/s<sup>2</sup> a velocidad de 5,56 m/s en la arcilla y en el camino.

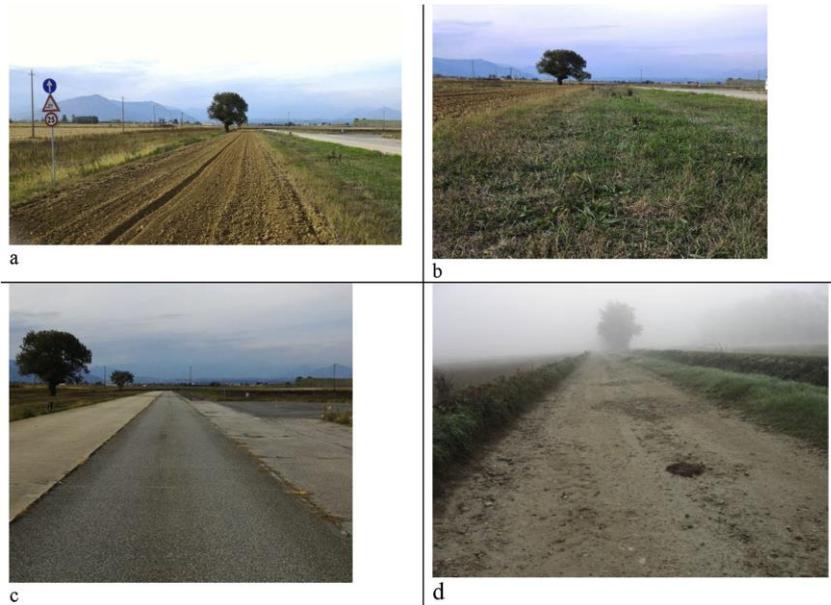


Figura 9 Cuatro campos de pruebas: a) arcilla, b) césped, c) asfalto, d) camino de tierra



Figura 10 Posiciones de los acelerómetros en el anclaje del asiento (izquierda), y sobre el asiento (derecha)

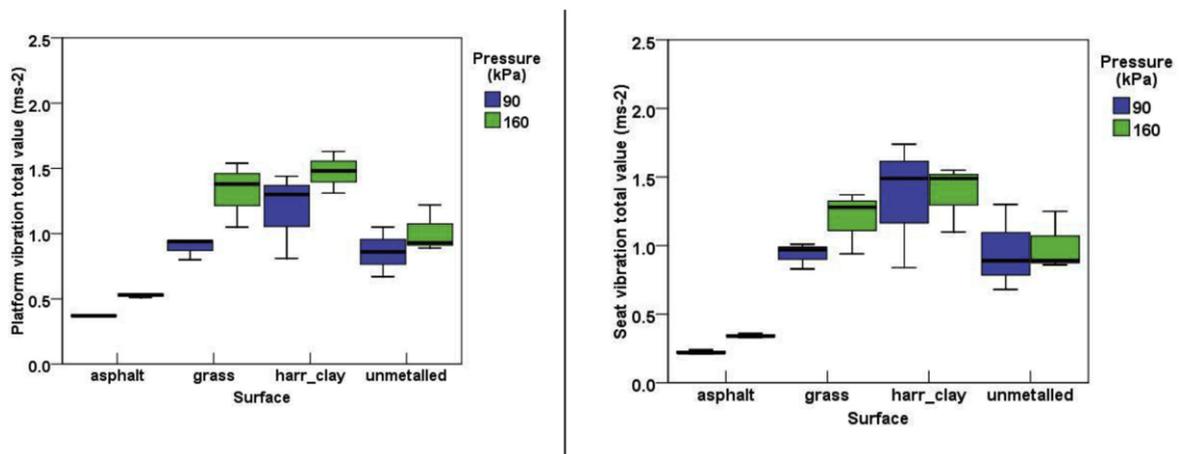


Figura 11 Gráfica de los valores totales de vibración medidos en la plataforma y en el asiento del tractor al cruzar todas las superficies a la misma velocidad de 2,78 m/s con presiones de ruedas de 90 y 160 kPa.

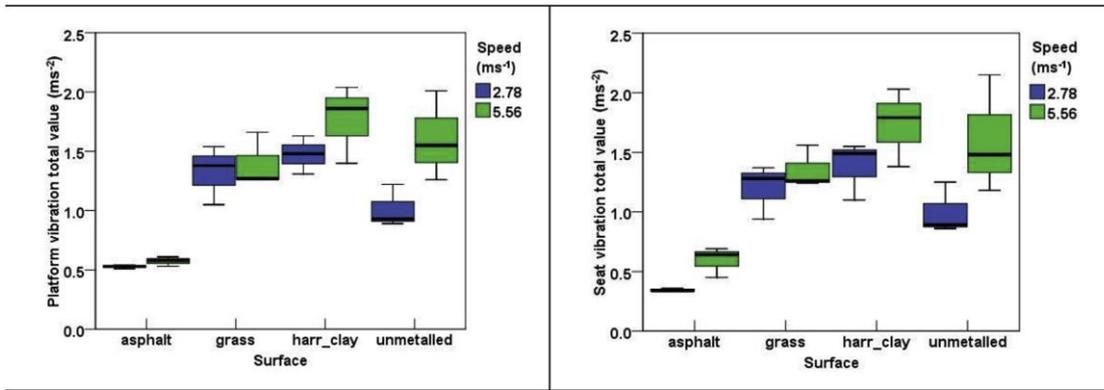
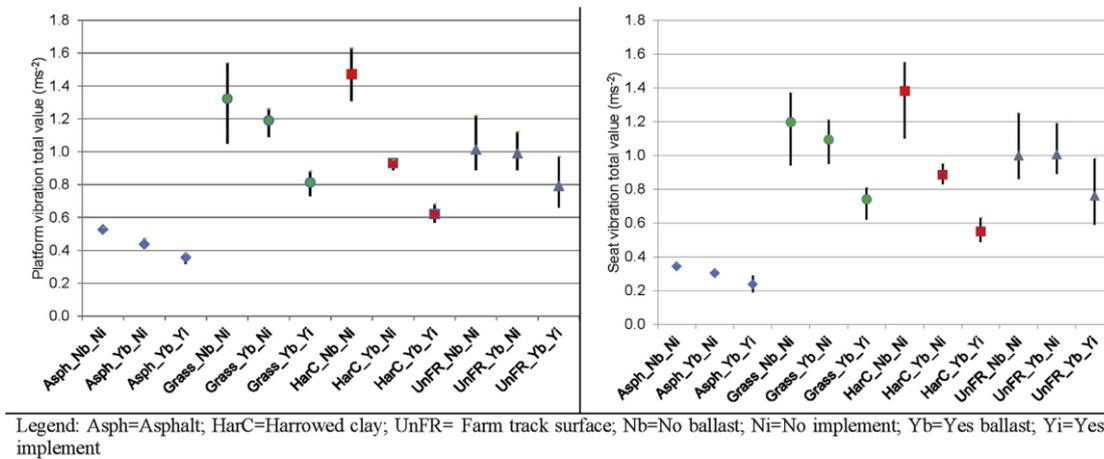


Figura 12 Gráfica de los valores totales de vibración medidos en la plataforma y en el asiento del tractor al cruzar todas las superficies a la velocidad de 2,78 m/s y 5,56 m/s con presión de ruedas de 160 kPa.

Pruebas con la misma presión (160 kPa), la misma velocidad (2,78 m/s) con/sin lastre y con/sin suplementos en diferentes superficies

La presencia del lastre primero y del suplemento después, produjeron valores totales de vibración menores tanto en el asiento como en la plataforma, ver Figura 13.



Legend: Asph=Asphalt; HarC=Harrowed clay; UnFR= Farm track surface; Nb=No ballast; Ni=No implement; Yb=Yes ballast; Yi=Yes implement

Figura 13 Valores totales de vibración (medio, mínimo y máximo) en la plataforma (izquierda) y en el asiento (derecha) obtenidos en las superficies de pruebas con las siguientes con figuraciones: sin lastre -Nb; sin suplemento - Ni; con lastre - Yb; con suplemento -Yi)

### 2.3.2.3. Discusión

En la plataforma una presión de neumáticos causó vibraciones más altas en el tractor al cruzar todas las superficies (especialmente el asfalto y el césped): los resultados en el asiento fueron diferentes, ya que las aceleraciones en la arcilla y el camino la aceleración era bastante similar.

En cuanto a la velocidad, cuanto más alta valores de aceleración más altos se observaron tanto en la plataforma como en el asiento, a través de todas las superficies. Sin embargo, la aceleración no creció con el incremento de la presión de las ruedas.

La ausencia del lastre y del suplemento produjeron aceleraciones más altas, especialmente en el césped y la arcilla. Una dispersión más alta se observó cuando el tractor cruzaba el camino, también en presencia del lastre y del suplemento. Considerando que el tractor se usa en el campo con lastre y suplementos, los valores más bajos de vibración generados en el asiento en estos casos son positivos.

## **2.4. Conclusiones**

En este capítulo se ha realizado, en primer lugar, un estudio de la legislación sobre la que trata el proyecto, la norma UNE-ISO 2631-1. Esto nos ha permitido conocer los métodos de medición de vibraciones que deberemos implementar en la aplicación, además de todo el procesado que tenemos que hacer con los datos para obtener el valor final de la dosis de vibración.

En segundo lugar se ha hecho un estudio del efecto de las vibraciones en la salud, con el objetivo de saber que profesiones son las más afectadas por las vibraciones, además de conocer los distintos efectos negativos sobre la salud que producen y como pueden evitarse o prevenirse.

Por último, se han descrito dos artículos científicos relacionados con el tema del proyecto, que es la medición de vibraciones en maquinaria agrícola, con ello se ha conseguido ver otros método para la medición de las vibraciones, además de los distintos factores que pueden hacer que las vibraciones recibidas aumenten o disminuyan.

## Capítulo 3. Materiales

En esta sección se van a describir los materiales que se han utilizado para realizar este proyecto. En primer lugar, se hará un análisis de las características de los teléfonos móviles o *smartphones* utilizados para las pruebas. En segundo lugar, se explicará el funcionamiento del banco *squeak and rattle*, así como cada uno de los elementos que lo componen como el excitador y el brazo vibrador, analizando los acelerómetros profesionales que miden las vibraciones en este sistema. A continuación, se explicará el *hardware* utilizado para la obtención de los datos o DAQ, necesario para obtener los resultados de las pruebas. Una vez revisado el *hardware* utilizado en el trabajo, se procederá a estudiar los programas involucrados en el proyecto, empezando con los programas que nos permiten controlar el brazo de vibraciones y siguiendo con los que nos permite ver los resultados de los acelerómetros en tiempo real. Por último, explicaremos las herramientas utilizadas para el desarrollo de la aplicación, Android Studio, y Matlab para el tratamiento de los resultados.

### 3.1. Smartphone Motorola Moto G 3ª Generación

Este terminal es uno de los utilizados para las pruebas de la aplicación. Cuenta con un sistema operativo Android 6.0.1, un procesador Snapdragon 410 con una CPU Cortex A53 de 4 núcleos a 1.4 GHz.



Figura 14 Motorola Moto G 3ª Generación

Las características técnicas del dispositivo son las siguientes [11], [12]:

#### Diseño

- Alto: 142,1 mm
- Ancho: 72,4 mm
- Grosor: 11,6 mm
- Peso: 155g

#### Pantalla

- Tamaño: 5''
- Tipo pantalla: IPS
- Resolución: 1280 x 720
- Densidad de píxeles: 294 ppp
- Tipo de protección: Corning Gorilla Glass 3

## Software

- Sistema operativo: Android
- Versión: 6.0.1

## Hardware

- Procesador: Qualcomm Snapdragon 410
  - CPU: Cortex A53
  - Núcleos: 4
  - Velocidad: 1.40 GHz
- Almacenamiento:
  - Memoria RAM: 2 GB
  - Memoria interna: 16 GB
  - Ampliación por MicroSD: Sí

## Cámara

- Cámara principal:
  - Resolución: 13 MP
  - Flash: Flash LED Dual
  - Vídeo: Full HD 1080p
- Cámara frontal:
  - Resolución: 5 MP

## Batería

- Capacidad: 2470 mAh
- Batería extraíble: No
- Carga inalámbrica: No

## Conectividad

- NFC: No
- Bluetooth: 4.0 LE
- WiFi: 802.11 b/g/n (2.4 GHz)
- Extras: Certificado IPx7 de protección contra el agua
- Tarjeta SIM:
  - Tipo de tarjeta SIM: microsim
  - Dual SIM: Si
  - Dual SIM 4G: Si
- Redes compatibles:
  - Redes 2G (GSM): 850, 900, 1800, 1900 MHz
  - Redes 3G (HSDPA): 850, 900, 1700, 1900, 2100 MHz
  - Compatible con 3G España: Si
  - Compatible con 4G España: Si

## 3.2. Smartphone Asus Zenfone 550ML

Otro de los dispositivos utilizados es el Asus Zenfone 550ML. Sus características técnicas son las siguientes [13]:



*Figura 15 Asus Zenfone 550ML*

### Diseño

- Alto: 152,2 mm
- Ancho: 77,2 mm
- Grosor: 10,9 mm
- Peso: 170 g

### Pantalla

- Tamaño: 5,5''
- Tipo pantalla: IPS
- Resolución: 1920 x 1080
- Densidad de píxeles: 403 ppp
- Tipo de protección: Corning Gorilla Glass 3

### Software

- Sistema operativo: Android
- Versión: 6.0.1

### Hardware

- Procesador: Intel Atom Z3580
  - Núcleos: 4
  - Velocidad: 2,30 GHz
- Almacenamiento:
  - Memoria RAM: 4 GB
  - Memoria interna: 16 GB
  - Ampliación por MicroSD: Sí

### Cámara

- Cámara principal:
  - Resolución: 13 MP
  - Flash: Flash LED Dual
  - Vídeo: Full HD 1080p
- Cámara frontal:

- Resolución: 5 MP

### **Batería**

- Capacidad: 3000 mAh
- Batería extraíble: No
- Carga inalámbrica: No

### **Conectividad**

- NFC: Si
- Bluetooth: 4.0
- WiFi: 802.11 a/b/g/n/ac (2.4 GHz)
- Tarjeta SIM:
  - Tipo de tarjeta SIM: microsim
  - Dual SIM: Si
  - Dual SIM 4G: Si
- Redes compatibles:
  - Redes 2G (GSM): 850, 900, 1800, 1900 MHz
  - Redes 3G (HSDPA): 850, 900, 1700, 1900, 2100 MHz
  - Compatible con 3G España: Si
  - Redes 4G (LTE): 800, 850, 900, 1700, 2100, 2600 MHz
  - Compatible con 4G España: Si

## **3.3. iPhone 6**

El último teléfono con el que hemos hecho pruebas es un iPhone 6. Sin embargo, en este teléfono, por tener un sistema operativo distinto, no podemos usar nuestra aplicación. Para realizar las pruebas se ha utilizado otra aplicación distinta que toma los datos del acelerómetro instalado y los exporta en fichero .csv para su posterior procesado. Las características principales del dispositivo se exponen a continuación [14]:



*Figura 16 iPhone 6*

### **Diseño**

- Alto: 138,1 mm
- Ancho: 67 mm
- Grosor: 6,9 mm
- Peso: 129 g

### **Pantalla**

- Tamaño: 4,7’’
- Tipo pantalla: LCD IPS con luz LED de fondo
- Resolución: 750 x 1334

#### Software

- Sistema operativo: iOS
- Versión: 12

#### Hardware

- Procesador: Apple A8 64 bits
- Almacenamiento:
  - Memoria RAM: 2 GB
  - Memoria interna: 16/64/128 GB
  - Ampliación por MicroSD: No

#### Cámara

- Cámara principal:
  - Resolución: 8 MP
  - Flash: Flash LED Dual
  - Vídeo: Full HD 1080p
- Cámara frontal:
  - Resolución: 1,2 MP

#### Batería

- Capacidad: 1810 mAh
- Batería extraíble: No
- Carga inalámbrica: No

#### Conectividad

- NFC: Si
- Bluetooth: 4.0
- WiFi: 802.11 a/b/g/n/ac (2.4 GHz)
- Tarjeta SIM:
  - Tipo de tarjeta SIM: nanosim
- Redes compatibles:
  - Redes 2G (GSM): 850, 900, 1800, 1900 MHz
  - Redes 3G (HSDPA): 850, 900, 1700, 1900, 2100 MHz
  - Compatible con 3G España: Si
  - Redes 4G (LTE): 800, 850, 900, 1700, 2100, 2600 MHz
  - Compatible con 4G España: Si

### 3.4. Banco de *squeak & rattle*

Para llevar a cabo las pruebas para la validación de la aplicación se utilizó un banco de *Squeak & Rattle*, formado por un brazo vibrante movido por un excitador Energizer SILVER de la marca MB DYNAMICS. El banco de pruebas se encuentra en el parque científico tecnológico de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos, y es allí donde se han hecho las pruebas de la aplicación.

Las pruebas sobre el banco de *Squeak & Rattle* sirven para medir el impacto de las vibraciones sobre un determinado elemento. Squeak se refiere al ruido inducido por la fricción de dos

superficies en contacto deslizándose una sobre la otra en direcciones opuestas, generado por un movimiento relativo entre dos superficies.

Por otra parte, *Rattle* es el ruido de impacto inducido, cuyas frecuencias de vibración generan frecuencias de ruido de banda ancha a baja frecuencia, siendo el rango de frecuencias barridas entre 50 Hz y 8 kHz. Estos movimientos nos van a permitir generar las vibraciones necesarias para realizar las pruebas de la aplicación, siendo generados por el excitador Energizar SILVER.



Figura 17 Banco de Squeak & Rattle utilizado en los experimentos

### 3.4.1. Excitador SILVER y brazo vibrador

Este excitador es capaz de transferir una fuerza de pico de 89000 N, con un recorrido pico a pico de 50 mm, velocidad máxima de 1,5 m/s, puede alcanzar frecuencias de hasta 2000 Hz y su peso es de 14,9 kg [15].

Este excitador va unido a un brazo vibrante, sobre el cual se encuentran fijados los smartphones que medirán las vibraciones a través de la aplicación desarrollada. Todo el sistema está conectado a un ordenador mediante USB, de tal manera que, mediante un software específico del banco *squeak & rattle*, se puede controlar las excitaciones a las que se somete el banco.



Figura 18 Excitador SILVER y brazo vibrador con el teléfono de pruebas y los acelerómetros instalados

### 3.4.2. Acelerómetros instalados

Para poder controlar las vibraciones generadas, se han instalado en el sistema dos tipos de acelerómetros. En primer lugar, tenemos dos acelerómetros encargados de medir las vibraciones y mandar esta información como realimentación al banco *squeak & rattle*, para poder conocer el estado de la vibración en todo momento. En segundo lugar, se han instalado otros tres acelerómetros conectados a un ordenador para recoger las mediciones de las vibraciones generadas, de tal forma que se pueden procesar los datos posteriormente.

#### 3.4.2.1. Acelerómetros de realimentación

El modelo de estos acelerómetros es PCB 333B40 [16], que corresponde con un acelerómetro piezoeléctrico, que cuenta con una interfaz de análisis de señales, adquisición de datos, e instrumentos que nos permiten registrar los valores de aceleración medidos. Sus principales características son las siguientes:

- Sensibilidad controlada por voltaje, independientemente del tipo de cable o su longitud.
- Señal de salida de baja impedancia, que puede transmitirse sobre cables de longitud variable en entornos hostiles casi sin pérdidas en la calidad de la señal.
- Bajo ruido y señal de voltaje de salida compatible con los equipos de adquisición de datos, análisis de señal y registro de datos.

Su sensibilidad depende de cómo se acople a la superficie vibrante, como se puede comprobar en la siguiente figura:

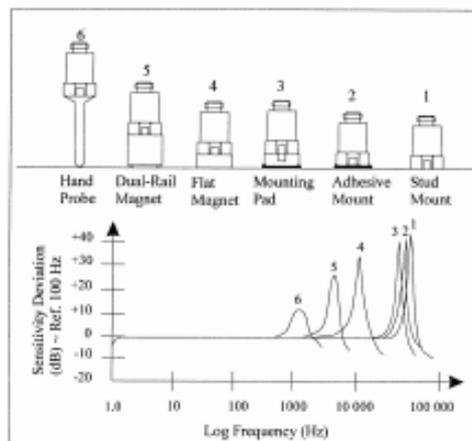


Figura 19 Sensibilidad del acelerómetro según su montaje

### 3.4.3. Acelerómetros de medida de vibraciones

Estos acelerómetros están conectados al ordenador. El modelo utilizado es *Brüel & Kjaer 4507* [17], correspondiente a un acelerómetro electrónico piezoeléctrico integrado.

