



Universidad de Valladolid

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Telecomunicación (Valladolid)

Grado de Ingeniería en Tecnologías de
Telecomunicación

**Desarrollo y evaluación de una App
Android para la medida de dosis de
vibraciones en tractores**

Alumna: Blanca Lendoiro Valle

Tutores: Jaime Gómez Gil

Fco. Javier Gómez Gil

DESCRIPCIÓN DEL TFG

TITULO: Desarrollo y evaluación de una App Android para la medida de dosis de vibraciones en tractores

AUTOR: Blanca Lendoiro Valle

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: Jaime Gómez Gil

VOCAL: Javier Manuel Aguiar Pérez

SECRETARIO: Juan Blas Prieto

SUPLENTE: Alonso Alonso Alonso

FECHA DE LECTURA:

CALIFICACIÓN:

Resumen

Las vibraciones a las que un trabajador se ve sometido al utilizar maquinaria agrícola deben verse limitadas para salvaguardar la salud y proteger la seguridad del trabajador. Para ello, la cantidad de vibraciones que recibe cada trabajador es regulada tanto por el Real Decreto 1311/2005 del Instituto Nacional de Salud e Higiene en el Trabajo dentro de la Legislación española, que se basa en la Directiva 2002/44/CE del Parlamento Europeo.

Actualmente se han puesto en el mercado dispositivos electrónicos que miden las vibraciones acumuladas que un tractorista recibe a lo largo de una jornada de trabajo. Estos dispositivos van a requerir un hardware propio que tome los datos que caracterizan a las vibraciones y que, tras realizar los cálculos oportunos, muestre la dosis acumulada de vibraciones recibidas por el trabajador.

En la actualidad, los dispositivos más utilizados en nuestro día a día, son los *smartphones* o móviles inteligentes que nos permiten no solo comunicarnos telefónicamente con otras personas, sino añadir a estos dispositivos multitud de utilidades en el ámbito profesional, de ocio o familiar. Por ello, si conseguimos aprovechar al máximo el hardware que nos ofrecen los *smartphones*, podremos incluir en ellos aplicaciones móviles que sean capaces de realizar las mismas funciones que otros dispositivos que se dediquen exclusivamente a una tarea concreta. Con todo ello podremos conseguir un mayor ahorro tanto energético, al utilizar un mismo hardware para la realización de distintas tareas, como económico, ya que le va a permitir al usuario conseguir los mismos resultados utilizando un dispositivo que ya tenía anteriormente.

Este trabajo consiste en el desarrollo de una aplicación Android que realice la misma tarea que los nuevos dispositivos electrónicos comentados anteriormente, es decir que mida la dosis acumulada que un tractorista recibe cuando trabaja. Para realizar esta tarea se hará uso del acelerómetro que lleva incorporado el *smartphone*, así como distintos algoritmos que nos permitan llevar a cabo los cálculos pertinentes para obtener, a partir de los datos tomados por este sensor de aceleración, la dosis acumulada de vibraciones. Con este valor obtenido finalmente, podremos saber si las vibraciones recibidas por el trabajador se encuentran dentro de los límites marcados por la legislación o si, por el contrario, es necesario tomar medidas para que esto suceda.

Una vez desarrollada la aplicación, ésta se pone a prueba para evaluar su funcionamiento y, en su caso, realizar las calibraciones necesarias para asegurar la veracidad de los datos mostrados al trabajador en la aplicación.

Finalmente, se valorarán los aspectos a mejorar de esta aplicación, que hagan mejor y más fácil este trabajo a los que se dedican a ello, fomentando así, el respeto a la legislación vigente que vela por el bienestar del trabajador.

Palabras clave: Dosis de vibraciones, vibraciones de cuerpo entero, Android, acelerómetro, sensores, aplicación de medida de vibraciones, *smartphone*, salud, MATLAB.

Abstract

The vibrations to which a worker is subjected when using agricultural machinery must be limited to safeguard the health and protect the safety of the worker. To this end, the amount of vibrations received by each worker is regulated both by Royal Decree 1311/2005 of the National Institute of Occupational Health and Hygiene within Spanish legislation, which is based on Directive 2002/44 / EC of the European Parliament.

Nowadays, some electronic devices which measure the accumulated vibrations that a tractor driver receive during his work day, have been placed on the market. Those devices are requiring their own hardware which is able to take the vibration data and to show the vibration dose value, After making the appropriate calculations.

Currently, most frequently used devices are the smartphones, which allow us, not only to communicate by phone, but to add to those terminals lots of utilities in the professional, leisure or familiar field. For this reason if we can take the maximum advantage of the smartphone's hardware, we can include in them, mobile applications that are able to perform the same functions as other devices that are exclusively dedicated to a specific task. If we get it we can achieve both greater energy savings using the same hardware to perform different tasks, and grater economic saving, allowing the user to obtain the same results using a device that already had previously.

This project consists of the development of an Android application that performs the same task as the new electronic devices mentioned above, that is to say, those devices which measures the accumulated vibration dose that a tractor worker receives when it works. In order to perform this task we will use the accelerometer that the smartphone include, as well as different algorithms that allow us to carry out the relevant calculations to obtain, from the data taken by this acceleration sensor, the vibration dose value. With this value obtained, we can know if the vibrations received by the worker are within the limits set by the legislation or if, on the contrary, it is necessary to take measures to make this happen.

Once the application is developed, it is tested to evaluate its operation and, if necessary, to perform the necessary calibrations to ensure the accuracy of the data displayed to the worker in the application.

Finally, the aspects to be improved of this application will be evaluated. Those improvements will make this work better and easier for those who dedicate themselves to it, promoting respect for the current legislation that ensures the welfare of the worker.

Keywords: vibrations dose, whole-body vibrations, Android, Accelerometer, sensor, application of vibration measurement, smartphone, health, welfare, MATLAB

Agradecimientos

Este Trabajo de Fin de Grado no habría sido posible sin todas las personas que están a mi lado en mi día a día y que para mí suponen un apoyo incondicional en mi vida tanto personal como profesional.

Por eso quería agradecer a los tutores de este proyecto pero todo lo que me han enseñado y todos los materiales que han puesto a mi disposición para la realización de todas las investigaciones y experimentos llevados a cabo en este tiempo.

A mi padre y a mi tío Nacho, que me han dado fuerzas desde allí arriba en los momentos difíciles, y a los que siempre he tenido presentes.

A mi madre por haberme dado ánimos siempre que los he necesitado, por haber soportado mis preocupaciones y tensiones y por ser mi ejemplo a seguir. Gracias por ser la mejor madre del mundo.

A mi hermana por ser mi apoyo, por entenderme sin decir una palabra, por hacer reír tanto y por hacerme sentir especial. Gracias también por haberme ayudado en este Trabajo de Fin de Grado con sus consejos profesionales en lo relacionado con la prevención de riesgos laborales.

A Jorge, mi compañero de vida, por entenderme, por sacarme una sonrisa todos los días, por hacer que los problemas dejen de ser problemas y por haber estado siempre a mi lado compartiéndolo todo. Siempre. Gracias por alegrarme todos los días y ayudarme a cumplir mis sueños.

A Mariaje, por ser un ejemplo de superación que me ha enseñado cómo seguir adelante sin perder la sonrisa.

A Isabel, por haberme enseñado desde pequeña unos valores que no voy a olvidar nunca.

A mis compañeros de clase y muy especialmente a Andrea, por ayudarme siempre, hacer estos estudios más amenos y acogerme tantas veces, haciendo este período de mi vida mucho más divertido. ¡Gracias!

Índice

Resumen	3
Abstract	4
Agradecimientos	5
Índice	6
Índice de figuras	10
Capítulo 1. Introducción	14
1.1. Ámbito del proyecto	14
1.2. Objetivos	15
1.3. Fases y métodos	16
1.4. Organización de la memoria	16
Capítulo 2. Estudio de las tecnologías relacionadas	18
2.1. Las vibraciones y su medición.....	18
2.1.1. Tipos de vibraciones.....	18
2.1.2. Medición de la vibración	19
2.1.3. Equipos de medida de las vibraciones.....	20
2.1.4. Conclusiones.....	23
2.2. Sistemas de suspensión en tractores	24
2.2.1. Suspensión del asiento del operario.....	24
2.2.2. Suspensión de la cabina del vehículo	26
2.2.3. Suspensión en los ejes del vehículo.....	27
2.2.4. Suspensión del enganche.....	28
2.2.5. Conclusiones.....	28
2.3. Efectos en la salud de la exposición a vibraciones	29
2.3.1. Factores que influyen en las vibraciones	29
2.3.2. Evaluando los niveles de vibración de cuerpo entero.....	30
2.3.3. Efectos negativos de las vibraciones en la salud	31
2.3.4. Conclusiones.....	35
2.4. Prevención y legislación en el campo de las vibraciones	36
2.4.1. Medidas de prevención.....	36
2.4.2. Legislación sobre vibraciones	39
2.4.3. Conclusiones.....	41
2.5. Android y los dispositivos móviles.....	42
2.5.1. Historia de Android y estado actual en el mercado	42
2.5.2. Arquitectura de Android.....	43
2.5.3. Conclusiones.....	44

2.6. Aplicaciones en Android para la medición de vibraciones.....	45
2.6.1. Vibrations Analysis	45
2.6.2. Vibrations	46
2.6.3. Vibrometer.....	47
2.6.4. VibSensor	47
2.6.5. Physics Toolbox Accelerometer	48
2.6.6. Conclusiones.....	49
Capítulo 3. Materiales.....	50
3.1. Smartphone Samsung Galaxy Core GT-i8210.....	50
3.2. Smartphone Samsung Galaxy Core II.....	51
3.3. Smartphone Asus Zenfone Max ZC550kl	53
3.4. Banco de <i>squeak & rattle</i>	55
3.4.1. Excitador SILVER y brazo vibrador	55
3.4.2. Acelerómetros instalados.....	56
3.4.2.1 Acelerómetros de realimentación.....	56
3.4.2.2 Acelerómetros de medida de vibraciones.....	57
3.5. Hardware de adquisición de datos National Instruments.....	59
3.6. Software propio del banco <i>squeak & rattle</i>	60
3.6.1. Sine Vibration Control.....	60
3.6.2. Random Vibration Control	62
3.7. Software <i>Signal Express</i> de <i>National Instruments</i>	63
3.8. Software Android Studio	65
3.9. Software MATLAB usado para el procesado de los datos	67
3.10. Tractor New Holland TM 190	68
3.11. Conclusiones.....	69
Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación.....	70
4.1. Requisitos del dispositivo móvil.....	70
4.2. Estructura de la aplicación	70
4.3. La adquisición de los datos	70
4.3.1. Sensores de Android.....	71
4.3.2. Implementación en la aplicación desarrollada.....	72
4.3.3. Tasa de adquisición de datos	73
4.4. Tratamiento de los datos	76
4.4.1. Cálculo de la FFT	76
4.4.1.1 Fundamentación Teórica	77
4.4.1.2 Implementación en la aplicación desarrollada	79
4.4.2. Agrupación de la frecuencia por tercios de octava	80

4.4.2.1 Fundamentación teórica	81
4.4.2.2 Implementación en la aplicación desarrollada	82
4.4.3. Ponderación en frecuencia.....	82
4.4.3.1 Fundamentación teórica	82
4.4.3.2 Implementación en la aplicación desarrollada	84
4.4.4. Adición de los períodos de muestreo.....	85
4.4.5. Cálculo de valor de dosis diaria normalizada.....	86
4.5. Manual de usuario de la aplicación.....	87
4.5.1. Icono de la aplicación.....	87
4.5.2. Uso de la aplicación.....	88
Capítulo 5. Resultados sobre la mesa de vibraciones.....	95
5.1. Pruebas en la adquisición de datos.....	95
5.1.1. Experimento 1	95
5.1.2. Experimento 2	98
5.1.3. Experimento 3	101
5.2. Comprobación del algoritmo FFT	104
5.3. Pruebas del error por tiempo de cálculo	105
5.3.1. Distribución del tiempo cálculo.....	107
5.4. Pruebas con el banco de <i>squeak and rattle</i>	108
5.4.1. Primera prueba sinusoidal	108
5.4.2. Segunda prueba sinusoidal	112
5.4.3. Primera prueba <i>Random</i>	113
5.5. Comparación de pruebas <i>Random</i> acotadas.....	116
5.5.1. <i>Random</i> con frecuencias entre 1 Hz y 20 Hz.....	116
5.5.2. <i>Random</i> con frecuencias entre 1 Hz y 40 Hz.....	118
5.5.3. <i>Random</i> con frecuencias entre 1Hz y 80 Hz.....	119
5.5.4. Comparación de la prueba <i>Random</i> en el terminal Samsung	121
5.5.5. Comparación de la prueba <i>Random</i> en el terminal Asus.....	121
5.6. Pruebas relacionadas con el número de muestras	122
Capítulo 6. Resultados de campo	123
6.1. Instalación de equipos de medida	123
6.2. Mediciones sobre carretera	125
6.3. Mediciones sobre camino	128
6.4. Mediciones sobre terreno con rastrojos	129
6.5. Mediciones sobre terreno arado	132
6.6. Conclusiones.....	133
Conclusiones	134