Este tipo de acelerómetros se les denominan CCLD, un nombre genérico que identifica a todos los acelerómetros y productos con acondicionamiento de la señal que operan con alimentación constante de corriente y que obtienen señales de salida moduladas en tensión. Este tipo de dispositivos permiten utilizar cables de bajo coste sin afectar a la calidad de la señal de salida. Dentro de este dispositivo está integrado un preamplificador de bajo ruido que incluye una referencia de voltaje que asegura un margen de error estable sobre el rango de temperatura en el que opera. Entre sus características se encuentran las siguientes:

- Carcasa de titanio con conector hermético.
- Fácil montaje a diferentes objetos de pruebas.
- Baja sensibilidad a los campos electromagnéticos de radio frecuencia.
- Diseño con peso ligero que da una alta relación sensibilidad-peso y una sensibilidad muy baja a factores ambientales.
- Excelente respuesta a baja frecuencia.

Estos acelerómetros están diseñados específicamente para aguantar en ambientes duros. Una combinación de alta sensibilidad, bajo peso y dimensiones físicas pequeñas hacen este modelo ideal para tomar medidas en cuerpos de automóviles, aeronaves, trenes y satélites.



*Figura 20 Acelerómetros B&K 4507*



*Figura 21 Detalle de la instalación de los acelerómetros sobre el brazo vibrador. El de realimentación lleva la etiqueta verde y los otros corresponden a los ejes x (rosa), y (azul) y z (naranja)*

### 3.5. Adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste en sensores, hardware de medidas DAQ y un PC con software programable [18]. Un sistema de adquisición de datos consta de las siguientes partes:



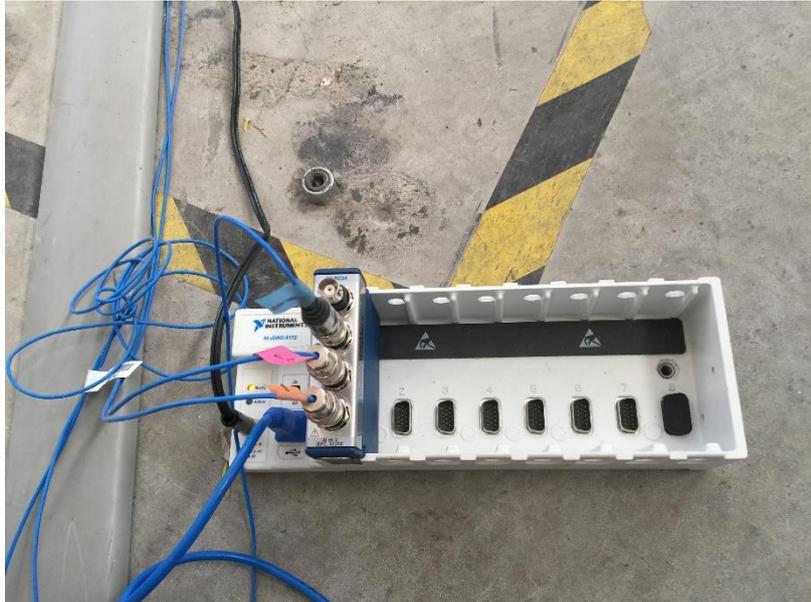
Figura 22 Esquema de un sistema de adquisición de datos



Figura 23 Sistema DAQ montado para las pruebas. Se puede ver la conexión de los acelerómetros con el dispositivo DAQ, y la conexión de este con el PC

En este caso los sensores son los acelerómetros descritos en el apartado anterior.

El dispositivo DAQ utilizado en los experimentos consta del chasis NI cDAQ 9172, y módulos de la serie C, siendo el que hemos utilizado el modelo NI 9234.



*Figura 24 Chasis NI cDAQ 9172 con el módulo NI 9234 al que están conectados los acelerómetros*

La señal de los sensores se digitaliza en el módulo y el chasis controla la temporización y la transferencia de datos en todo el sistema, lo que permite la sincronización de todos los módulos instalados en un solo chasis.

Este sistema es la interfaz entre el PC y las señales provenientes de los acelerómetros. Para realizar esta función, es necesario digitalizar las señales analógicas para que puedan ser procesadas por un ordenador. Los pasos necesarios para esto son: el circuito de acondicionamiento de señales, el convertidor analógico digital (ADC) y el bus del PC.



*Figura 25 Conexión de los acelerómetros con el módulo del DAQ*

El acondicionamiento de las señales es necesario puesto que las señales recibidas pueden no ser aptas para medir directamente, por lo que se las manipula de tal forma que no se dañe el contenido y la calidad de la señal, para que esta pueda acoplarse a la entrada de un convertidor analógico-digital. En nuestro caso, el acondicionamiento que necesita la señal es: amplificación, filtrado, excitación y alineamiento.

Para que una señal pueda ser manipulada por un equipo digital, es necesario convertir la señal analógica en digital mediante un convertidor ADC (Analog-Digital Converter), de tal forma que este dispositivo realiza un muestreo periódico de la señal y estas muestras se transmiten al ordenador mediante un bus.

Los sistemas DAQ se conectan al ordenador finalmente a través de un puerto. Su función principal es reconstruir la señal original a través de las muestras digitales que se han obtenido en el paso anterior. Entre los diferentes tipos de buses que se pueden utilizar se encuentran: USB, PCI

Express, Ethernet e incluso 802.11 WiFi que permite la comunicación inalámbrica entre el DAQ y el ordenador.

### 3.6. Software del banco de pruebas

El software utilizado para el control y la medición de las vibraciones generadas por el banco de *squeak & rattle* es específico y proporcionado por la misma marca a la que pertenece el sistema. En los experimentos con la aplicación se ha usado un programa para hacer los experimentos, este programa es: *Random Vibration Control*.

#### 3.6.1. Random Vibration Control

Este software, proporcionado por la marca Brüel & Kjaer es capaz de barrer un gran rango de vibraciones reales, excitando simultáneamente todas las frecuencias de resonancia, por lo que resulta muy útil para ensayos y test de caracterización de estructuras dinámicas. Se realiza un bucle rápido en el tiempo, lo que permite obtener una gran exactitud de los datos. También permite controlar varios canales simultáneamente y realizar análisis en tiempo real [19].

Las pruebas que genera este programa se configuran introduciendo una densidad espectral de potencia en una tabla de puntos, o importando datos reales reunidos previamente. La tabla consiste en la definición de amplitudes de densidad espectral de potencia y las frecuencias asociadas, considerando las distintas pendientes.

Para prevenir fallos o daños en el dispositivo que se está probando y en el equipo, si se superan los límites del sistema el usuario es avisado inmediatamente, deteniendo las pruebas si fuera necesario.

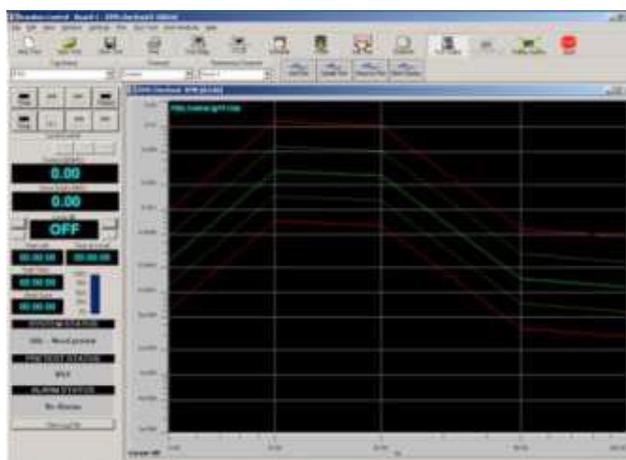


Figura 26 Random Vibration Control. Gráfica del perfil del experimento

### 3.7. Software Signal Express

El software Signal Express de la marca National Instruments nos permite conocer los datos que toman los acelerómetros en tiempo real, mientras hacemos las pruebas. Para poder utilizar este programa es necesario que la tarjeta de adquisición de datos sea compatible, como en este caso.

Signal Express mejora el software existente para los diseños de trabajos de ingeniería que manejan señales ofreciendo medidas interactivas instantáneas que no necesitan de una programación previa. Se puede utilizar para adquirir, generar, analizar, comparar e importar distintas señales. De esta manera se pueden comparar los datos a los que pretendemos llegar con aquellos que están midiéndose en la realidad. Además, Signal Express permite realizar estas acciones con una gran facilidad de uso ya que no es necesario programar ninguna aplicación.

Signal Express permite, además, convertir sus proyectos a código de LabView y exportar los datos obtenidos mediante Microsoft Excel u otros programas, dando formato a los resultados para facilitar su visualización y el tratamiento de estos.

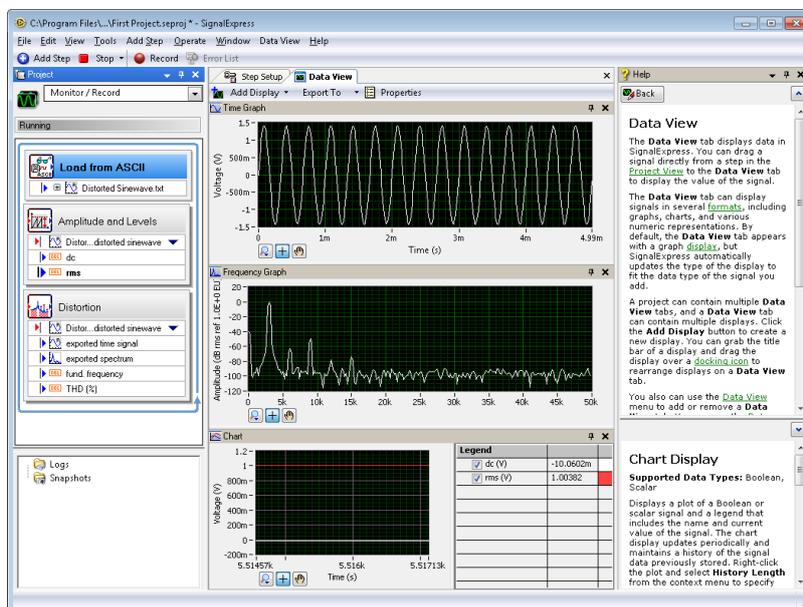


Figura 27 Captura de pantalla del programa NI Signal Express

### 3.8. Software Android Studio

Android Studio es el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial para el desarrollo de aplicaciones para Android y se basa en IntelliJ IDEA [21], que es un IDE para el desarrollo de programas informáticos creado por Jet Brains disponible tanto en una edición para la comunidad como en una edición comercial.



Figura 28 Software para el desarrollo de aplicaciones Android Studio

Cada proyecto en Android Studio contiene uno o más módulos con archivos de código fuente y archivos de recursos [22]. Entre los tipos de módulos se incluyen los siguientes:

- módulos de aplicaciones para Android
- módulos de bibliotecas
- módulos de Google App Engine

De manera predeterminada, Android Studio muestra los archivos del proyecto en la vista de proyectos de Android, Figura 29. Esta vista se organiza en módulos para proporcionar un acceso rápido a los archivos de origen del proyecto.

Cada módulo de aplicación contiene las siguientes carpetas:

- **manifests:** contiene el archivo `AndroidManifest.xml`.
- **java:** contiene los archivos de código fuente de Java.
- **res:** contiene todos los recursos, como diseños XML, cadenas de IU e imágenes.

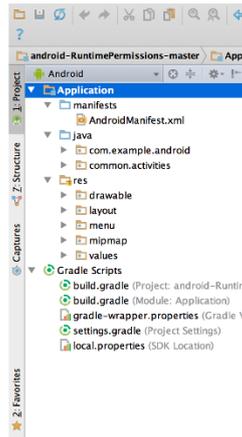


Figura 29 Archivos del proyecto en la vista de Android

La ventana principal de Android Studio consta de varias áreas lógicas que se identifican en la Figura 30.

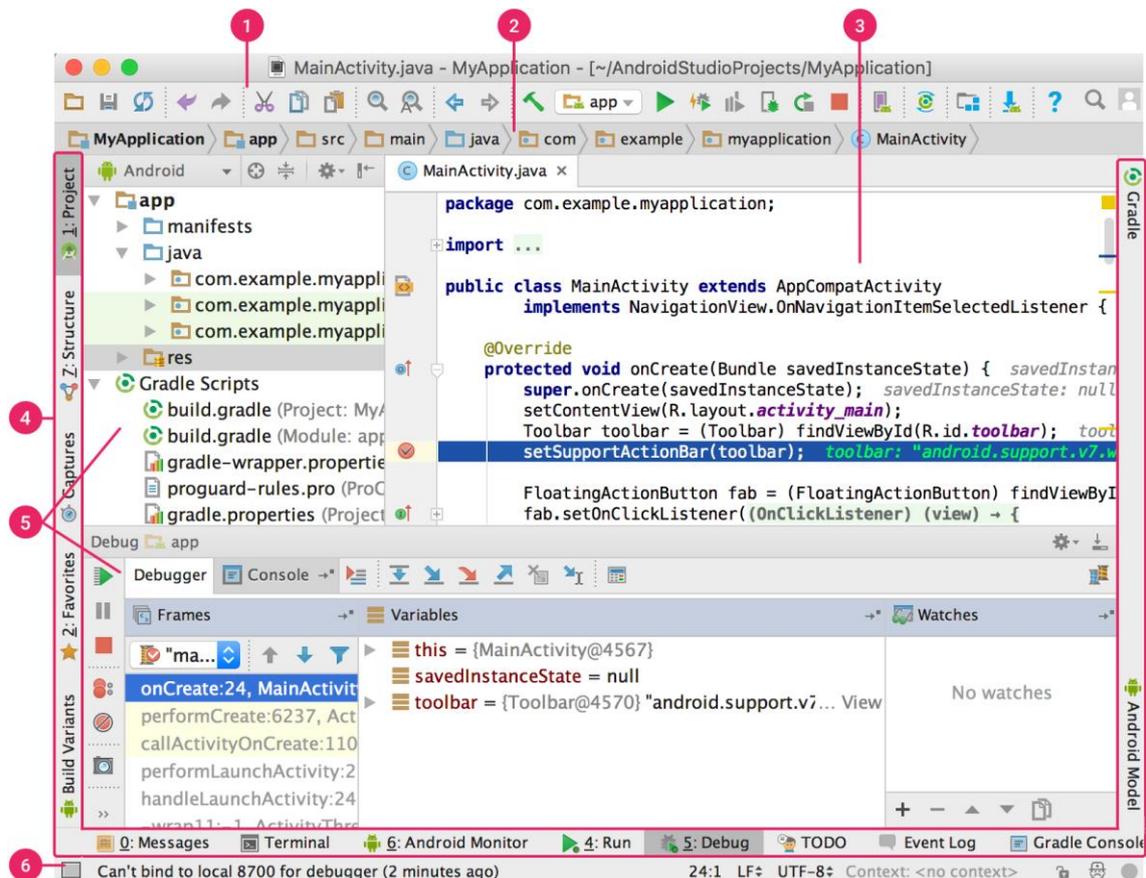


Figura 30 Ventana principal de Android Studio

1. La **barra de herramientas** permite realizar una gran variedad de acciones, como la ejecución de la aplicación y el inicio de herramientas de Android.
2. La **barra de navegación** ayuda a explorar tu proyecto y abrir archivos para editar. Proporciona una vista más compacta de la estructura visible en la ventana **Project**.
3. La **ventana del editor** es el área donde se crea y modifica el código. Según el tipo de archivo actual, el editor puede cambiar. Por ejemplo, cuando se visualiza un archivo de diseño, el editor muestra el editor de diseño.

4. La **barra de la ventana de herramientas** se extiende alrededor de la parte externa de la ventana del IDE y contiene los botones que permiten expandir o contraer ventanas de herramientas individuales.
5. Las **ventanas de herramientas** permiten acceder a tareas específicas, como la administración de proyectos, las búsquedas, los controles de versión, etc. Se pueden expandir y contraer.
6. En la **barra de estado**, se muestra el estado del proyecto y del IDE en sí, como también cualquier advertencia o mensaje.

Android Studio usa Gradle [23] como la base del sistema de compilación, con más capacidades específicas de Android a través del complemento de Android para Gradle [24]. Este sistema de compilación permite hacer lo siguiente: personalizar, configurar y extender el proceso de compilación; crear múltiples APK para la aplicación, con diferentes funciones utilizando el mismo proyecto y los mismos módulos; volver a usar códigos y recursos entre conjuntos de archivos de origen.

Los archivos de compilación de Android Studio se denominan `build.gradle`. Son archivos de texto sin formato que usan la sintaxis Groovy [25] para configurar la compilación con elementos proporcionados por el complemento de Android para Gradle. Cada proyecto tiene un archivo de compilación de nivel superior para todo el proyecto y archivos de compilación de nivel de módulo independientes para cada módulo. Cuando se importa un proyecto existente, Android Studio genera automáticamente los archivos de compilación necesarios.

### 3.9. Software MATLAB

MATLAB es una herramienta de software utilizada, en el caso de este proyecto, para realizar un análisis de los resultados obtenidos, comparando las mediciones obtenidas por el teléfono con las mediciones obtenidas con acelerómetros profesionales, sin embargo, MATLAB puede utilizarse en muchos otros campos como comunicaciones inalámbricas, *deep learning*, visión artificial, procesamiento de señales, finanzas cuantitativas y gestión de riesgos, robótica y sistemas de control, entre otros [26]. MATLAB cuenta, también, con un entorno de desarrollo integrado (IDE) propio.



Figura 31 Software MATLAB para el procesamiento de datos

Las aplicaciones de MATLAB se desarrollan en un lenguaje de propio. Este lenguaje es interpretado, y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo (línea de comandos), como a través de *scripts* (archivos \*.m). Este lenguaje permite operaciones de vectores y matrices, funciones, cálculo lambda, y programación orientada a objetos.

Todas las funciones y bibliotecas de MATLAB están perfectamente documentadas y explicadas, esta documentación está disponible tanto en la página web del programa como en el propio IDE pudiendo acceder a ella sin más que utilizar un comando y el nombre de la función [27].

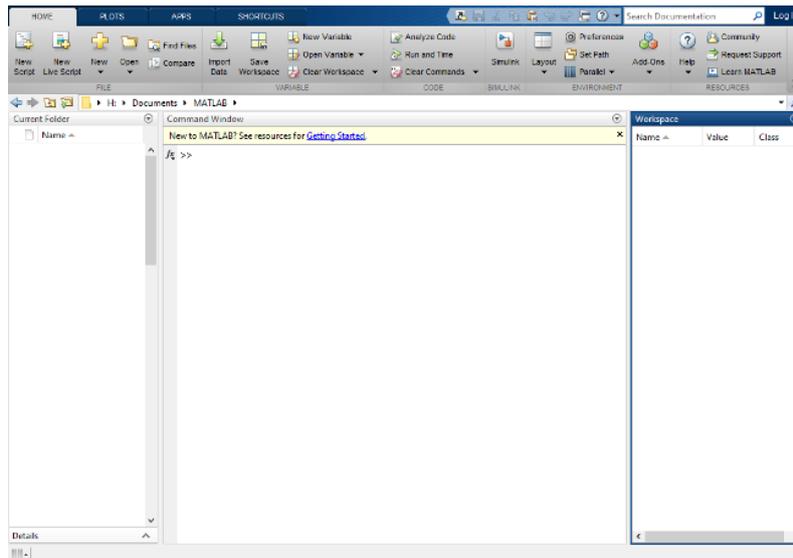


Figura 32 Escritorio predeterminado de MATLAB

### 3.10. Conclusiones

En este capítulo hemos visto los materiales que hemos usado a lo largo del proyecto, tanto hardware como software. Hemos empezado describiendo las características técnicas de los teléfonos móviles que se han usado en los experimentos, siguiendo con el resto del equipo utilizado en las pruebas: el banco de vibraciones y el sistema de adquisición de datos. Esto nos ha permitido conocer el funcionamiento y las limitaciones de estos elementos, con el objetivo de evitar que el mal uso o funcionamiento de cualquiera de ellos nos introduzca una fuente de error en los resultados de las pruebas.

Por último, conocer el software que se describe en el capítulo es imprescindible a la hora de desarrollar la aplicación y realizar los experimentos.

## Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación

En este capítulo se va a describir el proceso seguido para desarrollar la aplicación. En primer lugar, se especifican los requisitos mínimos que debe tener el teléfono móvil en el que se va a instalar la aplicación para que funcione correctamente. A continuación, se especifica como se obtienen los datos de aceleración del dispositivo, en qué API se basan y cómo se implementan en código. Por último, se expondrá como se han procesado los datos hasta obtener el valor final de la dosis de vibración normalizada.

### 4.1. Requisitos del teléfono móvil

Para que la aplicación funcione correctamente y de unos resultados fiables, el dispositivo debe cumplir unos requisitos mínimos:

- Tener instalado el sistema operativo Android versión 5.0.
- Integrar un acelerómetro en el dispositivo.
- Alcanzar una frecuencia de muestreo de al menos 100 Hz.
- Disponer de al menos 4 MB de memoria libre.

### 4.2. Estructura de la aplicación

El principal objetivo de la aplicación es realizar una medición de las vibraciones que afectan a los trabajadores que se ven sometidos a ellas en su puesto de trabajo. Para ello, en primer lugar, se tomarán los datos procedentes del acelerómetro integrado en el dispositivo, para posteriormente realizar los cálculos necesarios para llegar al resultado final.



Figura 33 Esquema del tratamiento de los datos en la aplicación

El resultado nos permitirá obtener el resultado de la dosis de vibración normalizada que recibe el trabajador y saber si se ajusta o no a los valores marcados por la legislación vigente.

### 4.3. Adquisición de datos

Lo primero que se ha hecho en la aplicación es la toma de datos desde el acelerómetro del dispositivo Android. En primer lugar, se explicará el funcionamiento de los sensores de Android, que valores se obtienen de ellos y como se relaciona con los valores de vibración que queremos obtener. En segundo lugar, se explicará cómo se ha implementado en la aplicación todo lo

comentado anteriormente. Por último, se explicará la problemática existente a la hora de elegir la tasa de adquisición de datos y las posibles soluciones que se pueden dar.

### 4.3.1. Sensores en Android

La mayoría de los dispositivos Android tienen sensores integrados que miden el movimiento, la orientación y varias condiciones ambientales. Estos sensores son capaces de proveer datos de gran precisión, que son útiles cuando se quiere monitorizar el movimiento o el posicionamiento del dispositivo en las tres dimensiones, o si se quieren controlar los cambios en el ambiente cerca al dispositivo. Por ejemplo, esto se utiliza en aplicaciones como juegos o aplicaciones del tiempo [28].

La plataforma Android soporta tres categorías de sensores:

- Sensores de movimiento: estos sensores miden las fuerzas de aceleración y las rotacionales en tres ejes. En esta categoría se encuentran acelerómetros, sensores de gravedad, giroscopios, y sensores del vector rotacional.
- Sensores ambientales: estos sensores miden varios parámetros ambientales, tales como temperatura y presión del aire, iluminación y humedad. En esta categoría incluye barómetros, fotómetros y termómetros.
- Sensores de posición: estos sensores miden la posición física del dispositivo. En esta categoría se incluyen sensores de orientación y magnetómetros.

Se puede acceder a los sensores disponibles en el dispositivo y adquirir datos usando el *framework* de Android. Este *framework* proporciona varias clases e interfaces para realizar una amplia gama de operaciones con los sensores.

El *framework* permite acceder a varios tipos de sensores. Algunos de ellos están basados en *hardware* y otros en *software*. Los sensores basados en *hardware* son componentes físicos incluidos en el dispositivo. Los datos se obtienen midiendo directamente propiedades ambientales específicas, como aceleración, fuerza del campo magnético, o cambio angular. Los sensores basados en *software* no son dispositivos físicos, aunque imitan a los sensores basados en *hardware*. Estos sensores obtienen sus datos de uno o más de los basados en *hardware*, llamados a veces sensores virtuales o sintéticos. Los sensores de aceleración y de gravedad son ejemplos de este tipo.

En el caso de nuestra aplicación, se va a usar el acelerómetro, que mide la fuerza de la aceleración en  $m/s^2$  que se aplica al dispositivo en los tres ejes físicos ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), incluyendo la fuerza de la gravedad.

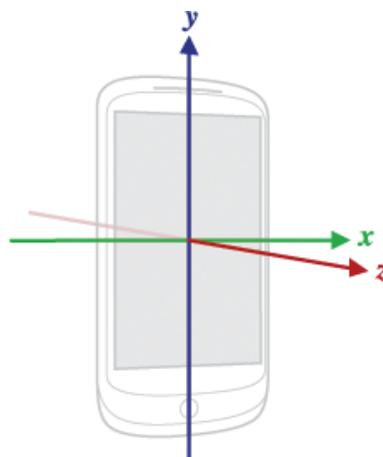


Figura 34 Sistema de coordenadas de Android

El *framework* de Android para sensores permite acceder a los datos de los sensores, excepto el GPS, al cual se accede mediante los servicios de ubicación. El *framework* es parte del paquete `android.hardware`. Las principales clases e interfaces que se incluyen son las siguientes [29]:

Nombre	Tipo	Descripción
<b>SensorManager</b>	Clase	Se usa para crear una instancia del servicio de sensores. Proporciona varios métodos para el acceso a sensores, el registro y la eliminación de registros de las escuchas de eventos de sensores, etc.
<b>Sensor</b>	Clase	Se usa para crear la instancia de un sensor específico.
<b>SensorEvent</b>	Clase	El sistema lo usa para publicar datos del sensor. Incluye los valores de datos de sensores sin procesar, el tipo de sensor, la precisión de los datos y una marca de hora.
<b>SensorEventListener</b>	Interfaz	Proporciona métodos de llamada de regreso para recibir avisos del <code>SensorManager</code> cuando los datos o la precisión del sensor han cambiado.

Tabla 7 Principales clases e interfaces del *framework* para sensores

### 4.3.2. Implementación en la aplicación

Para realizar todo lo explicado anteriormente, en primer lugar, se toman los datos proporcionados por el acelerómetro. Para utilizar el sensor de Android seguimos los siguientes pasos:

Para manejar los sensores, la actividad que creemos debe implementar la interfaz `SensorEventListener`, de tal forma que podamos registrar los cambios en los valores del sensor.

Antes de empezar, es necesario declarar el sensor y el gestor del sensor que vamos a utilizar:

```
Sensor sensores; //Inicializa el sensor
SensorManager sm; //Inicializa el gestor de sensores
```

A continuación, se instancia la clase `SensorManager` llamando a la función `getSystemService()` con el argumento `Context.SENSOR_SERVICE` de la siguiente manera:

```
sm = (SensorManager) getSystemService(Context.SENSOR_SERVICE);
```

Posteriormente, se debe instanciar también el propio sensor que vamos a utilizar, declarando el tipo de sensor que queremos utilizar, esto se hace de la siguiente manera:

```
sensores = sm.getDefaultSensor(Sensor.TYPE_ACCELEROMETER);
```

También es necesario instanciar el `SensorEventListener`, que detectará los eventos producidos por el sensor. Al instanciar esta clase también se elegirá la frecuencia de muestreo, cuya problemática se explicará posteriormente:

```
sm.registerListener(this, sensores, SensorManager.SENSOR_DELAY_FASTEST);
```

Para terminar, la interfaz `SensorEventListener` nos obliga a implementar dos métodos:

- **onAccuracyChanged:** en este método implementaremos todo aquello que queremos que suceda al cambiar la precisión del sensor. Como en nuestro proyecto la precisión siempre será la misma, no se ha utilizado este método.

- **onSensorChanged:** en este método se implementan las acciones que sucederán cuando cambie el valor de un sensor. Este es el método que hemos usado para recoger los datos y realizar los cálculos necesarios.

Dentro de este método se han recogido los datos de la siguiente manera:

```
double ejeX = sensorEvent.values[0];
double ejeY = sensorEvent.values[1];
double ejeZ = sensorEvent.values[2];
```

De esta forma, los datos procedentes del sensor en cada una de las direcciones se almacenan en una variable, para posteriormente almacenarlos en un ArrayList con los datos de cada eje. Esto no se hace directamente ya que según como esté colocado el teléfono sobre la fuente de vibraciones, los ejes van en una posición u otra.

```
sensorDatosx.add(ejeX);
sensorDatosy.add(ejeZ);
sensorDatosz.add(ejeY);
```

Una vez incluidos los datos en el ArrayList correspondiente, se procede a procesarlos, realizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la agrupación por tercios de octava.

### 4.3.3. Tasa de adquisición de datos

La tasa de adquisición de datos, también llamada tasa o frecuencia de muestreo, es el número de datos o muestras que se toman por unidad de tiempo de una señal continua para obtener una señal discreta.

Para seleccionar una frecuencia de muestreo adecuada hay que tener en cuenta la frecuencia de las vibraciones de cuerpo entero, que abarcan un rango desde 0,5 hasta 80 Hz.

La teoría del muestreo de Nyquist afirma que para que una señal analógica pueda ser reconstruida, sin error, a partir de muestras tomadas en intervalos iguales de tiempo, debe ser limitada en banda y la frecuencia de muestreo debe ser igual, o mayor, al doble del ancho de banda de la señal analógica [30], [31]. Esta frecuencia de muestreo igual al doble de la frecuencia máxima de la señal, se denomina frecuencia de Nyquist. En nuestro caso, como la frecuencia máxima de las vibraciones es de 80 Hz, nuestra frecuencia de muestreo debería ser, como mínimo, de 160 Hz.

Si esto no se cumple, se va a producir *aliasing* o solapamiento del espectro, de tal forma que, al pasar la señal al dominio de la frecuencia, su espectro se solapará con las réplicas que aparecen en frecuencia, haciendo que sea imposible obtener la señal original a partir de la señal muestreada.

En las siguientes figuras se puede ver de forma gráfica lo explicado anteriormente:

En la Figura 35 no hay *aliasing* ya que se ha muestreado a más del doble de la frecuencia máxima de la señal.

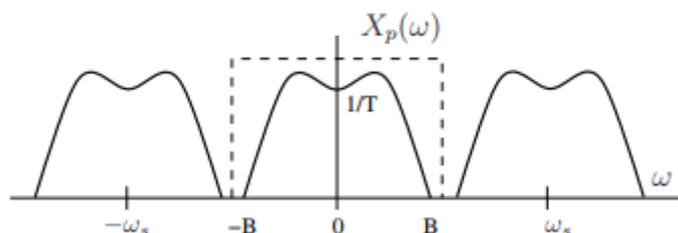


Figura 35 Ejemplo de señal en frecuencia muestreada sin aliasing

Sin embargo, en la Figura 36 se puede ver un ejemplo de una señal muestreada a una frecuencia menor de la frecuencia de Nyquist, por lo que se produce *aliasing*:

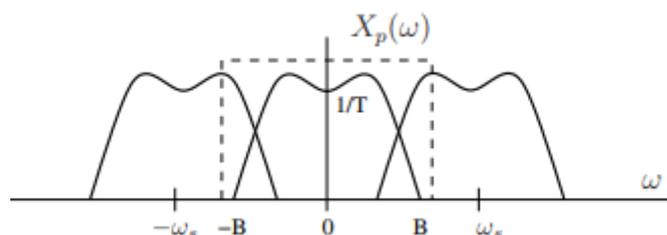


Figura 36 Ejemplo de señal en frecuencia muestreada con aliasing

Una vez conocida esta restricción a la frecuencia de muestreo, debemos seleccionar la que vamos a utilizar en la aplicación. Cada dispositivo Android tiene una frecuencia de adquisición de datos de los sensores diferente, ya que el *hardware* utilizado es distinto.

A la hora de programar no se puede especificar una cifra exacta para la frecuencia de muestreo, ya que la aplicación va a ejecutarse en distintos dispositivos. Sin embargo, la clase `SensorManager` proporciona una serie de valores constantes propios para cada dispositivo. Estos valores son los siguientes:

- `SENSOR_DELAY_UI`: tasa de datos adecuada para la interfaz de usuario.
- `SENSOR_DELAY_NORMAL`: tasa por defecto. Adecuada para cambios en la orientación de la pantalla.
- `SENSOR_DELAY_GAME`: tasa de datos adecuada para juegos.
- `SENSOR_DELAY_FASTEST`: tasa máxima que puede dar el sensor.

En nuestro caso, vamos a utilizar el valor de `SENSOR_DELAY_FASTEST` para la aplicación, ya que es el valor más alto que puede dar el teléfono. En los teléfonos más modernos esta frecuencia puede llegar a alcanzar hasta los 200 Hz, mientras que en los dispositivos más antiguos es más baja.

A continuación, se muestran las frecuencias máximas de muestreo que alcanzan varios dispositivos móviles [32]:

Dispositivo	Frecuencia (FASTEST)
<b>Samsun Galaxy Teos</b>	109,42 Hz
<b>Samsung Nexus S</b>	49,51 Hz
<b>LG Nexus 5</b>	196,74 Hz
<b>LG Nexus 4</b>	195,85 Hz
<b>Samsung Galaxy Nexus</b>	125 Hz
<b>Samsun Galaxy Note 2</b>	100 Hz
<b>Samsung Galaxy S3</b>	100 Hz
<b>HTC Wildfire</b>	38,40 Hz
<b>HTC Desire</b>	47,27 Hz

Tabla 8 Frecuencias de muestreo máximas para varios dispositivos móviles

A la vista de estos datos y teniendo en cuenta que el rango de frecuencias que se manejan en las vibraciones de cuerpo entero está entre 0,5 y 80 Hz, si utilizamos una frecuencia de muestreo de aproximadamente 100 Hz, podremos obtener datos con fiabilidad hasta los 50 Hz.

## 4.4. Procesamiento de los datos

En este apartado se describen los pasos necesarios para, a partir de los datos de aceleración obtenidos de los sensores del teléfono, obtener las medidas finales que nos dirán como están afectando las vibraciones a la salud del trabajador expuesto y si están dentro de los márgenes legales. El proceso que seguir es el siguiente:

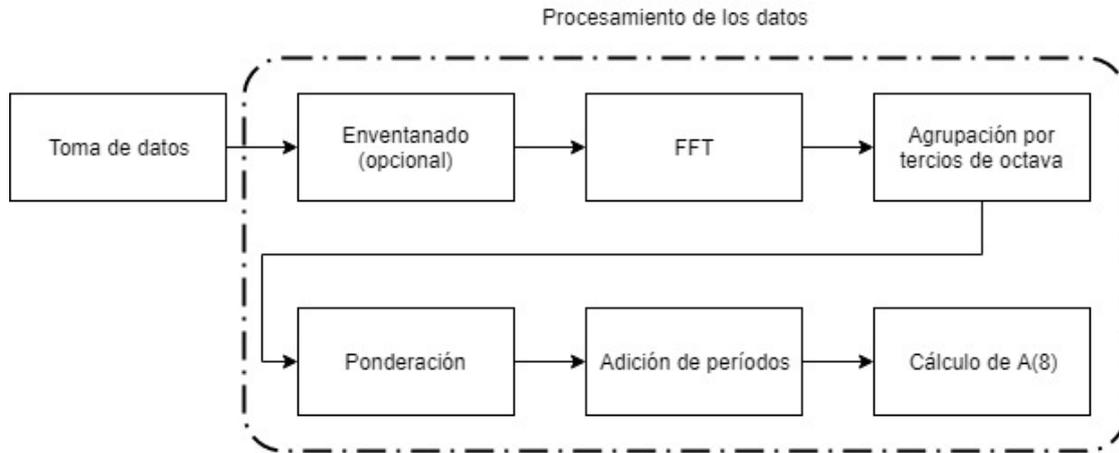


Figura 37 Procedimiento a seguir para el cálculo del valor final de la dosis de vibración

### 4.4.1. Cálculo de la FFT

Como se puede ver en el diagrama anterior, el primer paso después de obtener los datos es una transformación al dominio de la frecuencia. En el caso de nuestra aplicación, se trabaja con datos discretos obtenidos del muestreo de una señal continua.

Para pasar los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia vamos a usar la Transformada de Fourier, que es una herramienta matemática ampliamente utilizada en campos como la física y la ingeniería para conocer la amplitud de la señal en cada una de las frecuencias que abarca.

Dado que nuestros datos son discretos, vamos a utilizar la Transformada Discreta de Fourier, DFT, que es el equivalente de la Transformada continua, pero para señales que solo se conocen en  $N$  instantes separados por un tiempo  $T$ .

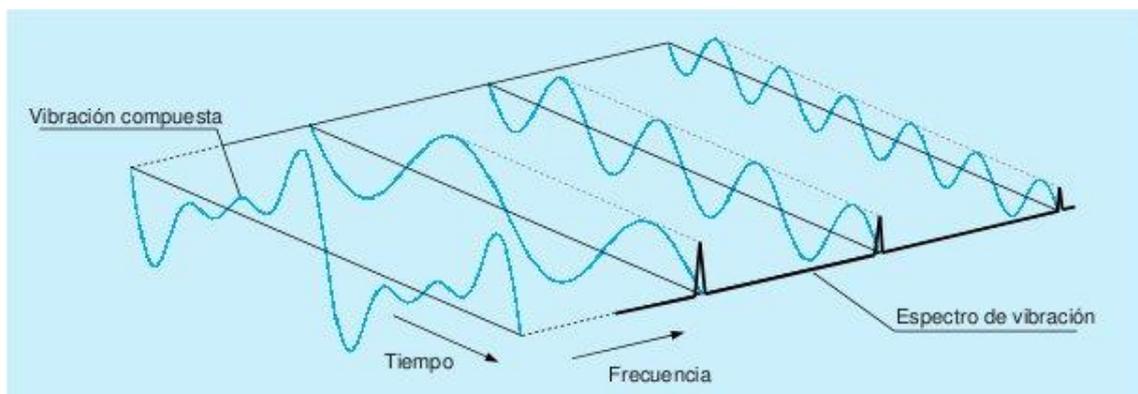


Figura 38 Esquema del efecto de la Transformada de Fourier aplicada a una señal continua

#### 4.4.1.1. Fundamentación teórica

La representación de Fourier para secuencias de duración finita es lo que se conoce como la Transformada Discreta de Fourier (DFT). La DFT juega un papel muy importante en el análisis, el diseño y la realización de algoritmos y sistemas de procesamiento digital de señales. Una de las razones por las que el análisis de Fourier es de gran importancia en el procesamiento digital de señales es debido a la existencia de un algoritmo eficiente para calcular la DFT. Este algoritmo se denomina Transformada Rápida de Fourier (FFT) [35].

La DFT se define de la siguiente manera:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{nk} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \text{ donde } W_N = e^{-j2\pi/N}$$

De esta ecuación se puede deducir que para calcular una DFT de N puntos son necesarias aproximadamente  $N^2$  multiplicaciones complejas y  $N^2$  sumas complejas. Si realizamos este proceso en un ordenador, va a ser necesario almacenar y acceder a los valores de la secuencia de entrada  $x[n]$  y los valores de los coeficientes  $W_N^{nk}$ . Debido a que la cantidad de accesos y almacenamiento de datos en algoritmos de cálculo numérico es proporcional al número de operaciones aritméticas, se acepta de forma general que un significado de la medida de la complejidad, o, del tiempo requerido para llevar a cabo un algoritmo, es el número de multiplicaciones y sumas necesarios. Ya que en el caso de la DFT la cantidad de operaciones, y, por tanto, el tiempo de procesamiento, es proporcional a  $N^2$ , para valores grandes de N el algoritmo es inviable. Debido a esta razón, procedimientos de cálculo que reduzcan el número de operaciones son de gran interés.

El algoritmo de la FFT consigue reducir considerablemente el número de operaciones en el cálculo de la DFT. Para ello se descompone la suma realizada en la DFT en dos sumas de la mitad de las muestras cada una y se realiza un diezmado en el tiempo, este proceso consiste en expresar la suma de la DFT como dos sumas separadas de las muestras pares y de las impares de la siguiente manera:

$$X[n] = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2k]W_N^{2nk} + \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2k+1]W_N^{(2k+1)n}$$

$$W_N^{(2k+1)n} = W_N^n W_N^{2kn}$$

se llega a la suma de dos DFTs de longitud  $\frac{N}{2}$ ,

$$X[n] = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2k]W_N^{2nk} + W_N^n \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2k+1]W_N^{2kn}$$

$$F[n] = G[n] + W_N^n H[n]$$

De esta forma se puede calcular una DFT de N puntos mediante dos transformadas de  $\frac{N}{2}$ , una de los datos pares,  $G[n]$ , y otra de los datos impares,  $H[n]$ .

Por ejemplo, para  $N = 4$ :

- datos pares  $x[0], x[2]$
- datos impares  $x[1], x[3]$

$$\begin{aligned}
X[0] &= G[0] + W_4^0 H[0] = x[0]W_4^0 + x[1]W_4^0 + x[2]W_4^0 + x[3]W_4^0 \\
X[1] &= G[1] + W_4^1 H[1] = x[0]W_4^0 + x[1]W_4^1 + x[2]W_4^2 + x[3]W_4^3 \\
X[2] &= G[2] + W_4^2 H[2] = x[0]W_4^0 + x[1]W_4^2 + x[2]W_4^4 + x[3]W_4^6 \\
X[3] &= G[3] + W_4^3 H[3] = x[0]W_4^0 + x[1]W_4^3 + x[2]W_4^6 + x[3]W_4^9
\end{aligned}$$

Esta operación se puede definir de forma matricial de la siguiente manera

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \\ x[2] \\ x[3] \end{bmatrix}$$

Ahora podemos aplicar las siguientes propiedades:

$$W_N^{n+N} = W_N^n \quad W_N^{nk} = 1 \quad W_N^{n+N/2} = -W_N^n \quad W_N^2 = W_{N/2}$$

Con lo que la expresión matricial quedaría así:

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^0 & W^2 \\ W^0 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \\ x[2] \\ x[3] \end{bmatrix}$$

Esta expresión se puede factorizar de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \\ x[2] \\ x[3] \end{bmatrix}$$

Agrupando el producto de la derecha se obtiene:

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2[0] \\ x_2[1] \\ x_2[2] \\ x_2[3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1[0] \\ x_1[1] \\ x_1[2] \\ x_1[3] \end{bmatrix}$$

Con lo que queda que:

$$X[0] = x_1[0] + W^0 x_1[1]$$

$$X[1] = x_1[0] + W^2 x_1[1] = x_1[0] - W^0 x_1[0]$$

$$X[2] = x_1[2] + W^1 x_1[3]$$

$$X[3] = x_1[2] + W^3 x_1[3] = x_1[2] - W^1 x_1[3]$$

En estas expresiones se puede ver que para calcular las componentes pares solo hace falta una suma y una multiplicación, mientras que las impares solo necesitan una suma compleja.

También se puede observar que la carga computacional se ha reducido considerablemente. Mientras que para hacer la DFT normal para  $N = 4$  necesitaríamos  $N^2 = 16$  multiplicaciones, realizando el algoritmo de la FFT solo necesitamos  $\frac{N}{2} \log_2 N = 4$  multiplicaciones. Se pueden ver más ejemplos en la Tabla 9 [36].

Por este motivo, los datos que obtenemos del acelerómetro en el dominio del tiempo se pasarán al dominio de la frecuencia utilizando el algoritmo de la FFT, haciendo más eficiente el cálculo.

N	$N^2$ (DFT)	$\frac{N}{2} \log_2 N$ (FFT)	ahorro
32	1.024	80	92%
256	65.536	1.024	98%
1.024	1.048.576	5.120	99,5%

Tabla 9 Ejemplo del número de operaciones necesarias para hacer la DFT y la FFT en función de N

#### 4.4.1.2. Implementación en la aplicación

Para implementar el algoritmo de la FFT en el código de la aplicación, se utilizan dos clases Java distintas [37]. La primera, es la clase `Complex` que nos permite manejar números complejos, pudiendo definirlos a partir de su parte real y su parte imaginaria, como podemos ver en el constructor de la clase:

```
public class Complex {

    private final double re;    //Declaración de la parte real
    private final double im;    //Declaración de la parte imaginaria

    // Creación de un objeto a partir de la parte real y la parte
    // imaginaria declarada
    public Complex(double real, double imag) {
        re = real;
        im = imag;
    }

    ...

}
```

Esta clase nos permite también realizar operaciones con los complejos, como sumas, restas, obtener módulo y fase, entre otras.

La segunda clase que vamos a utilizar se llama `FFT` que permite calcular la Transformada Rápida de Fourier siguiendo la explicación teórica expuesta anteriormente:

```
public class FFT {

    // Calcula la FFT siempre y cuando la longitud del array complejo sea
    // potencia de 2
    public static Complex[] fft(Complex[] x) {
        int N = x.length;

        //Caso básico
        if (N == 1) return new Complex[]{x[0]};

        // Excepción lanzada cuando la longitud no es potencia de 2
        if (N % 2 != 0) { throw new RuntimeException("N is not a power
of 2"); }

        // FFT de términos pares
        Complex[] even = new Complex[N/2];
        for (int k = 0; k < N/2; k++) {
            even[k] = x[2*k];
        }
    }
}
```

```

Complex[] q = fft(even);

// FFT de términos impares
Complex[] odd = even; // reuse the array
for (int k = 0; k < N/2; k++) {
    odd[k] = x[2*k + 1];
}
Complex[] r = fft(odd);

// Combinación de la FFT
Complex[] y = new Complex[N];
for (int k = 0; k < N/2; k++) {
    double kth = -2 * k * Math.PI / N;
    Complex wk = new Complex(Math.cos(kth), Math.sin(kth));
    y[k] = q[k].plus(wk.times(r[k]));
    y[k + N/2] = q[k].minus(wk.times(r[k]));
}
return y;
}

```

Esta clase también nos permite realizar otras operaciones como la convolución lineal, la convolución circular y la Transformada Inversa de Fourier (IFFT).

Una vez transformados los datos al dominio de la frecuencia, se va a proceder a truncarlos para evitar errores debidos al *aliasing*, es decir, se van a tener en cuenta solo aquellas frecuencias que no superen la mitad de la frecuencia de muestreo. Una vez hecho esto, los datos se agrupan por tercios de octava.

## 4.4.2. Agrupación por tercios de octava

Después de realizar el análisis en frecuencia, tenemos determinados valores para cada valor de frecuencia. A continuación, para obtener más información de espectro, vamos a proceder a agrupar los de las frecuencias en tercios de octava. En primer lugar, se procederá a explicar el término de octava, que es una división del espectro en bandas de tal forma que el primer y el último valor de frecuencia están separados una octava. Este término se utiliza principalmente en el campo de la música.

### 4.4.2.1. Fundamentación teórica

En el caso de nuestra aplicación, vamos a dividir el espectro en tercios de octava para tener una mayor información de este. Esto significa que cada una de las bandas que dividen el espectro en octavas vamos a dividir las en tres partes. La frecuencia central de la octava n-ésima viene dada por la siguiente expresión:

$$f_c(n) = 10^{\frac{n}{10}} \text{Hz}$$

y las frecuencias superior e inferior de los tercios de octava consecutivos se calculan de la siguiente manera:

$$f_{\text{inf}}(n) = f_c(n) 2^{-\frac{1}{6}}$$

$$f_{\text{sup}}(n) = f_c(n) 2^{+\frac{1}{6}}$$

A continuación, se adjunta la división del espectro en tercios de octava:

Número de banda de frecuencia	Frecuencia (Hz)	Frecuencias en tercios de octava		Número de banda de frecuencia	Frecuencia (Hz)	Frecuencias en tercios de octava
<b>-3,5</b>		0,447		<b>8,5</b>		7,079
<b>-3</b>	0,5	0,501		<b>9</b>	8	7,943
<b>-2,5</b>		0,562		<b>9,5</b>		8,913
<b>-2</b>	0,63	0,631		<b>10</b>	10	10,000
<b>-1,5</b>		0,708		<b>10,5</b>		11,220
<b>-1</b>	0,8	0,794		<b>11</b>	12,5	12,589
<b>-0,5</b>		0,891		<b>11,5</b>		14,125
<b>0</b>	1	1,000		<b>12</b>	16	15,849
<b>0,5</b>		1,122		<b>12,5</b>		17,783
<b>1</b>	1,25	1,259		<b>13</b>	20	19,953
<b>1,5</b>		1,413		<b>13,5</b>		22,387
<b>2</b>	1,6	1,585		<b>14</b>	25	25,119
<b>2,5</b>		1,778		<b>14,5</b>		28,184
<b>3</b>	2	1,995		<b>15</b>	31,5	31,623
<b>3,5</b>		2,239		<b>15,5</b>		35,481
<b>4</b>	2,5	2,512		<b>16</b>	40	39,811
<b>4,5</b>		2,818		<b>16,5</b>		44,668
<b>5</b>	3,15	3,162		<b>17</b>	50	50,119
<b>5,5</b>		3,548		<b>17,5</b>		56,234
<b>6</b>	4	3,981		<b>18</b>	63	63,096
<b>6,5</b>		4,467		<b>18,5</b>		70,795
<b>7</b>	5	5,012		<b>19</b>	80	79,433
<b>7,5</b>		5,623		<b>19,5</b>		89,125
<b>8</b>	6,3	6,310				

Tabla 10 Frecuencias en tercios de octava

El proceso que seguir en la aplicación para agrupar las frecuencias en tercios de octava se explica a continuación:

En primer lugar, hay que tener en cuenta el rango de frecuencias que queremos abarcar, que en este caso es de 0,5 a 80 Hz por ser el rango de acción de las vibraciones de cuerpo entero. De esta forma, la resolución frecuencial mínima necesaria es de 0,5 Hz y sabiendo que:

$$\frac{f_s}{N} < 0,5\text{Hz}$$

donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo que en el apartado anterior hemos determinado que será de 100 Hz aproximadamente. Esto nos daría un número mínimo de puntos para la DFT de 200, sin embargo, con el objetivo de aumentar aún más la resolución espectral, en la aplicación se va a elegir tomar 512, 1024 o 2048 puntos.

Una vez se conoce la resolución espectral, hay que determinar frecuencia por frecuencia en que tercio de octava está.

Para agrupar por tercios de octava en una función continua hay que integrar todos los valores de aceleración entre las frecuencias límite del tercio correspondiente. Sin embargo, como estamos trabajando con datos discretos, en vez de integrar se ha utilizado la fórmula de Riemman, que es

el equivalente a la integración para funciones discretas, de tal forma que se suman los valores de aceleración por la distancia entre ese valor y el siguiente, la resolución espectral  $\frac{f_s}{N}$ . La fórmula de la suma de Riemman es la siguiente:

$$S = \sum_{i=1}^n f(y_i)(x_i - x_{i-1})$$

En nuestro caso, los límites del sumatorio son los límites del tercio de octava.

#### 4.4.2.2. Implementación en la aplicación

Para hacer la agrupación de las frecuencias, en primer lugar, se suman todos los valores de aceleración correspondientes a las frecuencias pertenecientes a un mismo tercio de octava. A continuación, se muestra un ejemplo para la banda número 0 de tercio de octava:

```
if (ejefrec[j] > 0.891 && ejefrec[j] < 1.122) { //0
    foxa[4] = foxa[4] + frecuencyx[j].abs();
    foya[4] = foya[4] + frecuencyy[j].abs();
    foza[4] = foza[4] + frecuencyz[j].abs();
}
```

Una vez hecho el sumatorio, quedaría multiplicar por el valor de la separación en frecuencia que es  $\frac{f_s}{N}$ . Este producto se va a realizar en el siguiente paso correspondiente a la ponderación en frecuencia, para no tener que recorrer todo el vector de frecuencias de nuevo y mejorar la eficiencia de la aplicación.

Este proceso se repite para los 23 tercios de octava, desde la banda -3 hasta la número 19, abarcando así el rango de frecuencias de interés.

### 4.4.3. Ponderación en frecuencia

#### 4.4.3.1. Fundamentación teórica

Las vibraciones afectan de manera distinta a la salud, al bienestar y al mal del movimiento según la frecuencia. Además, se requieren ponderaciones diferentes para cada eje de vibración, para ello, se disponen de unos coeficientes  $W$  que se han aplicado a las frecuencias agrupadas por tercios de octava calculadas anteriormente. Los coeficientes son:

- $W_k$  para la dirección  $z$  y para la dirección tumbada vertical (excepto cabeza)
- $W_d$  para las direcciones  $x$  e  $y$ , y para la dirección tumbada horizontal.

Estos coeficientes están recogidos en la Norma ISO 2631-1 y se presentan a continuación:

Número de banda de frecuencia	Frecuencia (Hz)	Wk		Wd	
		factor x1000	dB	factor x1000	dB
-3	0,5	418	- 7,57	853	- 1,38
-2	0,63	459	- 6,77	944	- 0,50
-1	0,8	477	- 6,43	992	- 0,07
0	1	482	- 6,33	1 011	0,1
1	1,25	484	- 6,29	1 008	0,07
2	1,6	494	- 6,12	968	- 0,28
3	2	531	- 5,49	890	- 1,01
4	2,5	631	- 4,01	776	- 2,20
5	3,15	804	- 1,90	642	- 3,85
6	4	967	- 0,29	512	- 5,82
7	5	1 039	- 0,33	409	- 7,76
8	6,3	1 054	- 0,46	323	- 9,81
9	8	1 036	- 0,31	253	- 11,93
10	10	988	- 0,10	212	- 13,91
11	12,5	902	- 0,89	161	- 15,87
12	16	768	- 2,28	125	- 18,03
13	20	636	- 3,93	100	- 19,99
14	25	513	- 5,80	80	- 21,94
15	31,5	405	- 7,86	63,2	- 23,98
16	40	314	- 10,05	49,4	- 26,13
17	50	246	- 12,19	38,8	- 28,22
18	63	186	- 14,61	29,5	- 30,60
19	80	132	- 17,56	21,1	- 33,53

Tabla 11 Coeficientes para la ponderación en frecuencia

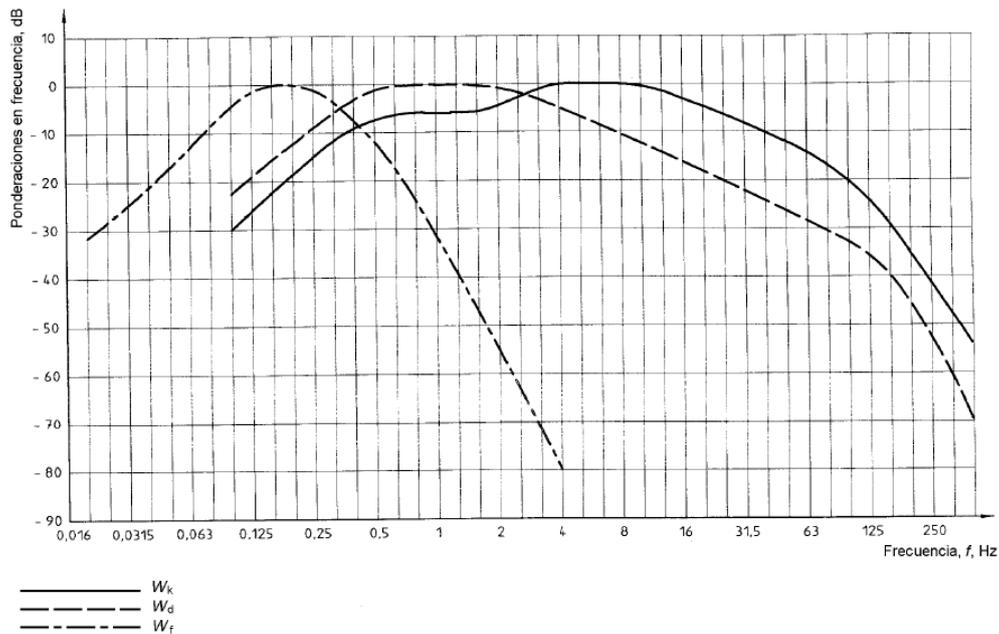


Figura 39 Gráfica de ponderación en frecuencia

Como se puede ver en la Tabla 11 y en la Figura 39, en las frecuencias más bajas los coeficientes son más altos, de forma que tienen mayor peso en el cálculo final de la aceleración, mientras que, las frecuencias más altas, al tener coeficientes más bajos, tienen menor influencia en la medida.

En la aplicación se sigue el siguiente proceso para realizar la ponderación: una vez se ha transformado la señal al dominio de la frecuencia y se ha agrupado por tercios de octava, se han cargado los coeficientes de la Tabla 11 en un fichero .xml y se han aplicado al tercio de octava correspondiente.

Para hallar el valor de aceleración ponderada final para un eje y un tiempo T se realiza la operación siguiente:

$$a_w = \left[ \sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

donde:

$a_w$  es la aceleración ponderada en frecuencia;

$w_i$  es el factor de ponderación para la banda i-ésima de un tercio de octava;

$a_i$  es la aceleración r.m.s. para la banda i-ésima de un tercio de octava.

#### 4.4.3.2. Implementación en la aplicación

Dentro de la aplicación, la implementación de las operaciones anteriores se realiza de la siguiente manera, incluyendo el producto comentado anteriormente para la agrupación por tercios de octava:

```
//PONDERACIÓN EN FRECUENCIA
for (int j = 0; j < foza.length; j++) {
    foxa[j] = foza[j] / fs;
    foya[j] = foya[j] / fs;
    foza[j] = foza[j] / fs;
    foxa[j] = (((foxa[j]) * Wd[j]) * (fs / N)) / 1000;
    foza[j] = Math.pow(foxa[j], 2.0);
    ejex2 = ejex2 + foza[j];
    foya[j] = (((foya[j]) * Wd[j]) * (fs / N)) / 1000;
    foza[j] = Math.pow(foya[j], 2.0);
    ejey2 = ejey2 + foza[j];
    foza[j] = (((foza[j]) * Wk[j]) * (fs / N)) / 1000;
    foza[j] = Math.pow(foza[j], 2.0);
    ejez2 = ejez2 + foza[j];
}
ejex2 = Math.sqrt(ejex2);
ejey2 = Math.sqrt(ejey2);
ejez2 = Math.sqrt(ejz2);
```

En este código se recorren los vectores con los datos ya agrupados por tercios de octavas para cada eje y se aplica el coeficiente de ponderación correspondiente, el producto  $\frac{f_s}{N}$  que faltaba del apartado anterior y una división por 1000 ya que los coeficientes en el fichero .xml están multiplicados por 1000.

Todos estos cálculos se realizan tras la toma de datos, de forma que todo el proceso se puede resumir de la siguiente manera:

1. Se toman N datos de aceleración mediante los sensores.
2. Se obtienen los valores de aceleración ponderada para cada eje mediante los cálculos anteriores.
3. Esos resultados se guardan en tres arrays, uno para cada eje.
4. Cuando el usuario termine la medición, se procede a añadir los diferentes períodos de muestreo.
5. Por último, si el usuario lo ha seleccionado, se calcula el valor de aceleración normalizado con referencia a 8 horas.

#### 4.4.4. Adición de los periodos de muestreo

Para reducir la carga computacional de la aplicación, se opta por realizar tomas de datos durante períodos reducidos de tiempo, cuyos resultados se almacenan en un array tras realizar los cálculos apropiados.

Cuando el usuario finaliza la toma de datos, es necesario añadir todos los datos de aceleración procedentes de cada uno de los periodos de medición. Esto se realiza de la siguiente manera:

$$a_{w,e} = \left[ \frac{\sum a_{wi}^2 \cdot Ti}{\sum Ti} \right]^{\frac{1}{2}}$$

donde:

$a_{w,e}$  es la magnitud de vibración equivalente;

$a_{wi}$  es la magnitud de vibración para una exposición de una duración  $T_i$ ;

$T_i$  es la duración de la medición.

Este paso se realiza una vez que el usuario ha decidido terminar la medición. Al ir tomando los datos se ha ido almacenando en un array la duración de cada muestra, por lo que, al llegar a este paso, se calcula, en primer lugar, la duración total de la medición, sumando el tiempo que se ha tardado en tomar cada muestra, guardando este valor en una variable auxiliar. A continuación, se realiza el sumatorio, también ayudándose de variables auxiliares:

```
//ADICIÓN DE PERÍODOS
aux4 = (double) tiempomuestreoarray.size();
for (int jo = 0; jo < ejexarray.size(); jo++) {
    aux1 = Double.parseDouble(ejexarray.get(jo).toString());
    aux3 = Math.pow(aux1, 2.0);
    xfinal = xfinal + aux3;

    aux1 = Double.parseDouble(ejeyarray.get(jo).toString());
    aux3 = Math.pow(aux1, 2.0);
    yfinal = yfinal + aux3;

    aux1 = Double.parseDouble(ejezarray.get(jo).toString());
    aux3 = Math.pow(aux1, 2.0);
    zfinal = zfinal + aux3;
}
```

Una vez realizado el sumatorio, se termina el cálculo de la suma de periodos dividiendo el valor obtenido por el tiempo total de la medida, variable aux4, y realizando la raíz cuadrada del resultado, como se muestra a continuación:

```

xfinal = xfinal / aux4;
xfinal = Math.sqrt(xfinal);
yfinal = yfinal / aux4;
yfinal = Math.sqrt(yfinal);
zfinal = zfinal / aux4;
zfinal = Math.sqrt(zfinal);

```

El paso final restante es el cálculo del valor final normalizado en referencia a un tiempo de ocho horas.