Líneas futuras	138
Bibliografía	139

Índice de figuras

Ilustración 1. Direcciones de las vibraciones en una persona sentada	20
Ilustración 2. Modelo de acelerómetro.....	21
Ilustración 3. Respuesta en frecuencia de un acelerómetro.....	21
Ilustración 4. Funcionamiento de un acelerómetro piezoeléctrico cuando no está sometido a vibración (a) y cuando sí está sometido a ello (b).....	22
Ilustración 5. Esquema de un acelerómetro piezoresistivo	22
Ilustración 6. Esquema de un acelerómetro capacitivo.	23
Ilustración 7. Resorte de tensión helicoidal.....	24
Ilustración 8. Amortiguador hidráulico telescópico	25
Ilustración 9. Suspensión neumática en asiento	25
Ilustración 10. Sistema de suspensión de cabina Renault Hydrostable.....	26
Ilustración 11. Sistema de suspensión de cabina “New Holland Comfort Ride”	27
Ilustración 12. Suspensión en ambos ejes del modelo Fastrac de JBC	27
Ilustración 13. Ejemplo de la suspensión del enganche	28
Ilustración 14. Definición de los ejes de medida.....	31
Ilustración 15. Dependencia de la aceleración respecto de la frecuencia en los tres ejes	34
Ilustración 16. Dependencia de la aceleración respecto del tiempo de exposición.....	34
Ilustración 17. Ramas de actividad laboral donde se reciben más vibraciones	36
Ilustración 18. Ocupaciones laborales donde se reciben más vibraciones	37
Ilustración 19. Posición correcta (a) e incorrecta (b) del operario sobre el asiento	38
Ilustración 20. Actuaciones y medidas a realizar según los riesgos evaluados	40
Ilustración 21. Estudio de mercado de los sistemas operativos utilizados actualmente.....	43
Ilustración 22. Esquema de la arquitectura del sistema operativo Android	43
Ilustración 23. Captura del funcionamiento de Vibrations Analysis en su opción gráfica	45
Ilustración 24. Captura del funcionamiento de Vibrations Analysis a través de sus parámetros	45
Ilustración 25. Captura del funcionamiento de Vibrations.....	46
Ilustración 26. Captura del funcionamiento de Vibrometer	47
Ilustración 27. Captura del funcionamiento de VibSense	48
Ilustración 28. Captura del funcionamiento de Physics Toolbox Accelerometer	48
Ilustración 29. Smartphone Samsung Galaxy Core GT-i8210.....	50
Ilustración 30. Smartphone Samsung Galaxy Core II.....	53
Ilustración 31. Smartphone Asus Zenfone Max ZC550KL.....	54
Ilustración 32. Brazo vibrante del banco Ilustración 33. Excitador Energy SILVER.....	55
Ilustración 34. Sensibilidad del acelerómetro PCB 333B40 según su montaje	56
Ilustración 35. Instalación del montaje del acelerómetro PCB 333B40.....	57
Ilustración 36. Estructura interna del acelerómetro B&K 4507	58

Ilustración 37. Instalación de los acelerómetros B&K 4507 de medición	58
Ilustración 38. Estructura de un sistema DAQ	59
Ilustración 39. Sistema NI cDAQ 9172	59
Ilustración 40. Conexión de los cables de los acelerómetros (3 ejes) con el módulo de serie C NI 9234.....	60
Ilustración 41. Sine Vibration Control. Tabla de parámetros que definen el perfil del experimento	61
Ilustración 42. Sine Vibration Control. Gráfica del perfil del experimento	62
Ilustración 43. Random Vibration Control. Tabla de parámetros que definen el perfil del experimento.....	63
Ilustración 44. Random Vibration Control. Gráfica del perfil del experimento.....	63
Ilustración 45. Captura de pantalla del funcionamiento de NI SignalExpress	64
Ilustración 46. Estructura de datos TDMS Ilustración 47. Ejemplo de exportación de datos en	65
Ilustración 48. Software Android Studio para el desarrollo de aplicaciones en Android	65
Ilustración 49. Interfaz de usuario Android Studio	66
Ilustración 50. Herramienta de software MATLAB para procesamiento de datos	67
Ilustración 51. Ejemplo de funcionamiento del entorno de programación de MATLAB	68
Ilustración 52. Vehículo New Holland TM 190 durante la realización de las pruebas de campo	69
Ilustración 53. Ejes de medida de la vibración del dispositivo	71
Ilustración 54. Ejemplo de señal en frecuencia muestreada sin aliasing.....	74
Ilustración 55. Ejemplo de señal en frecuencia muestreada con aliasing.....	74
Ilustración 56. Frecuencias de muestreo máximas de varios dispositivos móviles.....	75
Ilustración 57. Procedimiento de cálculo a seguir para llegar a la medida final	76
Ilustración 58. Esquema del significado de la Transformada de Fourier en una señal	77
Ilustración 59. Tabla de frecuencias en tercios de octava	81
Ilustración 60. Gráfica de la ponderación en frecuencia	83
Ilustración 61. Coeficientes de ponderación en frecuencia.....	84
Ilustración 107. Icono de la aplicación.....	88
Ilustración 108. Pantalla de bienvenida.....	88
Ilustración 109. Pantalla de elección de posición respecto al asiento del tractor.....	89
Ilustración 110. Pantalla de elección del número de horas de referencia.....	89
Ilustración 111. Pantalla mostrada durante la toma de datos	90
Ilustración 112. Pantalla con los resultados finales de la medición	90
Ilustración 113. Pantalla de resultados finales	91
Ilustración 114. Ventana emergente de guardado de ficheros.....	92
Ilustración 115. Petición de permiso de almacenamiento al usuario.....	92
Ilustración 116. Mensaje emergente que indica que los datos se han guardado correctamente..	92