#### 4.4.5. Cálculo del valor de dosis diaria normalizada

Para evaluar la exposición a las vibraciones hay que basarse en la exposición diaria  $A(8)$  expresada como la aceleración continua equivalente para un período de 8 horas, calculada como el mayor de los valores eficaces de las aceleraciones ponderadas en frecuencia según cada eje:

$$A_x(8) = k a_{wx} \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$$

$$A_y(8) = k a_{wy} \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$$

$$A_z(8) = k a_{wz} \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$$

donde:

$a_{wi}$  es el valor eficaz de la aceleración ponderada en cada eje  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;

$T_{exp}$  es el tiempo de exposición;

$T_0$  es el tiempo de referencia, en este caso 8 horas;

$k$  es el factor de ponderación de cada eje.

El factor  $k$  corresponde a otra ponderación debido a que las vibraciones no influyen de la misma manera en el eje vertical que en lateral o en el longitudinal. Los factores que se aplican para cada eje son los siguientes:

- Eje  $x$ :  $k = 1,4$
- Eje  $y$ :  $k = 1,4$
- Eje  $z$ :  $k = 1$

Para obtener el valor final de cada eje, el código implementado es el siguiente:

```

xfinal = 1.4 * xfinal * time;
yfinal = 1.4 * yfinal * time;
zfinal = zfinal * time;

```

donde  $\text{time}$  es el valor de  $\sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$ , que en el código se ha implementado de la siguiente manera:

```

time = Math.sqrt(sumtiempo) / Math.sqrt(number * 3600);

```

donde `number` es el número de horas de referencia, en el caso de  $A(8)$ , esta variable tiene el valor 8.

Una vez tenemos el valor de  $A(8)$  en los tres ejes, la evaluación de la vibración se realiza respecto al máximo de los tres, de forma que:

$$A(8) = \max[A_x(8), A_y(8), A_z(8)]$$

Este es el valor que debemos comparar con los límites establecidos en el Real Decreto 1311/2005 del 4 de noviembre sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que pueden derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas [38].

Este Real Decreto determina que para las vibraciones de cuerpo entero:

- El valor límite de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas se fija en  $1,15 \text{ m/s}^2$ . Si este valor se sobrepasa, el trabajador debe dejar de trabajar inmediatamente.
- El valor de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas que da lugar a una acción se fija en  $0,5 \text{ m/s}^2$ . Si este valor se sobrepasa, se deberían tomar acciones necesarias para reducir la dosis de vibración, pero el trabajador puede continuar.

## 4.5. Conclusiones

En este capítulo se ha detallado el proceso de desarrollo de la aplicación, siguiendo los desarrollos teóricos que se presentan en cada apartado. Esto nos ha permitido programar una aplicación Android que nos permite tomar datos con el acelerómetro integrado en el dispositivo y realizar el procesado explicado en la norma UNE-ISO 2631-1 para obtener el valor de dosis de vibración. Una vez tenemos la aplicación lista, debemos probarla para ver si realiza las operaciones correctamente y para comprobar cuál es la precisión que conseguimos al realizar las mediciones.

# Capítulo 5. Experimentos sobre la mesa de vibraciones

En este capítulo se describen las pruebas realizadas para la evaluación de la aplicación sobre el banco de vibraciones *Squeak & Rattle*. Se han realizado dos tipos de pruebas: random y sinusoidal. En primer lugar, se explican las pruebas random, que se han realizado con los tres móviles de pruebas, y posteriormente se explican las pruebas senoidales, realizadas solo con el teléfono Asus.

## 5.1. Pruebas random

Estas pruebas se han realizado utilizando el software Random Vibration Control ya explicado para producir en el brazo vibratorio un movimiento aleatorio siguiendo las directrices de la norma UNE-ISO 7096 que explica como evaluar en el laboratorio las vibraciones transmitidas a un operador de maquinaria pesada por el asiento. En este caso el perfil específico que vamos a seguir es el llamado EM5, que simula las vibraciones sufridas por tractores de ruedas, compactadoras de suelos de neumáticos y retrocargadoras. Antes de empezar a describir los resultados de los experimentos se dan más detalles sobre la norma 7096 y el perfil EM5.

### 5.1.1. Norma UNE-ISO 7096 y perfil EM5

Los operadores de maquinaria pesada, en particular, maquinaria para movimiento de tierras, se encuentran expuestos a vibraciones de baja frecuencia causadas por el movimiento del vehículo a través de un terreno irregular y por las tareas que lleva a cabo. El asiento constituye la última etapa de la suspensión antes del conductor. Para que la vibración se atenúe de forma eficiente, la suspensión del asiento debe elegirse de acuerdo con las características dinámicas del vehículo.

El diseño del asiento y su suspensión son un compromiso entre los requisitos para reducir el efecto de las vibraciones y su impacto sobre el operador y proporcionarle un soporte estable, de forma que pueda controlar la máquina de forma efectiva.

Por lo tanto, la norma UNE-ISO 7096 especifica un método de laboratorio para medir y evaluar la eficiencia de la suspensión del asiento de las máquinas para movimiento de tierras, con el fin de reducir las vibraciones verticales transmitidas al operador en las frecuencias comprendidas entre 1 Hz y 20 Hz [37].

Esta norma define clases espectrales de la señal de entrada para diferentes máquinas. Cada clase define un grupo de máquinas que tienen características vibratorias similares. Estas clases van desde el EM 1 hasta el EM 9, en nuestro caso vamos a utilizar el perfil EM 5 por ser el que más se ajusta al uso pensado en la aplicación, que es el de medir la dosis de vibración en el asiento de maquinaria agrícola, como podría ser un tractor.

La norma detalla todo el procedimiento para la evaluación de los asientos de las cabinas de las máquinas, pero para el propósito de nuestras pruebas solo nos va a interesar los filtros que deben aplicarse a la señal de entrada. En el caso del perfil EM 5 ese filtro es el siguiente:

$$G(f) = 1.11 (HP24)^2(LP6)^2$$

Donde HP y LP designan respectivamente filtros paso-alto y paso-bajo de tipo Butterworth, de la forma:

$$HP24 = \frac{s^4}{s^4 + 2.613s^3 + 3.414s^2 + 2.613s + 1}$$

$$LP6 = \frac{1}{s + 1}$$

donde  $s = \frac{jf}{f_c}$ , con  $j = \sqrt{-1}$ ,  $f = \text{frecuencia en hercios}$  y  $f_c = \text{frecuencia de corte del filtro en hercios}$ .

Las frecuencias de corte de los filtros se indican a continuación:

Clases espectrales de señales de entrada	Frecuencia de corte de los filtros, $f_c$ , Hz	
	Designación de los filtros	
	LP6	HP24
EM 5	3,5 Hz	1,5 Hz

Tabla 12 Frecuencias de corte de los filtros para el perfil de pruebas EM 5

Con estos datos se han construido los filtros y se ha obtenido la Densidad de Potencia Espectral (DSP) para la clase de señal de entrada EM 5, se han dibujado los filtros y la DSP en la siguiente gráfica.

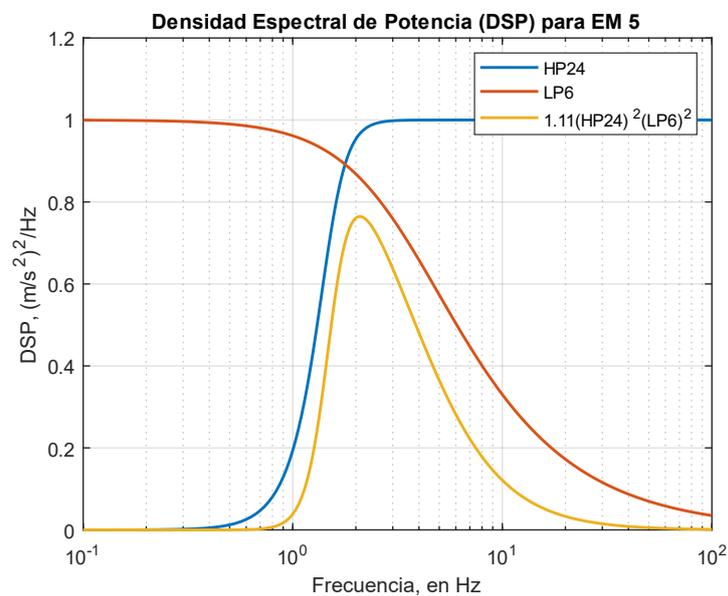


Figura 40 Filtros paso-bajo, paso-alto y DSP especificados en la norma UNE-ISO 7096 para la clase señal de entrada EM 5

En la figura se puede observar que el valor de la DSP para frecuencias por encima de 10 Hz decrece muy rápidamente, dado que las frecuencias que afectan principalmente a los asientos de la maquinaria agrícola se encuentran, principalmente, en el rango de 1 a 10 Hz, esto va a significar que las frecuencias que se encuentren por encima no vamos a considerarlas en los experimentos con la aplicación.

Una vez obtenido el valor de la DSP, para calcular el valor de  $A(8)$  es necesario primero ponderar ese valor por los coeficientes  $W_k$  y  $W_d$  especificados en la norma UNE-ISO 2631-1, estos coeficientes asignan diferentes pesos a las distintas bandas de frecuencia de la siguiente manera:

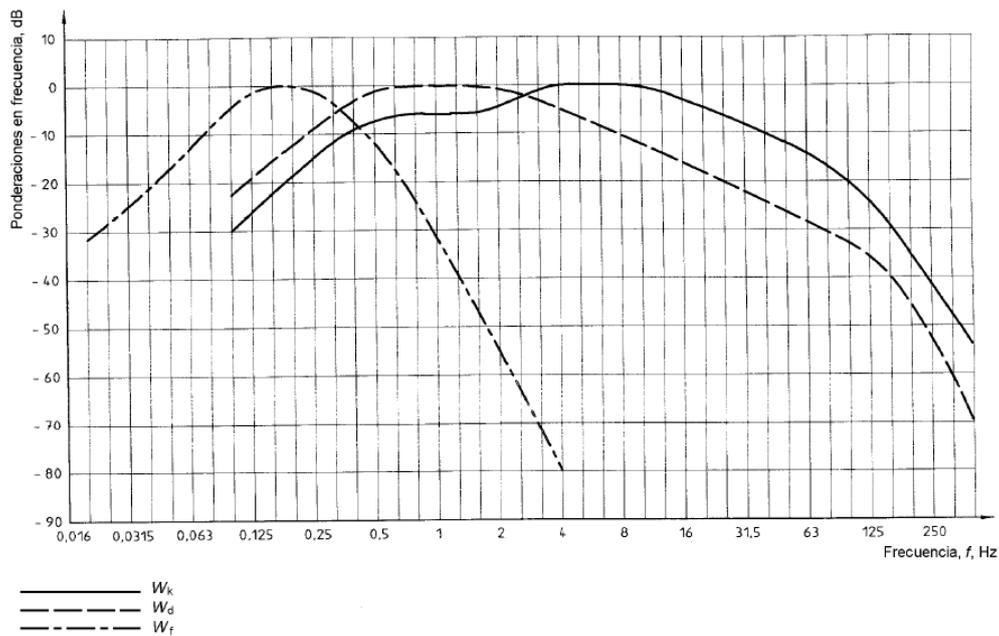


Figura 41 Coeficientes de ponderación de frecuencias  $W_k$ ,  $W_d$  y  $W_f$

En la gráfica se puede observar que se asigna mayor peso a las frecuencias altas que a las frecuencias bajas, lo que, unido a los resultados del filtro anterior, va a provocar que los valores en frecuencias altas no nos afecten demasiado en el cálculo del valor de dosis normalizada.

En nuestro caso, y por simplicidad, vamos a considerar solo las vibraciones en el eje vertical, por lo que al valor del DSP obtenido anteriormente solo vamos a aplicarle los coeficientes de ponderación  $W_k$ . Esto nos va a permitir obtener un valor de  $A(8)$  que sería el valor que obtendríamos si aplicáramos la vibración descrita en EM 5 durante un tiempo de 8 horas, y que nos va a servir como referencia teórica para las pruebas.

Una vez hecha la ponderación en frecuencia se ha obtenido el valor de aceleración ponderada en frecuencia sumando los valores ponderados al cuadrado y haciendo la raíz, siguiendo la fórmula explicada en el apartado 4.4.3.1:

$$a_w = \left[ \sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

donde:

$a_w$  es la aceleración ponderada en frecuencia;

$w_i$  es el factor de ponderación para la banda  $i$ -ésima de un tercio de octava;

$a_i$  es la aceleración r.m.s. para la banda  $i$ -ésima de un tercio de octava.

Una vez realizado este cálculo, el valor de  $A(8)$  que hemos obtenido para los valores de entrada del perfil EM 5 es el siguiente:

$$A(8) = 1.72020 \text{ m/s}^2$$

Este es el valor que obtendríamos si mantuviéramos la vibración EM 5 durante 8 horas, sin embargo, en nuestras pruebas vamos a usar un tiempo de medición de 200 segundos, así que debemos calcular el valor de  $A(8)$  que obtendríamos en este caso para poder compararlo con los resultados de la aplicación.

Para obtener este valor vamos a usar la fórmula siguiente explicada también en el apartado 4.4.3.1:

$$A(8) = k a_w \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$$

donde,

$a_w$  es el valor eficaz de la aceleración ponderada en el eje vertical;

$T_{exp}$  es el tiempo de exposición, en este caso 200 segundos;

$T_0$  es el tiempo de referencia, en este caso 8 horas;

k es el factor de ponderación de cada eje, que en caso del eje vertical es 1.

Como se ha explicado anteriormente, para las pruebas solo vamos a considerar el eje vertical, ya que solo vamos a tener vibraciones significativas en este eje.

Además de obtener el valor para el tiempo de exposición correspondiente, con el objetivo de hacer diferentes pruebas, hemos calculado el valor de A(8) para diferentes porcentajes del perfil EM 5, obteniendo la tabla siguiente:

Porcentaje de EM 5	Valor de A(8) para 8 horas	Valor de A(8) para 200 segundos
100 %	1,72 m/s <sup>2</sup>	0,143 m/s <sup>2</sup>
76,037 %	1,50 m/s <sup>2</sup>	0,125 m/s <sup>2</sup>
52,803%	1,25 m/s <sup>2</sup>	0,104 m/s <sup>2</sup>
44,693%	1,15 m/s <sup>2</sup>	0,096 m/s <sup>2</sup>
33,794%	1,00 m/s <sup>2</sup>	0,083 m/s <sup>2</sup>
19,009%	0,75 m/s <sup>2</sup>	0,063 m/s <sup>2</sup>
8,449%	0,50 m/s <sup>2</sup>	0,042 m/s <sup>2</sup>
2,112%	0,25 m/s <sup>2</sup>	0,021 m/s <sup>2</sup>
0,338%	0,10 m/s <sup>2</sup>	0,008 m/s <sup>2</sup>

*Tabla 13 Valores de A(8) para las pruebas random*

Los valores de la columna derecha de la tabla son los valores que vamos a utilizar para comprobar la precisión de la aplicación en cada uno de los teléfonos, puesto que ese es el valor que nos da el perfil EM 5 de vibraciones para 200 segundos de tiempo de exposición.

Para poder realizar las pruebas con estos valores primero tenemos que introducirlos en el software del banco de pruebas. Para ello se ha calculado el valor del DSP para cada frecuencia y para cada porcentaje del EM 5 como se muestra a continuación:

	DSP g <sup>2</sup> /Hz	DSP g <sup>2</sup> /Hz	DSP g <sup>2</sup> /Hz	DSP g <sup>2</sup> /Hz	DSP g <sup>2</sup> /Hz	DSP g <sup>2</sup> /Hz	DSP g <sup>2</sup> /Hz	DSP g <sup>2</sup> /Hz	DSP g <sup>2</sup> /Hz
	100,00%	76,04%	52,80%	44,69%	33,79%	19,01%	8,45%	2,11%	0,34%
f	1,11*LP <sup>2</sup> *HP <sup>2</sup>	1,11*LP <sup>2</sup> *HP131	1,11*LP <sup>2</sup> *HP132	1,11*LP <sup>2</sup> *HP133	1,11*LP <sup>2</sup> *HP134	1,11*LP <sup>2</sup> *HP135	1,11*LP <sup>2</sup> *HP136	1,11*LP <sup>2</sup> *HP137	1,11*LP <sup>2</sup> *HP138
0,4898	1,46146E-06	1,11125E-06	7,71703E-07	6,5317E-07	4,9389E-07	2,77813E-07	1,23473E-07	3,08681E-08	4,9389E-09
0,5012	1,75543E-06	1,33478E-06	9,2693E-07	7,84553E-07	5,93235E-07	3,33695E-07	1,48309E-07	1,48309E-07	5,93235E-09
0,5129	2,10844E-06	1,60319E-06	1,11333E-06	9,4232E-07	7,12529E-07	4,00798E-07	1,78132E-07	4,45331E-08	7,12529E-09
0,5248	2,5323E-06	1,92548E-06	1,33714E-06	1,13176E-06	8,5577E-07	4,8137E-07	2,13942E-07	5,34856E-08	8,5577E-09
0,5370	3,0412E-06	2,31244E-06	1,60586E-06	1,3592E-06	1,02775E-06	5,7811E-07	2,56938E-07	6,42345E-08	1,02775E-08
0,5495	3,65218E-06	2,77701E-06	1,92848E-06	1,63226E-06	1,23423E-06	6,94252E-07	3,08556E-07	7,71391E-08	1,23423E-08
0,5623	4,38563E-06	3,3347E-06	2,31577E-06	1,96006E-06	1,48209E-06	8,33676E-07	3,70523E-07	9,26306E-08	1,48209E-08
0,5754	5,26604E-06	4,00414E-06	2,78065E-06	2,35354E-06	1,77962E-06	1,00103E-06	4,44904E-07	1,11226E-07	1,77962E-08
0,5888	6,32274E-06	4,80762E-06	3,33863E-06	2,82581E-06	2,13672E-06	1,20191E-06	5,3418E-07	1,33545E-07	2,13672E-08
0,6026	7,59091E-06	5,7719E-06	4,00826E-06	3,39259E-06	2,56529E-06	1,44297E-06	6,41322E-07	1,6033E-07	2,56529E-08
0,6166	9,11269E-06	6,92901E-06	4,81181E-06	4,07272E-06	3,07956E-06	1,73225E-06	7,6989E-07	1,92473E-07	3,07956E-08
0,6310	1,09386E-05	8,31735E-06	5,77594E-06	4,88876E-06	3,6966E-06	2,07934E-06	9,2415E-07	2,31038E-07	3,6966E-08
0,6457	1,3129E-05	9,98289E-06	6,93257E-06	5,86772E-06	4,43684E-06	2,49572E-06	1,10921E-06	2,77303E-07	4,43684E-08
0,6607	1,57564E-05	1,19807E-05	8,31991E-06	7,04197E-06	5,32474E-06	2,99517E-06	1,33119E-06	3,32796E-07	5,32474E-08
0,6761	1,89073E-05	1,43765E-05	9,98371E-06	8,45021E-06	6,38958E-06	3,59414E-06	1,59739E-06	3,99348E-07	6,38958E-08
0,6918	2,26854E-05	1,72493E-05	1,19787E-05	1,01387E-05	7,66634E-06	4,31232E-06	1,91659E-06	4,79147E-07	7,66634E-08
0,7079	2,72144E-05	2,0693E-05	1,43702E-05	1,21629E-05	9,1969E-06	5,17325E-06	2,29922E-06	5,74806E-07	9,1969E-08
0,7244	3,26423E-05	2,48202E-05	1,72363E-05	1,45888E-05	1,10312E-05	6,20506E-06	2,7578E-06	6,89451E-07	1,10312E-07
0,7413	3,91456E-05	2,97652E-05	2,06703E-05	1,74953E-05	1,3229E-05	7,44129E-06	3,30724E-06	8,2681E-07	1,3229E-07
0,7586	4,69349E-05	3,56879E-05	2,47833E-05	2,09765E-05	1,58613E-05	8,92197E-06	3,96532E-06	9,9133E-07	1,58613E-07
0,7762	5,62608E-05	4,27791E-05	2,97077E-05	2,51446E-05	1,90129E-05	1,06948E-05	4,75323E-06	1,18831E-06	1,90129E-07
0,7943	6,74218E-05	5,12655E-05	3,56011E-05	3,01327E-05	2,27847E-05	1,28164E-05	5,69617E-06	1,42404E-06	2,27847E-07
0,8128	8,07721E-05	6,14167E-05	4,26505E-05	3,60994E-05	2,72963E-05	1,53542E-05	6,82408E-06	1,70602E-06	2,72963E-07
0,8318	9,67319E-05	7,3552E-05	5,10778E-05	4,32322E-05	3,26898E-05	1,8388E-05	8,17245E-06	2,04311E-06	3,26898E-07
0,8511	0,000115798	8,80495E-05	6,11455E-05	5,17535E-05	3,91331E-05	2,20124E-05	9,78327E-06	2,44582E-06	3,91331E-07
0,8710	0,000138557	0,000105355	7,31632E-05	6,19253E-05	4,68244E-05	2,63387E-05	1,17061E-05	2,92653E-06	4,68244E-07

Figura 42 Fragmento del perfil de simulación calculado para poder introducirlo en el software del banco de trabajo

En la figura se muestra un trozo de los valores calculados para introducirlos en el programa de simulación. Hemos tenido que calcular la DSP en g<sup>2</sup>/Hz ya que el programa no acepta m/s<sup>2</sup>.