Ilustración 117. Pantalla con el menú de información sobre legislación	93
Ilustración 118. Pantalla con la información del Real Decreto de la legislación española sobre las vibraciones	93
Ilustración 119. Pantalla con la ayuda sobre la aplicación	94
Ilustración 62. Comparación de los valores obtenidos con la app Physics Toolbox en dos smartphones distintos, para los ejes x e y.....	96
Ilustración 63. Comparación de los valores obtenidos con la app Physics Toolbox en dos smartphones distintos, para el eje z.....	96
Ilustración 64. Comparación del espectro de la señal para dos smartphones distintos, para los ejes x e y	97
Ilustración 65. Comparación del espectro de la señal para dos smartphones distintos, para el eje z	98
Ilustración 66. Comparación de los valores obtenidos con ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core II, para los ejes x e y	99
Ilustración 67. Comparación de los valores obtenidos con ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core II, para el eje z.....	100
Ilustración 68. Comparación del espectro de la señal usando ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core II, para el eje x y el eje y.....	100
Ilustración 69. Comparación del espectro de la señal usando ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core II, para el eje z.....	101
Ilustración 70. Comparación de los valores obtenidos con ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core GT i-8260, para el eje x y el eje y.....	102
Ilustración 71. Comparación de los valores obtenidos con ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core GT i-8260, para el eje z.....	102
Ilustración 72. Comparación del espectro de la señal usando ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core GT i-8260, para el eje x y el eje y.....	103
Ilustración 73. Comparación del espectro de la señal usando ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core GT i-8260, para el eje z.....	103
Ilustración 74. Comparación de los valores en frecuencias calculados con MATLAB y en la aplicación desarrollada y error del algoritmo implementado	105
Ilustración 75. Gráfico de distribución de tiempo de cálculo.....	108
Ilustración 76. Parámetros del experimento sinusoidal realizado con el brazo vibratorio	110
Ilustración 77. Comparación de los valores de aceleración con los acelerómetros y los dos smartphones en el primer experimento sinusoidal	111
Ilustración 78. Error relativo de los resultados obtenidos en el primer experimento sinusoidal.....	112
Ilustración 79. Comparación de los valores de aceleración con los acelerómetros y los dos smartphones en el segundo experimento sinusoidal.....	112
Ilustración 80. Error relativo de los resultados obtenidos en el segundo experimento sinusoidal	113
Ilustración 81. Perfil del experimento de vibración aleatoria. Primera parte	114
Ilustración 82. Perfil del experimento de vibración aleatoria. Segunda parte.....	114
Ilustración 83. Comparación de los valores de aceleración con los acelerómetros y los dos smartphones en el experimento de vibración aleatoria	115

Ilustración 84. Error relativo de los resultados obtenidos en el experimento de vibración aleatoria	115
Ilustración 85. Comparación de los valores de aceleración en el experimento Random de entre 1Hz y 20 Hz	117
Ilustración 86. Error relativo de los resultados obtenidos en el experimento de vibración aleatoria de entre 1 Hz y 20 Hz.....	117
Ilustración 87. Comparación de los valores de aceleración en el experimento Random de entre 1Hz y 40 Hz	118
Ilustración 88. Error relativo de los resultados obtenidos en el experimento de vibración aleatoria de entre 1 Hz y 40 Hz.....	119
Ilustración 89. Comparación de los valores de aceleración en el experimento Random de entre 1Hz y 80 Hz	120
Ilustración 90. Error relativo de los resultados obtenidos en el experimento de vibración aleatoria de entre 1 Hz y 80 Hz.....	120
Ilustración 91. Comparación del error relativo del terminal Samsung en los barridos de frecuencia acotados.....	121
Ilustración 92. Comparación del error relativo del terminal Asus en los barridos de frecuencia acotados.....	121
Ilustración 93. Comparación de los valores relativos de los dos terminales para los distintos número de muestras.....	122
Ilustración 94. Instalación del sistema de adquisición de datos sobre el tractor	123
Ilustración 95. Ampliación de la colocación de los smartphones y de los acelerómetros.....	124
Ilustración 96. Colocación de los equipos de medida en la cabina del tractor	124
Ilustración 97. Carretera, primer terreno donde se realizan las pruebas de campo	125
Ilustración 98. Error relativo en las pruebas por carretera en el eje Y	126
Ilustración 99. Error relativo en las pruebas por carretera en el eje X	127
Ilustración 100. Error relativo en las pruebas por carretera en el eje Z.....	127
Ilustración 101. Camino, segundo terreno donde se realizan las pruebas de campo.....	128
Ilustración 102. Rastrojos, tercer terreno donde se realizan las pruebas de campo	129
Ilustración 103. Error relativo en las pruebas sobre rastrojo en el eje Y.....	130
Ilustración 104. Error relativo en las pruebas sobre rastrojo en el eje X.....	131
Ilustración 105. Error relativo en las pruebas sobre rastrojo en el eje Z.....	131
Ilustración 106. Terreno arado, cuarto terreno donde se realizan las pruebas de campo	132

Capítulo 1. Introducción

Las vibraciones de cuerpo entero, cuando superan un determinado umbral, pueden provocar alteraciones en la salud de los trabajadores o reducir el confort con el que desarrollan sus tareas, por lo que este tema, se considera de gran importancia a la hora de diseñar la maquinaria agrícola, que manejan los agricultores en las tareas de campo. Esta es la razón por la que la legislación que protege la salud de los trabajadores tiene muy en cuenta la ergonomía, que es el conjunto de conocimientos científicos aplicados para que el trabajo y los sistemas se adapten a las capacidades y limitaciones de la persona, para establecer los límites de las dosis de vibración permitidas. Una vez establecidos estos estándares, es necesario contar con herramientas que nos permitan conocer esa dosis de vibración con la suficiente fiabilidad como para usarlos en la realidad garantizando la salud de los operarios.

1.1. Ámbito del proyecto

En la actualidad, los dispositivos utilizados en maquinaria agrícola para la medición de dosis de vibraciones, son dispositivos con hardware de adquisición de datos propios y cuya única finalidad es el cálculo de la dosis de vibraciones acumuladas, tales como el dispositivo llamado Grammer Vibrocontrol vibration dosimeter, que se encuentra acoplado al asiento del tractorista, midiendo las vibraciones a lo largo de una jornada de trabajo.