Una vez cargados los datos en el simulador, ya estamos listos para empezar las pruebas.

### 5.1.2. Preparación de las pruebas

Una vez cargados los datos de vibraciones, se ha colocado el teléfono de pruebas (Asus, Motorola o iPhone) en el extremo del brazo vibrador, como se muestra a continuación:



Figura 43 Posición del teléfono de pruebas durante los experimentos

El brazo vibrador va a producir un movimiento adelante-atrás, de forma que como se ve en la figura, solo se van a producir vibraciones en un eje del teléfono. Usando las opciones de la aplicación, hemos hecho coincidir el eje de vibración con el eje vertical del teléfono, por lo que para las pruebas solo vamos a considerar los datos obtenidos en ese eje, como ya se ha explicado anteriormente.

Una vez colocado el teléfono y preparada la configuración del banco de vibraciones, hemos tomado 1024 datos por periodo con la aplicación durante un tiempo de 200 segundos, es decir, 20 periodos, almacenando en archivos de texto los resultados de A(8) obtenidos para cada periodo por la aplicación, los valores de aceleración obtenidos por los acelerómetros del teléfono y los tiempos de duración de los periodos.

En el caso del iPhone, sin embargo, no podemos tomar los datos con la aplicación que hemos diseñado, ya que el sistema operativo es distinto, por eso, hemos usado la aplicación Vibration. Esta aplicación [37] nos permite utilizar el teléfono como un analizador de espectros de vibración, usando los acelerómetros y el giroscopio instalados para adquirir y mostrar datos temporales con una frecuencia de muestreo máxima de 100 Hz. La aplicación también permite eliminar la componente de DC, aplicar una ventana de Hamming a los datos y realizar la FFT en cada canal para obtener el espectro en frecuencia. En el caso de las pruebas se ha configurado la aplicación para tomar 1024 datos por periodo durante 20 periodos, dando un total de 200 segundos de medición.



Figura 44 Capturas de pantalla de la aplicación Vibration para iOS

### 5.1.3. Comparación de las secuencias temporales

Una vez tomados los datos con los teléfonos y exportados a archivos de texto, se han dibujado utilizando Matlab las secuencias temporales en el eje y para los tres teléfonos. En este caso lo hemos representado para la prueba con perfil de EM 5 al 100 %.

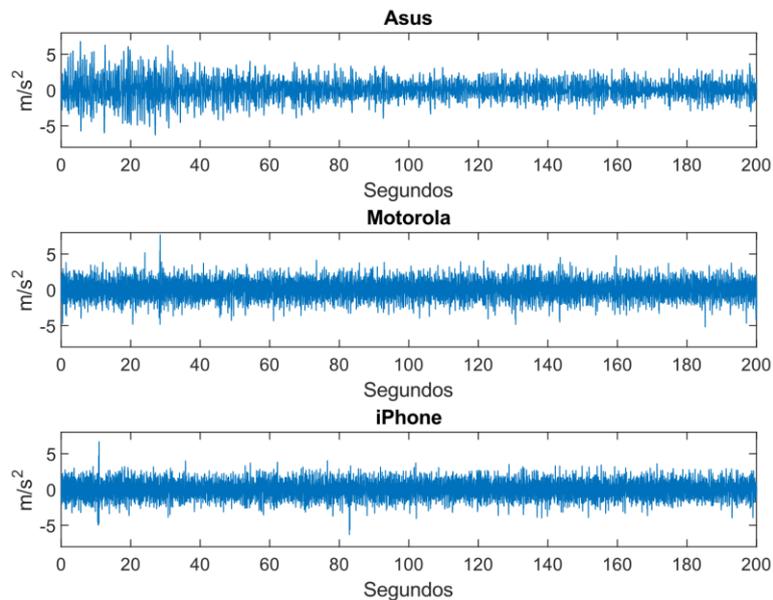


Figura 45 Comparación de las secuencias temporales para 100% de EM 5 de los tres teléfonos

A la vista de la figura, podemos decir que las secuencias temporales obtenidas para el teléfono Motorola y el iPhone son muy parecidas, mientras que ambas difieren de lo obtenido con el teléfono Asus. A la hora de comprobar los resultados también nos dimos cuenta de que los valores obtenidos con el Motorola y el iPhone venían multiplicados por un factor 2 cuyo origen no hemos podido determinar, y que en la figura está corregido, aunque creemos que tanto este factor como la diferencia con respecto al teléfono Asus se deben a que poseen acelerómetros diferentes.

A continuación, hemos representado las secuencias sobre el mismo eje para poder observar mejor las diferencias:

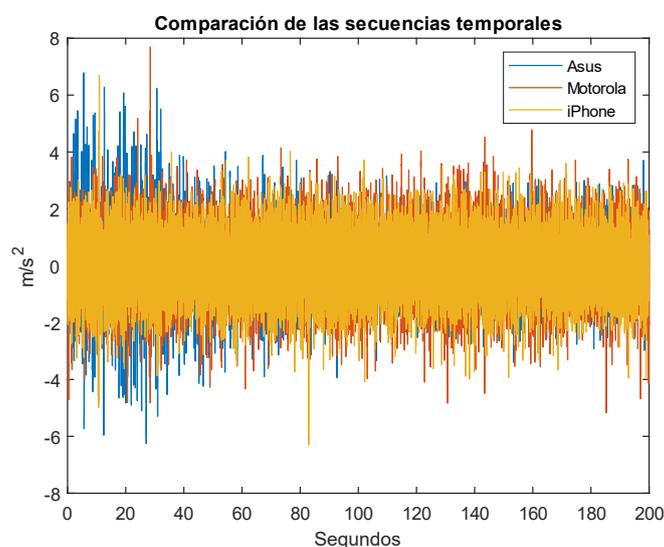


Figura 46 Comparación de las secuencias temporales para 1.72 m/s<sup>2</sup> para los tres teléfonos

Podemos ver que se confirma lo que vimos anteriormente, el teléfono Motorola y el iPhone obtienen resultados muy similares mientras que el teléfono Asus obtiene resultados algo diferentes, sobre todo para los primeros segundos.

A la vista de estas figuras podemos sacar como conclusión que el teléfono con el que se tomen los datos va a ser un factor determinante a la hora de obtener un valor de  $A(8)$  más o menos preciso y el principal causante de esta discrepancia va a ser el acelerómetro que tenga integrado cada dispositivo.

#### 5.1.4. Comparación de los espectros obtenidos

Una vez tomados los datos, la siguiente parte del desarrollo en la aplicación es el procesado de los datos de aceleración obtenidos para obtener la señal en el dominio de la frecuencia a partir de la señal temporal. Tal como se explicó anteriormente, se han tomado valores discretos de aceleración, por lo que no será posible calcular la Transformada de Fourier de una señal continua, sino que tendremos que hacer la Transformada Discreta de Fourier o DFT.

Para reducir la carga computacional necesaria para realizar estos cálculos, se ha optado por utilizar el algoritmo de la FFT. La fundamentación teórica, así como su funcionamiento, está recogida en el apartado 4.4.1.1.

En esta parte usaremos los datos tomados en la sección anterior para obtener el espectro en frecuencia para cada teléfono y poder compararlos entre sí. Para ello se parte de los datos exportados utilizados en el apartado anterior, que se cargan en Matlab en un *array*. Una vez tenemos los datos en Matlab, realizamos la FFT con la función propia del programa y representamos los resultados de forma que veamos el espectro positivo de la señal. Los gráficos obtenidos se muestran a continuación:

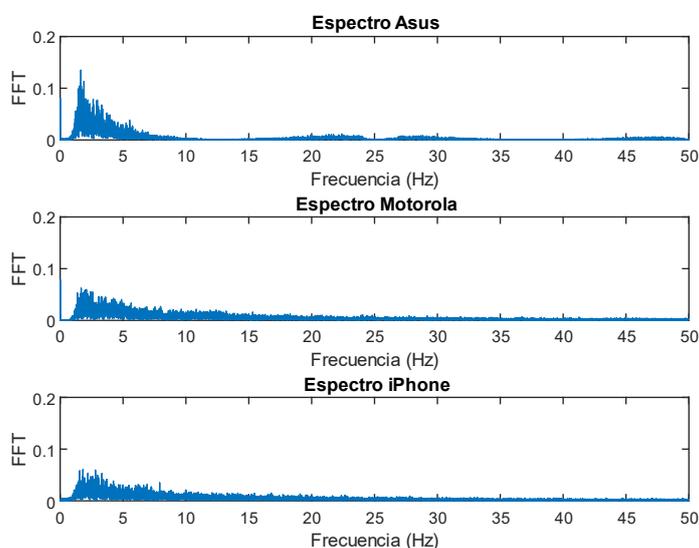


Figura 47 Comparación del espectro obtenido para cada uno de los teléfonos

A la vista de la figura se puede confirmar lo que vimos en el apartado anterior, el Motorola y el iPhone obtienen resultados muy similares, mientras que los resultados obtenidos para el Asus son más diferentes. También se puede comprobar que no aparecen valores significativos para frecuencias mayores a 10 Hz, esto es debido a que el filtro DSP que hemos introducido para el perfil de vibraciones va a atenuar los valores superiores a esta frecuencia, ya que, como ya se ha explicado anteriormente, los valores de frecuencias mayores no son significativos en las máquinas agrícolas.

Para poder ver mejor estos resultados, podemos superponer los espectros en la misma gráfica y representar solo hasta los 20 Hz, ya que frecuencias mayores no son relevantes. La gráfica se muestra a continuación:

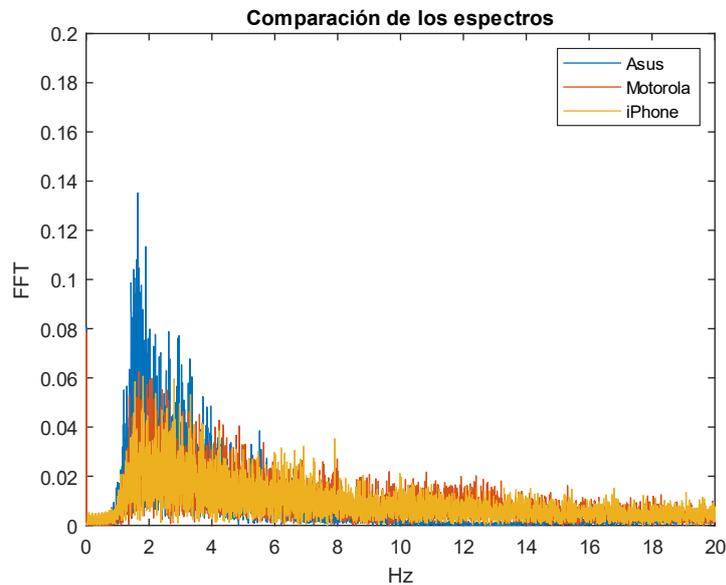


Figura 48 Comparación de los espectros de los tres teléfonos, solo se han representado las frecuencias relevantes, ya que a partir de 20 Hz no son importantes

Esta figura confirma otra vez lo que ya habíamos visto, el Motorola y el iPhone nos dan espectros similares, mientras que el Asus difiere, sobre todo, en las frecuencias más bajas.

### 5.1.5. Comparación de los tercios de octava obtenidos

Para poder ver mejor las diferencias entre los espectros, se ha realizado la separación por tercios de octava y se ha dibujado una gráfica en la que se ha puesto en el eje x las diferentes bandas de los tercios de octava, y en el eje y se ha puesto el valor de aceleración para cada banda. La gráfica se muestra a continuación:

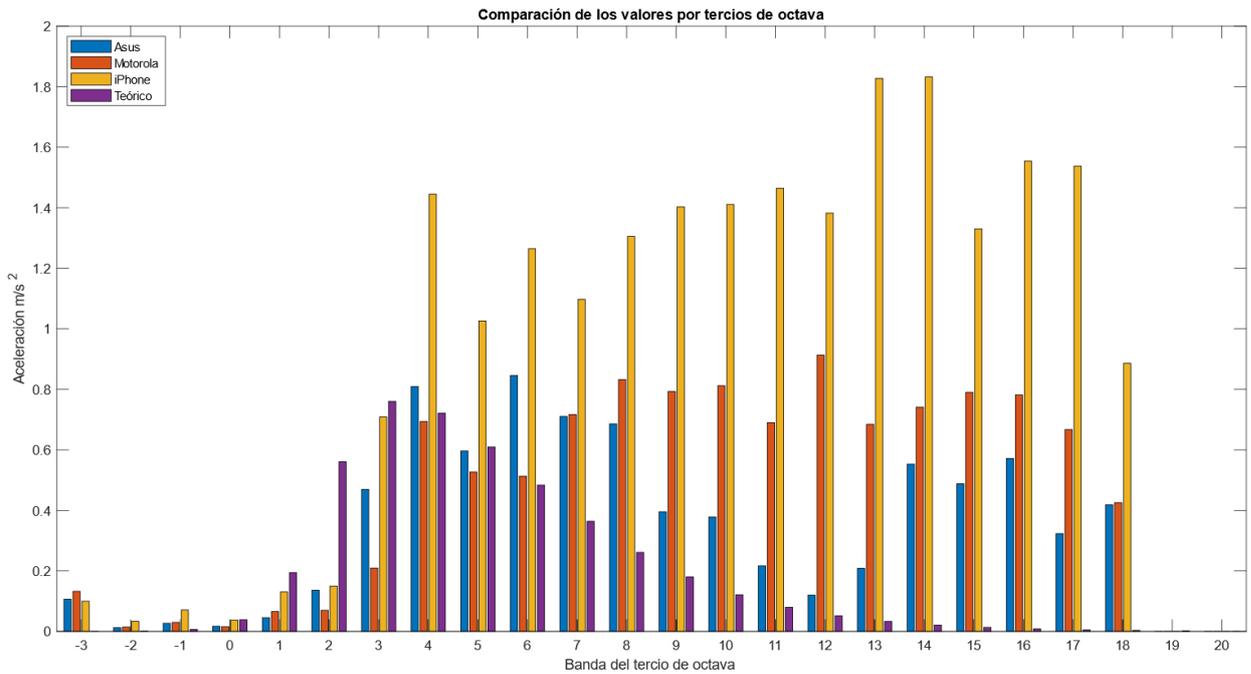


Figura 49 Comparación de los tercios de octava para cada teléfono

En la gráfica podemos ver que el teléfono Asus es el que mejor se ajusta a los valores teóricos, también se puede ver que estos valores teóricos siguen la forma del filtro DSP que calculamos anteriormente.

El Motorola y el iPhone se ajustan peor a los resultados teóricos, siendo el iPhone el que peor se ajusta en este caso, confirmando lo que vimos en las gráficas anteriores. Sin embargo, aunque parezca que la diferencia es muy grande, hay que tener en cuenta que después de agrupar por tercios de octava se aplica un filtro, los valores  $W_k$  en este caso, ya que la vibración es en el eje vertical, que van a atenuar las frecuencias más altas, haciendo que las diferencias sean menos importantes. Este efecto puede verse en la siguiente gráfica:

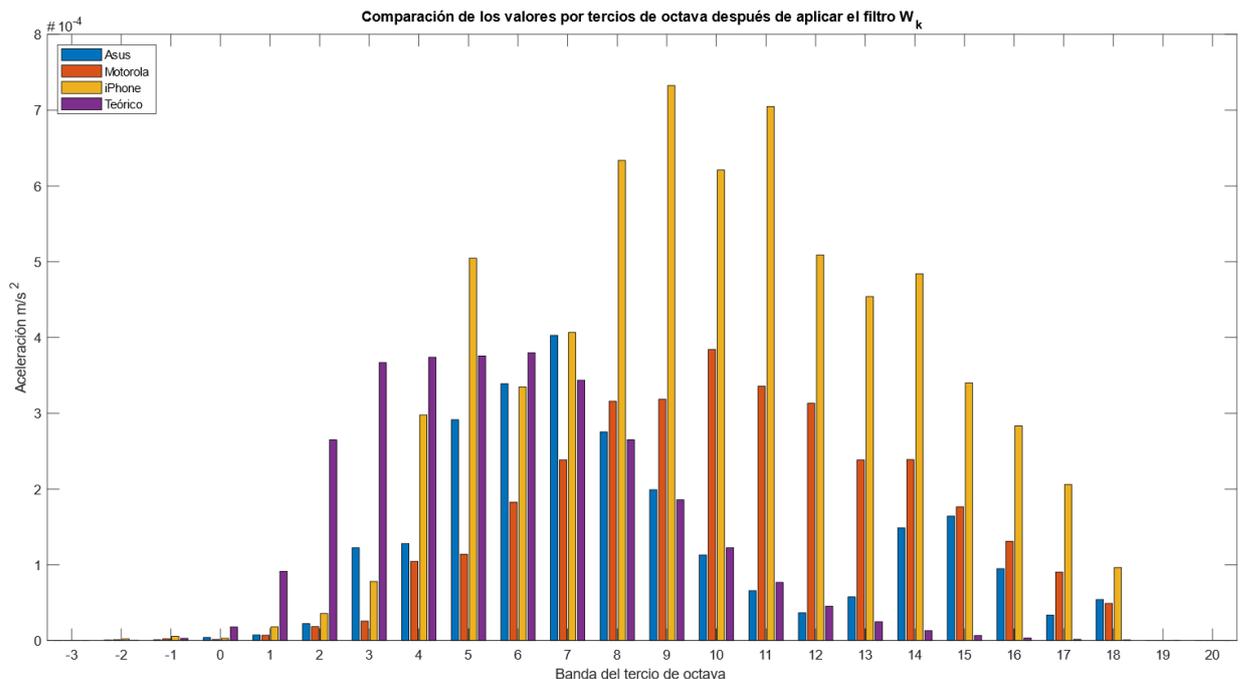


Figura 50 Comparación de los valores por tercios de octava después de aplicar el filtro  $W_k$

En la figura se puede ver que después de aplicar el filtro el Asus sigue siendo el que mejor se ajusta a los valores teóricos. También se puede ver como los valores de alta frecuencia de los tres teléfonos se han atenuado debido a la acción del filtro, aunque sigue habiendo discrepancias entre los valores que obtenemos con los teléfonos y los valores teóricos.

Estas discrepancias entre los valores por tercios de octava es lo que provoca las diferencias entre los distintos terminales cuando calculemos el valor final de A(8).

### 5.1.6. Cálculo del valor de A(8)

Después de obtener el espectro, la aplicación lo divide en tercios de octava y se calcula el valor de dosis de vibración normalizada que haya elegido el usuario, en el caso de las pruebas se ha calculado el valor normalizado para 8 horas, es decir, el A(8).

Como referencia para el experimento, se ha calculado el valor de A(8) correspondiente a los distintos porcentajes del perfil EM 5 para un tiempo de exposición de 200 segundos. Además, se ha exportado el valor que nos da la aplicación en un fichero de texto y se han utilizado los datos de frecuencias en tercios de octava del apartado anterior para calcular el valor de A(8) también con Matlab.

Tanto los cálculos realizados en la aplicación, como en Matlab, como con los datos de aceleración del banco de pruebas se han realizado siguiendo las fórmulas dadas por la Norma UNE-ISO 2631-1, explicada en el apartado 2.1.5.

#### 5.1.6.1. Errores en los cálculos de A(8) en el teléfono

Con el objetivo de averiguar si la aplicación introduce un error relevante a la hora de calcular el valor de A(8) se han comparado los valores obtenidos con la aplicación y el resultado de realizar las mismas operaciones para obtener A(8) con Matlab a partir de los datos obtenidos en los apartados anteriores.