También existe otros sistemas como el dispositivo denominado Human Vibration Analyzer, de la marca Brüel & Kjaer, que es un sistema portátil diseñado para aquellos que trabajan con las vibraciones sobre los humanos y que pretenden medirlas, cuando se requieren unos resultados con una buena fiabilidad y que sean interpretados según la Directiva 2002/44/EC del Parlamento Europeo.

En este caso no mide únicamente las vibraciones de cuerpo entero, sino también las vibraciones del tipo mano-brazo y al adquirirlo también se incluyen un software específico para este sistema que nos permite registrar, analizar, manipular e interpretar los datos obtenidos por el dispositivo. A este sistema hay que acoplarle los acelerómetros específicos, según el tipo de vibraciones que vayamos a medir.

Como se puede ver, ambos son dispositivos muy específicos para esta utilidad. Actualmente en nuestra vida diaria, los terminales que más frecuentemente se utilizan a diario, son los *smartphones*, que cada vez incluyen un mayor número de utilidades.

Hoy en día, existen una gran cantidad de aplicaciones disponibles en las tiendas online, con todo tipo de herramientas que pretenden entretener o hacer la vida más fácil a los usuarios. Estos terminales incorporan un número creciente de sensores, siendo el acelerómetro, uno de los primeros que se incorporaron a los primeros móviles inteligentes.

En este proyecto, se pretende unificar las dos ideas anteriores, es decir, conseguir medir y posteriormente calcular el valor normalizado de la dosis de vibración en referencia a un tiempo de ocho horas, sin tener que utilizar un dispositivo específico para este fin, sino sacando el máximo provecho al hardware del *smartphone*. De esta forma, sería mucho más accesible la medida de estas vibraciones, puesto que supondría un ahorro económico y, además, al ser más alcanzable permitiría fomentar la medida de estas vibraciones para que los trabajadores agrícolas puedan conocer hasta qué punto las vibraciones a las que se están sometiendo puedan afectar o no a su salud.

Para llegar a este objetivo se pretende tomar los datos a través del acelerómetro de Android, para a continuación realizar los cálculos descritos en la norma UNE-ISO 2631-1 de julio de 2008 y llegar al resultado final del valor normalizado de la dosis de vibración en referencia a un tiempo de ocho horas.

Finalmente se interpretarán los resultados obtenidos para saber si se encuentran dentro de los estándares de vibración regulados por la legislación española, concretamente en el Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la 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 Proyecto de Fin de Grado consiste en desarrollar una aplicación en Android que mida la dosis acumulada que un tractorista recibe cuando trabaja en un tractor agrícola. Esta aplicación se ejecutará en un teléfono móvil y hará uso de su acelerómetro.

Los objetivos secundarios que se persiguen en este Proyecto de Fin de Grado son:

- Conocer el estado del arte sobre las tecnologías relacionadas con el proyecto, tales como:
 - Estudiar artículos sobre la definición, el análisis y la medida de las vibraciones
 - Conocer los tipos de dispositivos capaces de medir las vibraciones, diferenciando los distintos tipos de acelerómetros.
 - Realizar una revisión sobre los sistemas de suspensión que se han instalado en los últimos tiempos en maquinaria agrícola y como se ha llegado hasta los sistemas actuales
 - Realizar una revisión sobre las posibles alteraciones en la salud que los trabajadores pueden sufrir tras una exposición alta a las vibraciones de cuerpo entero
 - Adquirir los conocimientos suficientes sobre la normativa de vibraciones en la Unión Europea y el Real Decreto de la legislación española basado en la directiva europea anterior.
 - Conocer qué medidas de prevención deben tomar los trabajadores expuestos a vibraciones agrícolas y cuáles están en manos de los diseñadores de tractores y de sus sistemas de suspensión.
 - Conocer tanto la historia como la arquitectura del sistema operativo de Android, sobre el que se desarrollará la aplicación
 - Conocer el funcionamiento de aquellas aplicaciones que están en el mercado, cuyo objetivo es la medición de las vibraciones.
- Aprender a desarrollar una aplicación en Android, con el entorno de desarrollo integrado Android Studio
- Aprender cómo adquirir datos de aceleración a través de los sensores del *smartphone*.
- Realizar los cálculos oportunos para llegar a valores de referencia tomados por la legislación y compararlos con los límites establecidos en ella.
- Conocer las características y el funcionamiento de los distintos terminales que se utilizaran para realizar las pruebas de la aplicación
- Obtención de un software en MATLAB para el tratamiento de los datos obtenidos a partir de la aplicación
- Conseguir el desarrollo de una aplicación con una alta usabilidad y fácil de utilizar e interpretar.
- Realizar las pruebas pertinentes para validar los resultados de la aplicación.

- Calibrar la aplicación para diferentes *smartphones* empleando un conjunto de señales generadas por ordenador y mediante simuladores de vibraciones.
- Evaluar -los resultados finales de la aplicación en simuladores de vibraciones.
- Familiarizarse con la redacción de artículos científicos para plasmar dichos conocimientos sobre 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 analítico de las vibraciones que influyen sobre el operario.
2. Estudio del estado del arte de las tecnologías relacionadas con las vibraciones que afectan a los conductores de tractores.
3. Adquisición de los conocimientos necesarios para saber desarrollar una aplicación en Android, haciendo los primeros ensayos necesarios, con aplicaciones de prueba.
4. Estudio del funcionamiento de los distintos sensores incorporados en los *smartphones* y sobre cómo exportar los datos adquiridos a través de dichos sensores.
5. Desarrollo de la aplicación cuya finalidad específica es la medición de la dosis acumulada que un tractorista recibe cuando trabaja en un tractor agrícola.
6. Exportación de los datos adquiridos de aceleración tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, en la aplicación desarrollada y en la aplicación Physics Toolbox Accelerometer, que también permite exportar este tipo de datos.
7. Diseño de software en MATLAB para la comparación de los datos exportados por ambas aplicaciones en ambos dominios.
8. Realización de pruebas con hardware y software específico para la validación de la aplicación.
9. Obtención de las conclusiones finales del proyecto.
10. Obtención de las líneas futuras de mejoras en la aplicación.

1.4. Organización de la memoria

La presente memoria se ha estructurado en 6 capítulos:

El Capítulo 1 constituye una introducción a este Proyecto de Fin de Grado, estableciendo sus objetivos principales, así como sus fases y métodos y el ámbito en el que se desarrolla.