Esta comprobación se ha realizado tanto en el teléfono Asus como en el Motorola, no hemos hecho lo mismo para el iPhone ya que, como se comentó anteriormente, la aplicación que hemos desarrollado no puede ejecutarse en ese dispositivo, y, por tanto, no tenemos con qué comparar los resultados que nos daría el hacer las operaciones con Matlab.

Los resultados obtenidos se exponen a continuación:

<b>Motorola</b>			
	Valor de A(8) para 200 segundos (m/s <sup>2</sup> )		
<b>Porcentaje de EM 5</b>	<b>MATLAB</b>	<b>APP</b>	<b>Error</b>
100 %	0,19705	0,19037	3%
76,037 %	0,12575	0,12622	0%
52,803%	0,12505	0,12144	3%
44,693%	0,12010	0,11731	2%
33,794%	0,10983	0,11225	2%
19,009%	0,08279	0,08177	1%
8,449%	0,05274	0,05249	0%
2,112%	0,02754	0,02837	3%
0,338%	0,01096	0,01061	3%

Tabla 14 Comparación de los valores de A(8) obtenidos con la aplicación y calculados con Matlab para el teléfono Motorola

Asus			
	Valor de A(8)		
Porcentaje de EM 5	MATLAB	APP	Error
100 %	0,15762	0,15529	1%
76,037 %	0,12537	0,12446	1%
52,803%	0,11365	0,11046	3%
44,693%	0,09866	0,09629	2%
33,794%	0,09445	0,09677	2%
19,009%	0,06146	0,06331	3%
8,449%	0,04295	0,04328	1%
2,112%	0,02082	0,02020	3%
0,338%	0,00860	0,00858	0%

Tabla 15 Comparación de los valores de A(8) obtenidos con la aplicación y calculados con Matlab para el teléfono Asus

A la vista de ambas tablas, podemos ver que los errores son bastante pequeños teniendo un error medio del 2.15 % en el caso del Motorola y del 1.86 % en el caso del Asus. Además, también podemos apreciar que no hay ninguna tendencia en los errores respecto del valor de EM 5, es decir, ni crecen ni decrecen con el valor de EM 5, sino que es aleatorio. Para apreciar esto mejor se han construido las siguientes gráficas:

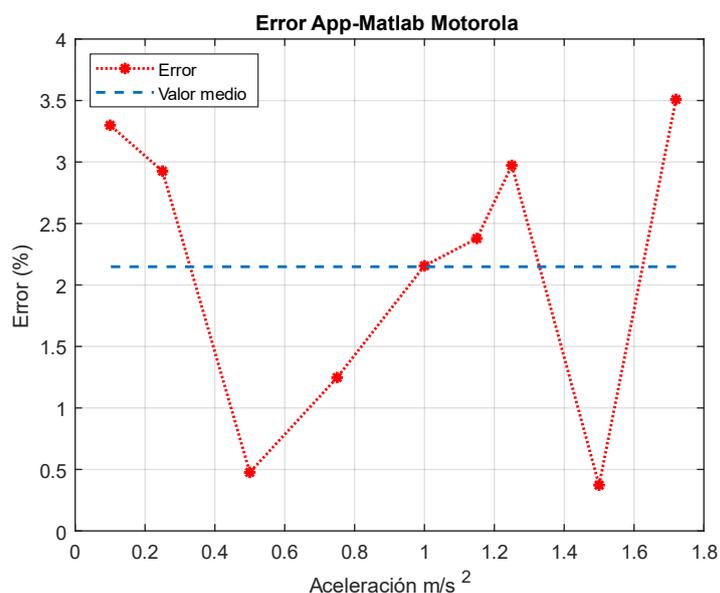


Figura 51 Gráfica del error en el cálculo de A(8) para el teléfono Motorola

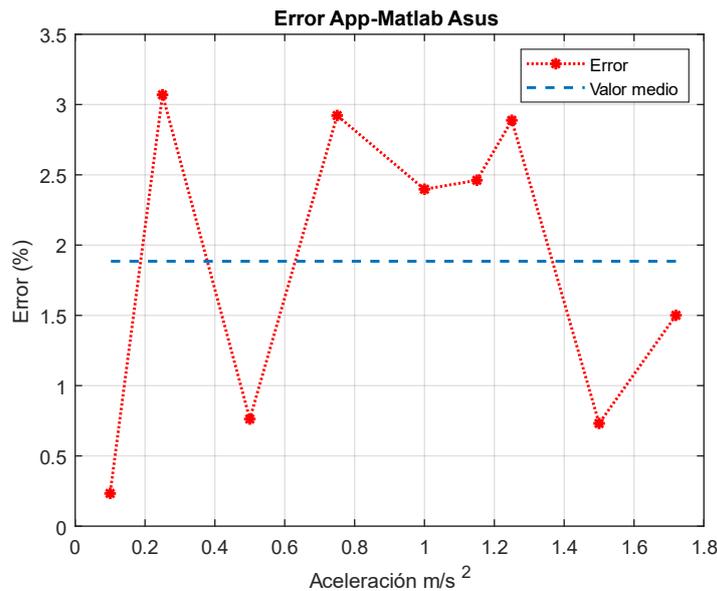


Figura 52 Gráfica del error en el cálculo de A(8) para el teléfono Asus

Esta discrepancia en los resultados de la aplicación y los obtenidos con Matlab probablemente sea debida a la implementación de la FFT programada en la aplicación, puesto que el resto de las operaciones se han realizado de la misma manera. Es de suponer que la implementación de la FFT instalada en Matlab sea mucho más precisa que la que hemos implementado nosotros. Sea como fuere, al ser un error del orden del 2 % puede considerarse despreciable y, por tanto, considerar que no va a afectar significativamente al resultado final.

#### 5.1.6.2. Comparación de los valores de A(8) de la aplicación con los valores teóricos calculados

Para comprobar la precisión de la aplicación comparamos el valor final obtenido con el valor teórico calculado. Como ya se ha repetido anteriormente, en el caso del iPhone, el valor de A(8) no lo hemos obtenido con la aplicación si no realizando los cálculos con Matlab a partir de las muestras obtenidas con otra aplicación.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Valores de A(8) para 200 segundos (m/s <sup>2</sup> )				
Porcentaje de EM 5	Teórico	Asus	Motorola	iPhone
100 %	0,14335	0,15529	0,19037	0,15110
76,037 %	0,12500	0,12446	0,12622	0,15765
52,803%	0,10417	0,11046	0,12144	0,10558
44,693%	0,09583	0,09629	0,11731	0,10926
33,794%	0,08333	0,09677	0,11225	0,07896
19,009%	0,06250	0,06331	0,08177	0,05692
8,449%	0,04167	0,04328	0,05249	0,03991
2,112%	0,02083	0,02020	0,02837	0,02645
0,338%	0,00833	0,00858	0,01061	0,00823

Tabla 16 Valores de A(8) obtenidos por la aplicación para cada dispositivo tras 200 segundos de exposición

En la tabla anterior se muestran los resultados de A(8) obtenidos con la aplicación para cada porcentaje del perfil EM 5, excepto en el caso del iPhone, que, como se ha dicho, se han obtenido con Matlab a partir de los datos tomados con otra aplicación. A la vista de los resultados se puede ver que el teléfono que proporciona unos resultados más cercanos a los calculados de forma

teórica es el Asus, mientras que el Motorola y el iPhone difieren más. Entre estos dos últimos, el iPhone es el que ofrece mejores resultados, a pesar de no ser tan buenos como los del Asus, mientras que los resultados obtenidos con el Motorola se ajustan bastante peor a los datos teóricos.

La información de la tabla anterior se ha resumido en la siguiente gráfica, donde se puede ver mejor que los datos del Asus se ajustan casi perfectamente a los datos teóricos, mientras que los otros dos se ajustan bastante peor:

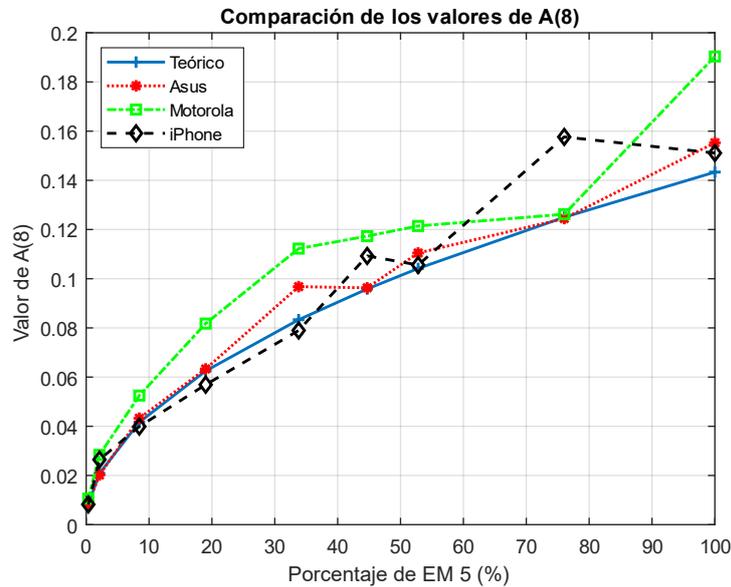


Figura 53 Comparación de los valores de A(8) obtenidos por cada teléfono para cada valor del EM 5

También se han calculado los errores relativos para cada dispositivo para ver mejor que teléfono ofrece mejores resultados. La tabla con los errores se muestra a continuación:

Errores relativos (%)			
Porcentaje de EM 5	Asus	Motorola	iPhone
100 %	8,3293	32,8008	5,4063
76,037 %	0,4320	0,9760	26,1200
52,803%	6,0382	16,5787	1,3536
44,693%	0,4800	22,4147	14,0144
33,794%	16,1286	34,7054	5,2442
19,009%	1,2960	30,8320	8,9280
8,449%	3,8637	25,9659	4,2237
2,112%	3,0245	36,1978	26,9803
0,338%	3,0012	27,3709	1,2005
<b>Promedio</b>	<b>4,73 %</b>	<b>25,32 %</b>	<b>10,39 %</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>4,9946</b>	<b>11,0389</b>	<b>9,9586</b>

Tabla 17 Errores relativos obtenidos con la aplicación para el valor de A(8) para 200 segundos de exposición

Los datos de la tabla anterior confirman lo que comentamos anteriormente. El Asus es el teléfono más preciso con un error medio del 4,73 %, seguido del iPhone, con un error del 10,39 % y, por último, el Motorola es el teléfono menos preciso, con un error medio del 25,32 %.

Para el caso de la tabla anterior, también se ha construido una gráfica para poder ver mejor los resultados:

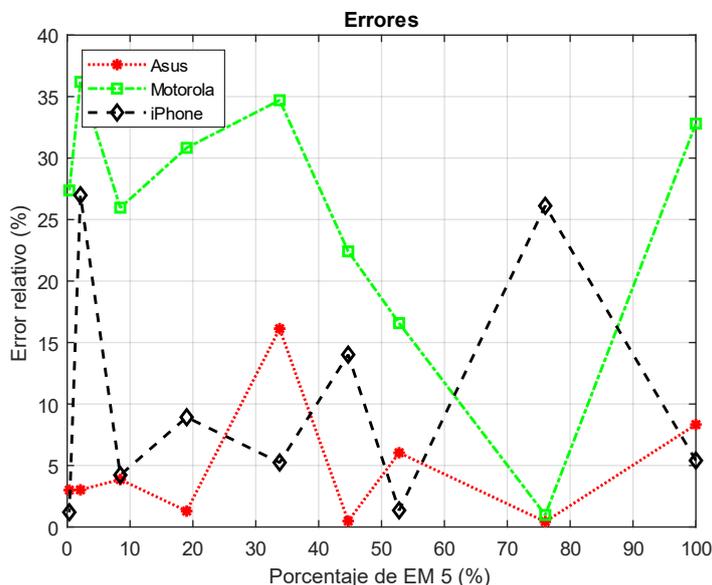


Figura 54 Errores relativos en el valor de  $A(8)$  obtenido con cada dispositivo y para cada valor de EM 5

A la vista de todos los resultados anteriores, se puede concluir que el teléfono que mejor se ajusta a los valores esperados es el Asus, manteniendo un error relativo medio del orden del 4.73 %. Para los otros dos teléfonos podemos ver que el iPhone se ajusta mejor que el Motorola, a pesar de que el error es el doble, del 10,39%. Por último, el Motorola es el teléfono que menos precisión nos da, teniendo tramos con un error medio del 25,32 %. En esta diferencia en el valor de  $A(8)$  es donde más influyen las discrepancias vistas anteriormente en las secuencias temporales y el valor del espectro obtenidos con cada teléfono.

Una vez visto que el Asus es el teléfono más preciso, podríamos intentar descubrir por qué lo es. En primer lugar, podemos descartar la frecuencia de muestreo, en los tres casos es de 100 Hz, lo que es un valor suficientemente alto como para que no de problemas de aliasing, ya que como hemos visto antes no van a aparecer en las vibraciones frecuencias mayores de 20 Hz. También podemos descartar que otras aplicaciones que estuvieran corriendo a la vez en los teléfonos hayan influido al quitar a nuestra aplicación tiempo de procesamiento, ya que todas las pruebas se han hecho con el teléfono en modo avión y no se ha ejecutado ninguna otra aplicación mientras se hacían las pruebas. Los errores también podrían deberse al acelerómetro instalado en cada dispositivo, ya que en cada caso son distintos, es probable que el Asus tenga integrado un acelerómetro mejor que los otros dos teléfonos, sin embargo, esto es difícil de comprobar ya que el fabricante de cada teléfono no especifica la marca y modelo del acelerómetro instalado.

### 5.1.7. Distribución de los tiempos de cálculo durante la ejecución de la aplicación

Con el objetivo de ver como se distribuyen los tiempos durante la ejecución de la aplicación y ver que parte del proceso dedica más tiempo se ha realizado la siguiente prueba. Para ello se ha ejecutado la aplicación durante 200 segundos, programando temporizadores para las diferentes partes del proceso de cálculo. Las partes del cálculo que se han analizado son las siguientes:

realización de la FFT, separación en tercios de octava, cálculo de A(8) y limpieza de variables al final del periodo.

Los tiempos que hemos obtenido son los siguientes:

Número de toma	FFT (ms)	Tercios de octava (ms)	Cálculo de A(8) (ms)	Tiempo de limpieza (ms)
1	297,000	11,000	1,000	0,683
2	302,000	11,000	2,000	0,706
3	303,000	12,000	1,000	0,704
4	309,000	11,000	2,000	0,694
5	290,000	12,000	2,000	0,704
6	289,000	12,000	2,000	0,711
7	289,000	12,000	2,000	0,689
8	302,000	12,000	2,000	0,839
9	301,000	12,000	2,000	0,698
10	305,000	12,000	2,000	0,700
11	308,000	12,000	3,000	0,724
12	312,000	12,000	2,000	0,753
13	307,000	12,000	2,000	0,714
14	311,000	12,000	3,000	0,732
15	313,000	12,000	3,000	0,760
16	295,000	12,000	3,000	0,694
17	294,000	12,000	3,000	0,702
18	291,000	12,000	3,000	0,690
19	290,000	11,000	3,000	0,689
20	297,000	12,000	3,000	0,906
<b>Promedio</b>	300,250	11,800	2,300	0,725
<b>Desviación estándar</b>	8,181	0,410	0,657	0,055

*Tabla 18 Tiempos de cálculo obtenidos tras los 200 segundos de muestreo*

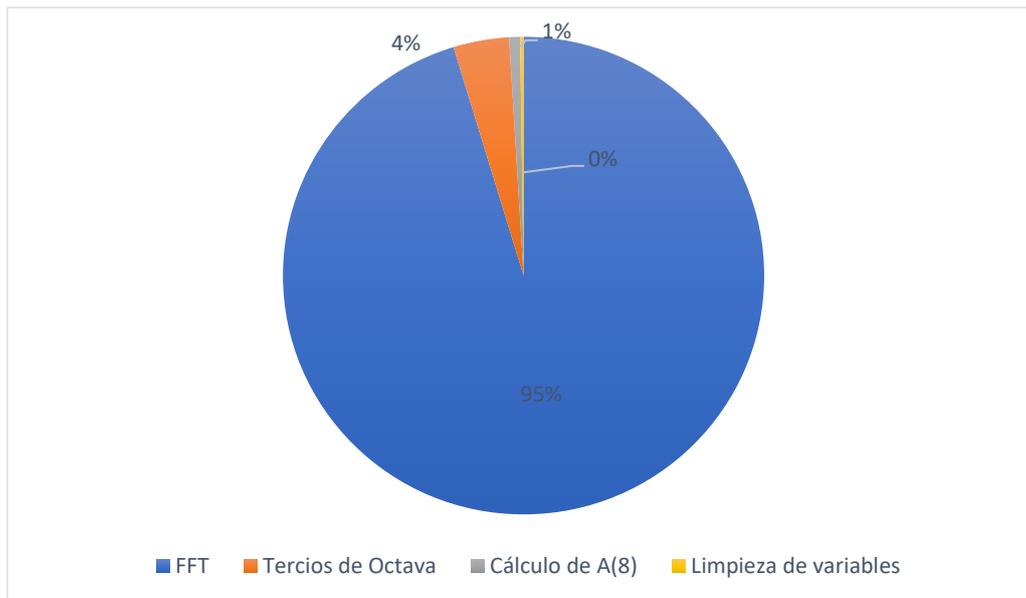


Figura 55 Distribución de los tiempos de cálculo en la aplicación

Como se observa en el gráfico, lo que más tiempo tarda es el cálculo de la FFT con un 95% del total, mientras que lo siguiente es la agrupación de los valores por tiempos de octava, 4 %, y, por último, los tiempos de cálculo de A(8) y de limpieza de las variables son despreciables frente a los otros dos.

También podemos comparar los resultados del tiempo de cálculo con los tiempos de muestreo para ver qué porcentaje del tiempo total se dedica a cada cosa. Para tal fin se han recopilado los diferentes tiempos de los periodos de muestreo del experimento anterior. Los resultados se muestran en una tabla a continuación:

Número de toma	Tiempos de muestreo (s)	Porcentaje del tiempo total (%)
1	10,088	97,02
2	9,675	96,84
3	9,664	96,83
4	9,658	96,77
5	9,647	96,94
6	9,680	96,96
7	9,673	96,96
8	9,677	96,83
9	9,662	96,84
10	9,666	96,80
11	9,664	96,76
12	9,663	96,73
13	9,648	96,77
14	9,658	96,73
15	9,653	96,71
16	9,638	96,88
17	9,692	96,90
18	9,671	96,93
19	9,672	96,95
20	9,678	96,87

<b>Promedio</b>	9,686	96,85
<b>Desviación estándar</b>	0,0954	0,09

*Tabla 19 Tiempos de muestreo para los diferentes periodos*

A la vista de la tabla anterior, se puede ver que el tiempo de muestreo varía para cada periodo, esto se debe a que la frecuencia de muestreo del teléfono no es exactamente fija, sino que tiene una pequeña variación, que es lo suficientemente pequeña como para considerarla despreciable.

Comparando los resultados de los tiempos de muestreo con los tiempos de cálculo se puede ver que el tiempo de muestreo ocupa la gran mayoría del tiempo total de uso de la aplicación, en concreto, en este caso el 97 % del tiempo se ha usado para tomar los datos, mientras que solo el 3 % del tiempo se ha usado para el cálculo.

## Conclusiones

Al comienzo de esta memoria se ha analizado la normativa española sobre la medición y evaluación de vibraciones, recogida en la norma UNE ISO 2631-1. En ella se describe como deben medirse las vibraciones y distintos métodos para evaluarlas y calcular la dosis diaria de vibración, métodos que posteriormente hemos implementado en la aplicación. En este capítulo se ha realizado también un estudio sobre los efectos de las vibraciones en el cuerpo humano, empezando por datos estadísticos para averiguar que grupos de personas son más propensos a verse afectados por las vibraciones.

Posteriormente se han descrito los diferentes efectos negativos sobre la salud que pueden tener las vibraciones mano-brazo y de cuerpo entero, y se han expuesto algunos criterios preventivos para disminuir su efecto.

El capítulo termina con un estudio de dos artículos científicos relacionados con la medición de vibraciones en maquinaria agrícola, que, aunque no tratan el tema de dosis diaria o efectos sobre el organismo, nos han permitido ver distintos aspectos que pueden causar el aumento o la disminución de las vibraciones.

En el siguiente capítulo se ha realizado un repaso de los materiales, hardware y software, utilizados en el proyecto con el objetivo de determinar la viabilidad de los resultados obtenidos con la aplicación. En primer lugar, se han descrito las características técnicas de los terminales utilizados en las pruebas: dos teléfonos Android, Motorola y Asus, y un iPhone 6. Seguidamente se han explicado los materiales utilizados en la mesa de vibraciones además de los programas utilizados tanto en las pruebas como en el desarrollo de la aplicación.

En el capítulo siguiente se ha explicado todo lo relacionado con el desarrollo de la aplicación, explicando tanto la fundamentación teórica como la implementación en código. También se detallan al principio del capítulo las características mínimas que tiene que tener un terminal para poder ejecutar la aplicación. El desarrollo de la aplicación puede dividirse en dos partes diferenciadas: la obtención de los datos y el tratamiento de estos.

Para adquirir los datos de aceleración a la que se somete el teléfono, se han utilizado los sensores integrados en el mismo, en particular, el acelerómetro. El acelerómetro que integra cada dispositivo será diferente dependiendo de su marca y características técnicas. En este punto se determina la frecuencia de muestreo mínima que debe tener el dispositivo para el rango de frecuencias de interés. Esto se demuestra con la teoría de muestreo de Nyquist, que dice que, para recuperar correctamente una señal muestreada, la frecuencia con la que se toman las muestras debe ser, como mínimo, el doble de la frecuencia máxima de la señal a muestrear. En el caso de la aplicación, se usa la frecuencia más rápida que puede dar el teléfono.

Una vez se han tomado los datos de aceleración, la aplicación sigue un proceso de cálculo para llegar al valor de la dosis diaria normalizada. Este proceso comienza transformando los datos al dominio de la frecuencia mediante la FFT (*Fast Fourier Transform*), un algoritmo que nos permite calcular la Transformada de Fourier reduciendo el coste de recursos para el cálculo. A continuación, se agrupan los valores en tercios de octava para realizar la posterior ponderación siguiendo la norma UNE ISO 2631-1. Finalmente, se añaden los datos obtenidos en los periodos de muestreo posteriores y se obtiene el valor de la dosis diaria normalizada.

En el último capítulo, se explican cómo se han realizado las pruebas de validación de la aplicación. Para ello se han realizado varios experimentos distintos con el objetivo de encontrar diversas fuentes de error que pudiera haber en la aplicación.

En primer lugar, se ha explicado el perfil de simulaciones de vibración que se usará para las pruebas aleatorias. Este perfil proviene de una norma española, UNE-ISO 7096, que divide las diferentes máquinas para movimiento de tierras por clases y da un perfil de filtros de entrada para cada una de ellas. En nuestro caso, se ha usado la clase EM 5, que es la clase que incluye a los

tractores de cuatro ruedas, como los utilizados en la agricultura. Este perfil define un filtro DSP que limita las frecuencias de entrada hasta los 20 Hz aproximadamente, esto se debe a que frecuencias más altas no son significativas en este tipo de maquinaria. Al limitar la frecuencia hasta los 20 Hz, la frecuencia de muestreo que deberíamos utilizar según el teorema de Nyquist debe ser de al menos el doble, es decir, 40 Hz. Los teléfonos que hemos usado para las pruebas tienen una frecuencia máxima de 100 Hz, por lo que es más que suficiente para que no se produzca aliasing al tomar muestras de la señal. Por esto, podemos concluir que la frecuencia de muestreo no ha sido un factor limitante a la hora de desarrollar la aplicación ni una fuente de error a la hora de hacer las pruebas y calcular el valor de A(8).

Seguidamente, se han comparado los datos temporales y los espectros obtenidos con cada uno de los teléfonos de pruebas, apreciando algunas diferencias entre el terminal Asus y los terminales Motorola e iPhone. También se han comparado los valores obtenidos por tercio de octava para poder ver mejor las diferencias entre los espectros. Posteriormente, se ha comparado el valor de A(8) obtenido con la aplicación con el obtenido realizando los cálculos en Matlab para ver si el teléfono puede introducir errores al obtener el valor final. El error medio en el cálculo en el caso del teléfono Asus ha sido del 1.885 % mientras que en el caso del Motorola ha sido del 2.1485 %, en ambos casos es un error muy pequeño que no va a influir de forma significativa en el resultado final.

Por último, para comprobar la precisión de la aplicación a la hora de medir la dosis de vibración normalizada, se han comparado los resultados obtenidos con los distintos teléfonos con el resultado teórico que se obtiene al utilizar el perfil de vibración EM 5 descrito en la norma UNE-ISO 7096. Tras realizar las pruebas se ha obtenido que el teléfono que mejor se ajusta a los resultados teóricos es el Asus, con un error medio del 4,73 % , el segundo mejor ha sido el iPhone con un error medio del 10,39%, y, por último, el Motorola ha sido el peor de los tres, con un error medio del 25,32%.

También se han realizado pruebas senoidales para comprobar los resultados de la aplicación a diversas frecuencias, sin embargo, por un error en los acelerómetros profesionales durante las pruebas, no tenemos con que comparar los resultados obtenidos con la aplicación, por lo que solo nos han servido para confirmar el error de cálculo obtenido en las pruebas anteriores.

Por último, al final de documento se encuentra un anexo con el manual de usuario de la aplicación desarrollada.

Como conclusiones del proyecto, se ha demostrado que la aplicación desarrollada ha obtenido resultados con unos errores suficientemente pequeños, en el caso del Asus<sup>2</sup>. En el caso del teléfono Motorola, sin embargo, el error obtenido ha sido mayor. Las diferencias entre los resultados en ambos dispositivos se deben principalmente al acelerómetro integrado en cada uno de ellos, y en concreto, a la precisión que tenga el acelerómetro, por tanto, aquel teléfono que cuente con un acelerómetro integrado más preciso será el que nos de mejores resultados.

Como conclusión de todo el trabajo, podemos decir que la aplicación funciona, ya que hemos comprobado que la toma de datos y los cálculos se realizan correctamente. En cuanto a los resultados finales, los errores que se obtienen proceden, sobre todo, de la precisión del acelerómetro integrado, no de la aplicación. Estos errores han sido del 4.73 % de media para una toma de 200 segundos, en un futuro, podrían hacerse pruebas de duraciones más largas para comprobar como varían los errores.

---

<sup>2</sup> En el caso del iPhone también hemos obtenido un error relativamente pequeño, sin embargo, hay que recordar que en este terminal no hemos podido usar nuestra aplicación.

# Bibliografía

- [1] « International Organization for Standarization (ISO),» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/about-us.html>.
- [2] «Asociación Española de Normalización (UNE),» Junio 2018. [En línea]. Available: <http://www.aenor.es/aenor/aenor/perfil/perfil.asp#.Wxuz8I74nIU>.
- [3] *Norma UNE-ISO 2631-1 Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero*, 2008.
- [4] *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, 2015.
- [5] *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, 2011.
- [6] *Instituto Nacional de Seguridad e Higienen en el Trabajo.*, 2013.
- [7] M. J. Griffin, «Vibraciones,» de *Enciclopedia de la Salud y Seguridad en el Trabajo*, 1998, p. Capítulo 50.
- [8] M. P. G. C. C. A. L. Ana Teresa Araujo Reyes, «Síndrome de Raynaud,» *MEDUNAB*, 2002.
- [9] S. Z. Y. Z. Do Minh Cuong, «Effects of tyre inflation pressure and forward speed on vibration of an unsuspended tractor,» *Journal of Terramechanics*, pp. 185-198, 2013.
- [10] A. C. C. P. Roberto Deboli, «Whole-body vibration: Measurement of horizontal and vertical,» *International Journal of Industrial Ergonomics*, pp. 69-78, 2017.
- [11] «Ficha Motorola Moto G 2015,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://computerhoy.com/fichas/motorola-moto-g-2015>.
- [12] «Motorola Moto G 2015,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.smart-gsm.com/moviles/motorola-moto-g-2015>.
- [13] «Ficha Asus Zenfone 2,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://computerhoy.com/fichas/asus-zenfone-2>.
- [14] «iPhone 6,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.smart-gsm.com/moviles/apple-iphone-6>.
- [15] MB Dynamics, «S&R Energizers - Operating Background Noise fulfills requirements of Noise Rating Curve NR18,» Junio 2018. [En línea]. Available: [http://www.mbdynamics.eu/products/Quiet%20Shaker\\_MB%20Energizer%20Series.html](http://www.mbdynamics.eu/products/Quiet%20Shaker_MB%20Energizer%20Series.html).
- [16] PCB Piezotronics, «Datasheet Model PCB 333B40,» Junio 2018. [En línea]. Available: [http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB\\_Corporate/Vibration/Products/Manuals/333B40.pdf](http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/Products/Manuals/333B40.pdf).
- [17] Brüel & Kjaer, «DataSheet Accelerometer Types 4507 and 4508,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibrationtransducers/>.

- [18] National Instruments, «¿Qué es Adquisición de Datos?,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>.
- [19] National Instruments, «Random Vibration Control,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-exciters/vibration-controllers/vibration-control-software/random-vibration-control>.
- [20] Jet Brains, «IntelliJ IDEA features,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.jetbrains.com/idea/features/>.
- [21] Android Developers, «Conociendo Android Studio,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://developer.android.com/studio/intro/>.
- [22] Gradle Inc., «Gradle Build Tool,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://gradle.org>.
- [23] Android Developers, «Android Plugin for Gradle,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://developer.android.com/studio/releases/gradle-plugin>.
- [24] «Apache Groovy,» Junio 2018. [En línea]. Available: <http://groovy-lang.org>.
- [25] Mathworks, «MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [26] Mathworks, «MATLAB Documentation,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/>.
- [27] Android Developers, «Sensors Overview,» Junio 2018. [En línea]. Available: [https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors\\_overview](https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview).
- [28] M. Wei, «Desarrollo de aplicaciones de sensores en teléfonos y tabletas Android\* basados en el procesador Intel® Atom™,» Noviembre 2013. [En línea]. Available: <https://software.intel.com/es-es/android/articles/developing-sensor-applications-on-intel-atom-processor-based-android-phones-and-tablets>.
- [29] S. A. Fernández, «Sistemas Lineales Tema 5. Muestreo,» Junio 2018. [En línea]. Available: <http://www.lpi.tel.uva.es/lineales/apuntes/tema5.pdf>.
- [30] P. Vaidyanathan, «Generalizations of the sampling theorem: Seven decades after Nyquist,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, pp. 1094-1109, 2001.
- [31] «Info Accelerometer Frequency,» Junio 2018. [En línea]. Available: <http://accfreq.cochibo.com>.
- [32] L. d. l. Fraga, *La Transformada Discreta de Fourier y la Transformada Rápida de Fourier*, 2001.
- [33] S. Robert, «The Discrete Fourier Transform. Machine Learning,» Junio 2018. [En línea]. Available: <http://www.robots.ox.ac.uk/~sjrob/Teaching/SP/17.pdf>.
- [34] R. & W. K. Sedgewick, «Data Analysis. Introduction to Programming in Java,» 2011. [En línea]. Available: <http://introc.cs.princeton.edu/java/97data/>.
- [35] «Real Decreto 1311/2005,» de *BOE núm 265.*, 5 de noviembre 2005.

- [36] *Norma UNE-ISO 7096 Evaluación en laboratorio de las vibraciones transmitidas al operador por el asiento.*
- [37] «Vibration,» [En línea]. Available: <https://itunes.apple.com/us/app/vibration/id301097580?platform=iphone&preserveScrollPosition=true#platform/iphone>. [Último acceso: Septiembre 2018].
- [38] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, «Vibraciones de cuerpo entero,» Junio 2018. [En línea].
- [39] «Ficha Motorola Moto G4,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://computerhoy.com/fichas/motorola-moto-g4>.
- [40] «Datos técnicos New Holland TM190,» Junio 2018. [En línea]. Available: <http://maquqam.com/tecnicas/agricola-298/new-holland/tm190.html>.
- [41] National Instruments, «Understanding FFTs and Windowing,» Diciembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/4844/en/>.
- [42] A. Izquierdo, *Tratamiento Digital de la Señal*, Universidad de Valladolid, 2017.
- [43] National Instruments, «Sine Vibration Control,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-exciters/vibration-controllers/vibration-control-software/sine-vibration-control>.

## Anexo: Manual de usuario de la aplicación

En este anexo se indican las principales características de la aplicación, así como una descripción de la navegación en la misma. En primer lugar, se describe el icono de la aplicación, y posteriormente, se explicará el uso de la aplicación pasando por los diferentes menús y opciones de la aplicación.

### Icono de la aplicación

La aplicación está representada por un icono que permite el acceso directo a la misma y que se muestra a continuación:



Figura 56 Icono de la aplicación

El icono muestra un teléfono móvil al que se han añadido unas líneas que representan las vibraciones.

### Uso de la aplicación

Al iniciar la aplicación, el usuario se encuentra una pantalla de bienvenida con el nombre de la aplicación y cinco botones distintos:

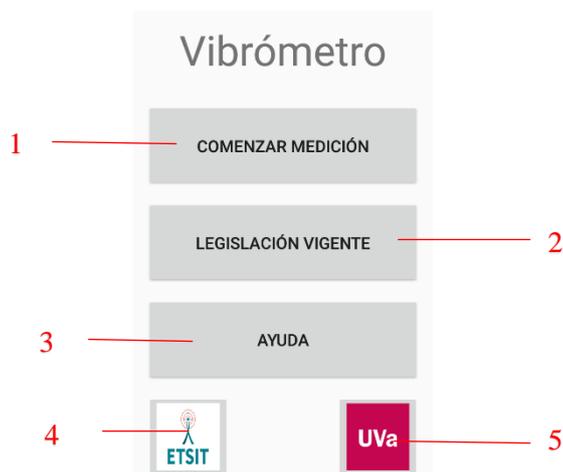


Figura 57 Pantalla de inicio

1. Comenzar a medir.
2. Legislación vigente.
3. Ayuda.
4. Lleva a la página web de la E.T.S.I. de Telecomunicación.
5. Lleva a la página web de la Universidad de Valladolid.

Una vez pulsamos el botón de Comenzar a medir, nos aparece otra pantalla donde debemos seleccionar la posición en la que se encuentra el teléfono respecto al asiento de la cabina que se ve sometida a las vibraciones. Esto se debe a que dependiendo del eje al que correspondan los datos, estos tienen una ponderación distinta. En esta pantalla también se especifica también que si se quiere cambiar la posición del teléfono es necesario reiniciar la aplicación.

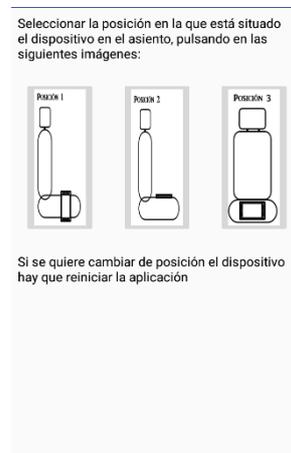


Figura 58 Menú de selección de la posición respecto del asiento

Una vez seleccionada la posición, la siguiente pantalla nos permite seleccionar el número de horas de referencia para el cálculo de la dosis normalizada. También nos permite elegir el número de datos que se van a tomar por período de muestreo.

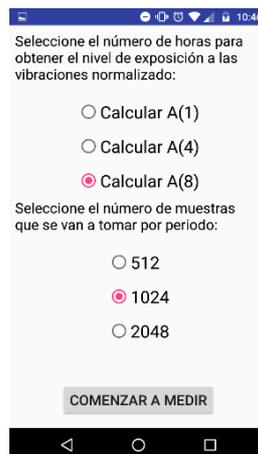


Figura 59 Pantalla de selección del número de horas de referencia y datos por período

De esta forma se seleccionan los parámetros para la medición. Al pulsar el botón de Comenzar a medir se nos muestra otra pantalla que nos indica que se están tomando los primeros datos. Debemos esperar hasta que se haya terminado el primer período para poder ver los resultados parciales: el resultado de los períodos anteriores, la frecuencia media de muestreo y el número de períodos que se han realizado.

Al pulsar el botón Parar, se finaliza la medición y si se ha elegido tomar 8 horas para la referencia, en la pantalla de resultados finales se mostrará no solo el valor final de aceleración, sino también se considera si la vibración es muy nociva, poco nociva o nada nociva según los límites de la legislación española. Los valores que marcan los límites ya se han indicado anteriormente en el apartado 4.4.5. Cálculo del valor de dosis diaria normalizada

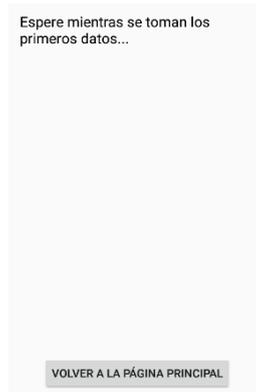


Figura 60 Inicio de la medición

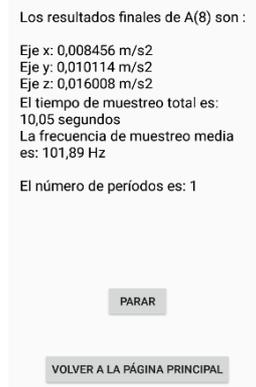


Figura 61 Pantalla que se muestra durante la toma de datos



Figura 62 Pantalla de resultados finales

En la pantalla de resultados finales, la aplicación nos da la opción de volver a la pantalla de bienvenida y de guardar los resultados recogidos en un fichero .txt. Al elegir la opción de guardar los resultados, también se guardarán en otros dos ficheros distintos los datos recogidos por los sensores sin procesar y los tiempos que se ha tardado en realizar las operaciones de muestreo y cálculo.

Los resultados se guardan de tal forma que permite manipularlos en herramientas matemáticas como MATLAB con facilidad.

La aplicación permite seleccionar el nombre del fichero mediante una ventana emergente.

Hay que tener en cuenta también, que para poder crear y guardar ficheros en el teléfono, es necesario aceptar los permisos de almacenamiento de Android. La primera vez que se guarde un fichero se mostrará una ventana emergente para poder aceptar estos permisos.

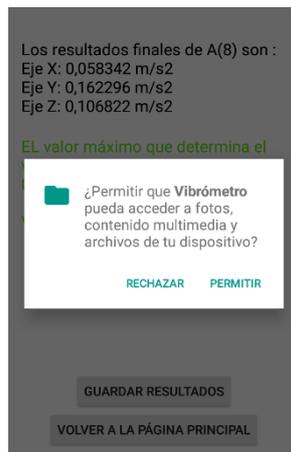


Figura 63 Petición de permiso de almacenamiento al usuario

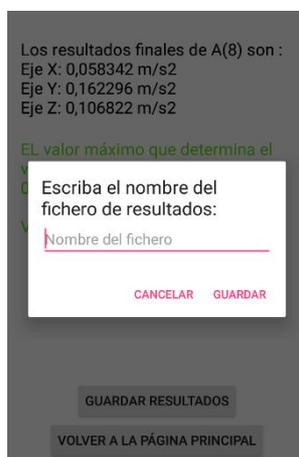


Figura 64 Pantalla de selección del nombre del fichero

Una vez se han guardado los datos correctamente, aparecerá un mensaje emergente que se muestra a continuación:



Figura 65 Mensaje emergente que indica que el fichero se ha guardado correctamente

Con esto se termina el proceso de medición y almacenamiento de resultados.

Volviendo a la pantalla principal, el botón llamado “Legislación vigente”, nos permite acceder a la legislación relacionada con la seguridad y la salud relativas a la exposición de los trabajadores a las vibraciones.

Al pulsar este botón se abrirá un menú con tres opciones:

- UNE: directiva europea sobre las vibraciones.
- Real Decreto: normativa española basada en la directiva europea anterior.
- ISO: norma internacional ISO 2631-1 sobre la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero.



Figura 66 Pantalla con el menú de información sobre legislación

Finalmente, el botón de “Ayuda” permite al usuario obtener información de cómo se usa la aplicación en la propia aplicación.

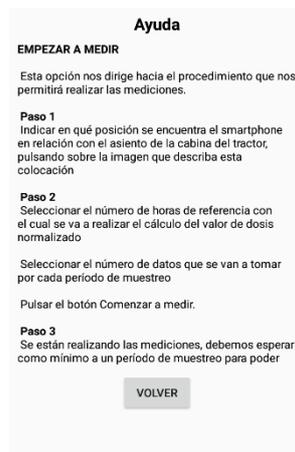


Figura 67 Pantalla con la ayuda sobre la aplicación