El Capítulo 2 realiza un estudio de todas aquellas tecnologías que están relacionadas con el desarrollo de esta aplicación, desde la arquitectura del sistema operativo Android y las aplicaciones que se dedican a la medición de vibraciones, pasando por la definición de las vibraciones y los sistemas de suspensión que hacen que éstas se reduzcan sobre los tractores, así como como los posibles efectos nocivos de las vibraciones en la salud y las medidas de prevención y legislación relacionada con este tema

En el Capítulo 3 se realiza un análisis de los materiales utilizados explicando tanto las herramientas software utilizadas para el desarrollo de la aplicación como para la evaluación de la misma y los dispositivos hardware y máquinas con los que se han llevado a cabo los experimentos descritos en esta memoria.

En el Capítulo 4 se explica la metodología llevada a cabo a la hora de desarrollar esta aplicación exponiendo la fundamentación teórica de cada paso del proceso de desarrollo y su implementación en el código.

El Capítulo 5 recogerá los resultados de los experimentos realizados en la mesa de vibraciones, obteniendo las conclusiones oportunas en cada una de las pruebas y razonando las decisiones tomadas en ciertos puntos del desarrollo de la aplicación.

Finalmente el Capítulo 6 realizará un análisis de los resultados obtenidos en los experimentos de campo, es decir, en aquellas pruebas que se realizaron sobre un tractor. Con ello ha sido posible comparar los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y en las pruebas en un ámbito más realista.

Capítulo 2. Estudio de las tecnologías relacionadas

En este capítulo se explicarán todas aquellas tecnologías relacionadas con el desarrollo de la aplicación y las consecuencias de las mismas. En primer lugar se hará un análisis del concepto de las vibraciones, estudiando su significado, cómo se miden y con qué equipos se miden. Seguidamente se revisarán los sistemas de suspensión con los que cuentan los tractores actualmente para reducir las vibraciones. A continuación, se explicarán las consecuencias nocivas que tiene para la salud no utilizar estos sistemas de reducción de dosis de vibraciones, así como los factores que influyen en la variación de los niveles de vibración, para luego explicar qué medidas de prevención deben tomar los trabajadores expuestos y cómo se reflejan éstas en la legislación vigente. Para terminar el capítulo se hablará sobre el sistema operativo de Android, sobre el que se basa esta aplicación, explicando cómo se estructura su arquitectura y cuál es su estado actual en el mercado respecto a otros sistemas operativos.

2.1. Las vibraciones y su medición

En este punto se analizará el concepto de las vibraciones, repasando los tipos existentes, así como las distintas magnitudes que se pueden medir de las vibraciones. Finalmente, se analizarán los equipos de medida de las vibraciones, los acelerómetros, especificando los distintos procedimientos que se llevan a cabo en ellos para obtener los niveles de vibración

La vibración es la variación de un sistema en relación al tiempo, en torno a una posición de equilibrio estable. [1] Su característica fundamental es la periodicidad, siendo frecuente el movimiento armónico simple, por ello, el estudio de las vibraciones está relacionado con el movimiento oscilatorio de los cuerpos y sus fuerzas asociadas. Todo cuerpo que posea masa y elasticidad tienen la capacidad de vibrar.

La mayoría de máquinas experimentan vibraciones en diferentes medidas y al estudiar el movimiento oscilatorio de las máquinas, hay que tener en cuenta el efecto que puede tener las oscilaciones sobre él, aunque, en general, se suponen vibraciones de pequeña amplitud.

Los sistemas oscilatorios pueden ser lineales o no lineales. Para los sistemas lineales, se utiliza el principio de superposición de las fuerzas que dice que el efecto que produce un conjunto de fuerzas que actúan de forma simultánea equivale a la suma de los efectos que producen cada una de las fuerzas analizadas individualmente. Por otra parte, el análisis de sistemas no lineales es más complejo, aunque aún así, es necesario su estudio, puesto que todos los sistemas al incrementar su amplitud, tienden a perder su linealidad paulatinamente.

2.1.1. Tipos de vibraciones

Podemos clasificar las vibraciones en dos clases fundamentales:

- Vibraciones libres: tienen lugar cuando el sistema oscila como resultado de las fuerzas intrínsecas del propio sistema, estando las fuerzas externas ausentes en el sistema
- Vibraciones forzadas: tienen lugar cuando existen fuerzas externas directamente aplicadas al sistema a lo largo del tiempo, además de fuerzas internas

Además debemos tener en cuenta la amortiguación a la que estén sometidos los sistemas ya que la energía se disipará debida a las resistencias existentes y a la fricción. Cuando estudiamos las vibraciones, es muy importante la frecuencia de resonancia de los sistemas, que se define como la frecuencia característica de un cuerpo a la que se alcanza el máximo grado de oscilación. [2]

Si la amortiguación es pequeña, sus efectos pueden tener una ligera influencia en el cálculo de la frecuencia de resonancia del sistema, puesto que, anteriormente, han sido calculadas sin tener en cuenta la amortiguación.

Por otra parte la amortiguación es un factor muy importante a la hora de limitar la amplitud de la oscilación en la frecuencia de resonancia.

El concepto de grados de libertad también es determinante en lo que se refiere al estudio de vibraciones. Podemos definir los grados de libertad como el número de coordenadas independientes necesarias para describir el movimiento de un sistema.

2.1.2. Medición de la vibración

Los movimientos oscilatorios se caracterizan por el desplazamiento de un sistema con una determinada velocidad en una dirección concreta y, a continuación, el desplazamiento de este sistema con una determinada velocidad, pero esta vez en la dirección opuesta. [3] Este cambio de velocidad produce una aceleración no nula constante en una dirección y después en la dirección opuesta.

Las vibraciones pueden cuantificarse en función de su desplazamiento, velocidad o aceleración.

Aceleración

Con frecuencia, la magnitud de la vibración se expresa como el valor promedio de la aceleración del movimiento oscilatorio, normalmente el valor cuadrático medio o valor eficaz. En ocasiones, dependiendo de su magnitud, se puede utilizar la escala logarítmica, de forma que la aceleración se calcula de la siguiente forma:

$$a_{dB} = 20 \cdot \log \frac{a}{a_0}$$

Siendo $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$ el nivel de referencia utilizado frecuentemente aunque puede variar en algunos países.

Frecuencia

La frecuencia de vibración se mide en hertzios (Hz) y afecta a la extensión con las que se transmite la vibración, a la extensión con que se transmiten a través del cuerpo y al efecto de las vibraciones en el cuerpo. El desplazamiento y la aceleración se relacionan entre sí mediante la frecuencia con la siguiente ecuación:

$$a = (2\pi f)^2 \cdot d$$

La frecuencia de una vibración se puede apreciar de forma más clara en los espectros de la vibración, aunque es posible que éstos sean complejos y, por lo tanto, encontraremos algo de movimiento en todas las frecuencias. Sin embargo, suele haber picos en aquellas frecuencias donde la vibración es mayor.

Debemos tener en cuenta que cualquier estructura, como son las partes del cuerpo humano, amplían la intensidad de una vibración cuando la frecuencia de la vibración es la frecuencia de resonancia de dicha estructura receptora de la vibración. Esto hace que debemos tener especial cuidado con estas frecuencias propias de las diferentes partes de nuestro cuerpo ya que pueden dar lugar a efectos nocivos al estar sometidas a la vibración. Por otra parte, el propio cuerpo también ejerce una atenuación frente a la intensidad de una cierta vibración

Dirección

Las vibraciones pueden producirse en tres direcciones lineales:

- Longitudinal (Eje x)
- Lateral (Eje y)
- Vertical (Eje z)

Y en tres direcciones rotacionales

- Balanceo (Rotación alrededor del eje x , r_x)
- Cabecero (Rotación alrededor del eje y , r_y)
- Deriva (Rotación alrededor del eje z , r_z)

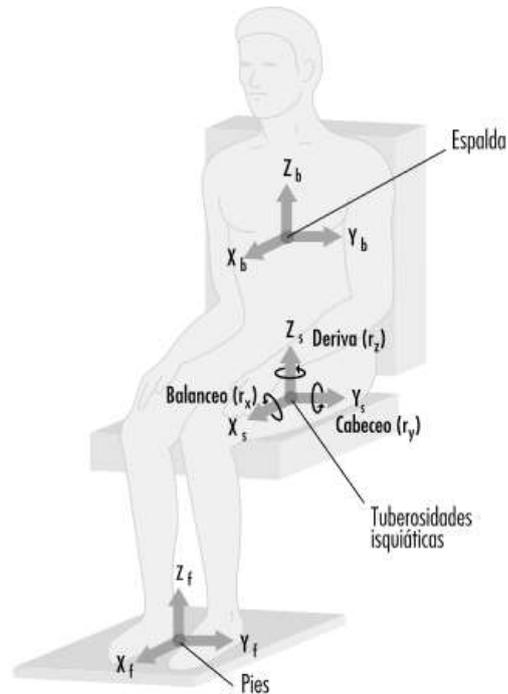


Ilustración 1. Direcciones de las vibraciones en una persona sentada

Duración

Puede ser que las características de la vibración no cambien con el tiempo, en cuyo caso el valor eficaz medido proporcionará una medición válida de la magnitud a cuantificar.

Hay que considerar que muchas exposiciones a la vibración son intermitentes y, por tanto, las características de la misma variarán, según el momento en que se midan.

La intensidad de los movimientos puede acumularse de tal forma que se le dé un peso apropiado a períodos cortos de vibración de alta magnitud y por otra parte a períodos largos de baja magnitud.

2.1.3. Equipos de medida de las vibraciones

Para la medición de vibraciones se utilizan vibrómetro, que son dispositivos compuestos por un acelerómetro, un dispositivo de tratamiento y salida de datos, y el cable de conexión entre ambos.

El acelerómetro es un dispositivo electromecánico que mide las aceleraciones a las que está sometido. Estas aceleraciones pueden ser estáticas como la constante gravitatoria o dinámicas como las aceleraciones causadas por las vibraciones.

Este dispositivo está formado por una masa inercial elásticamente unida a la carcasa del mismo de tal forma que el movimiento oscilatorio de la carcasa (x) será como el movimiento oscilatorio de la superficie, mientras que el movimiento oscilatorio de la masa (y) diferirá del de la carcasa, por ello, existirá un movimiento relativo entre la masa y la carcasa, a la misma frecuencia. [4]

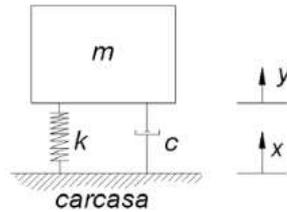


Ilustración 2. Modelo de acelerómetro

Como en todo sensor, el objetivo es obtener una señal eléctrica, normalmente una diferencia de potencial, proporcional a la magnitud a medir, en este caso la aceleración.

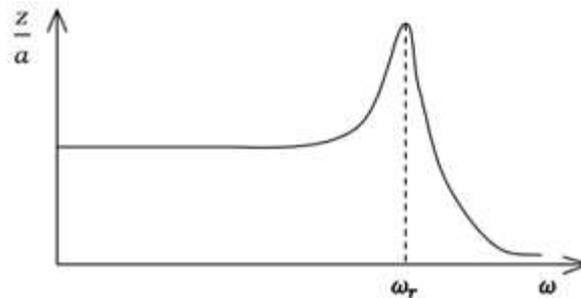


Ilustración 3. Respuesta en frecuencia de un acelerómetro

Los acelerómetros convertirán la aceleración en una diferencia de potencial, de diferentes maneras según el tipo de acelerómetro que estemos utilizando, y la relación entre el desplazamiento (z) y la aceleración (a) viene dada por la respuesta en frecuencia mostrada en la Ilustración 3.

Se puede apreciar que hay un rango de frecuencias en las cuales la relación entre el desplazamiento y la frecuencia es constante, y tiene un valor denominado sensibilidad mecánica que viene dado por

$$S_m = \frac{m}{k},$$

siendo m la masa inercial del dispositivo y k la constante elástica del muelle.

Por esta razón se delimita el rango de frecuencia hasta un máximo del 30% de la frecuencia de resonancia.

Cuanto mayor sea la sensibilidad mejor será el acelerómetro, es decir, cuanto mayor sea la masa inercial; aunque debemos tener en cuenta que no podemos utilizar una masa grande comparable a la masa del cuerpo, porque sino el acelerómetro afectaría al comportamiento vibratorio que queremos medir.

Acelerómetro piezoeléctrico

Los acelerómetros puede usar el efecto piezoeléctrico, de tal forma que el acelerómetro contiene estructuras microscópicas cristalinas que se ven deformadas por las fuerzas de aceleración generando una determinada carga, tal y como se muestra en las siguientes figuras. [5]

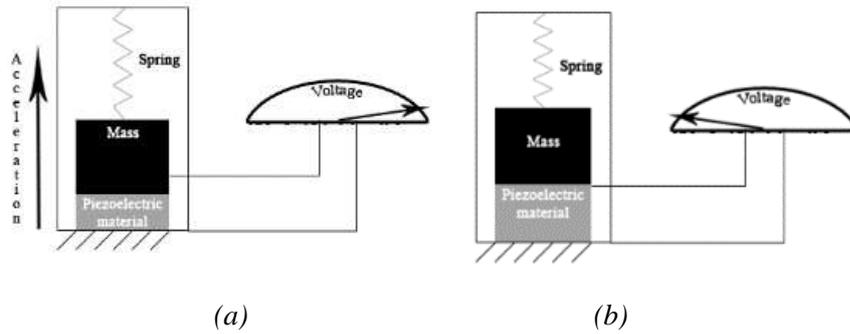


Ilustración 4. Funcionamiento de un acelerómetro piezoelectrico cuando no está sometido a vibración (a) y cuando sí está sometido a ello (b).

La relación entre la carga y el desplazamiento es constante por lo que no modificará la función de transferencia que se mostraba en el apartado anterior. Para transformar la carga en voltaje, necesitamos circuitería adicional y obtendremos un resultado que, al ser dependiente de la frecuencia, sí que modificará la función de transferencia

Acelerómetro piezoresistivo

En este caso se hace uso del efecto piezoresistivo de algunos materiales, que consiste en la variación de la resistencia del material en función de la deformación a la que esté sometido.

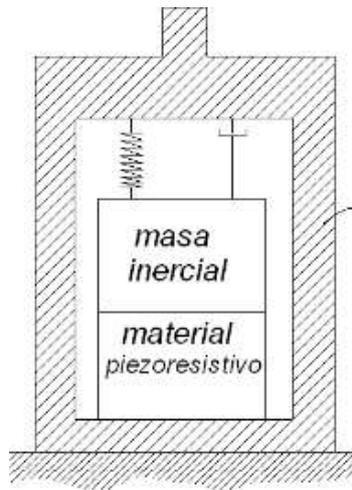


Ilustración 5. Esquema de un acelerómetro piezoresistivo

La variación de resistencia se traduce en una diferencia de potencial mediante una configuración denominada puente de Wheatstone. En este caso hay que tener en cuenta el factor de galga (K) que es la relación entre la elongación del material (ϵ) y la variación de la resistencia eléctrica. [4] Obtenemos estas ecuaciones:

$$\frac{\Delta V}{V_i} = \frac{\Delta R}{R} = \epsilon \cdot K$$

En este caso la relación entre desplazamiento o elongación de material y la variación de tensión no es dependiente de la frecuencia por lo tanto hará variar la amplitud de la función de transferencia, no así su forma. En este caso debemos tener en cuenta que el puente Wheatstone debe estar alimentado por una determinada tensión V_i , que debe ser estable para no inducir a error.

Acelerómetro capacitivo

Otra forma de implementar un acelerómetro es mediante los cambios en la capacidad de un condensador, es decir, al tener dos microestructuras próximas entre sí, con una determinada capacidad entre ellas; cualquier cambio en la distancia existente entre ambas microestructuras provocará un cambio en la capacidad. Mediante el uso de una determinada circuitería convertiremos esa capacidad en voltaje.

En este caso la conversión entre la diferencia de potencial y la distancia entre las placas es directa. Una de las placas se encuentra fija mientras que la otra placa es móvil y se mueve de la misma manera que lo hace la masa inercial.

Para ello se utiliza la siguiente estructura:

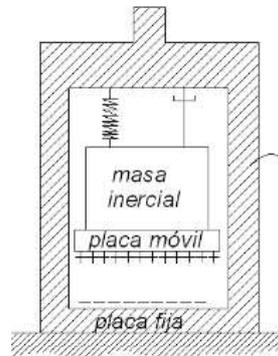


Ilustración 6. Esquema de un acelerómetro capacitivo.

El voltaje de un condensador viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$\Delta V = \frac{q}{C} \quad C = \varepsilon \cdot \frac{A}{Z} \quad \text{es decir} \quad \Delta V = \frac{q \cdot Z}{\varepsilon \cdot A}$$

Donde q es la carga eléctrica de las placas del condensador, ε es la permeabilidad del medio entre las placas y A es el área de las placas. Los acelerómetros capacitivos, permiten tener unas dimensiones muy pequeñas, por ello, se pueden fabricar en circuitos integrados para soldar en placas de silicio. Además hay que añadir un software extra que permita interpretar las señales generadas por el acelerómetro. Es por ello que Android utiliza este tipo de acelerómetros para sus dispositivos.

2.1.4. Conclusiones

Para poder entender cómo es posible hacer una medida de las vibraciones, es necesario entender lo que son y qué magnitudes las caracterizan, como se ha comentado en este punto anteriormente, haciendo especial hincapié en la frecuencia y en la aceleración, magnitudes especialmente importantes, ya que nos basamos en ellas para realizar los cálculos en las dosis de vibraciones. En este caso, debido a su importancia en la aplicación también se han definido los ejes sobre los cuales se realizan las medidas de las vibraciones de cuerpo entero, puesto que un mismo nivel de vibración tiene efectos distintos según el eje en el que nos movamos. Para finalizar se han explicado cómo funcionan los distintos tipos de acelerómetros, ya que las medidas que recojamos dependerán del tipo de acelerómetro y se podrán calibrar teniendo en cuenta los elementos que lo componen y las constantes físicas que lo caracterizan.

2.2. Sistemas de suspensión en tractores

En este punto se explicarán los distintos sistemas de suspensión con los que cuentan los tractores actualmente, empezando por los sistemas instalados en el asiento del operario, con una mayor influencia sobre las vibraciones a las que éste se ve sometido, siguiendo por los sistemas de suspensión de las cabinas y de los ejes de los vehículos, para finalmente terminar hablando de la suspensión del enganche del tractor, conociendo los distintos sistemas en orden de influencia sobre la reducción de las vibraciones a las que se expone el conductor del tractor.

Las vibraciones de cuerpo entero son la mayor fuente de incomodidad para los operarios de tractores agrícolas durante sus horas de trabajo. Las soluciones que ha propuesto la ingeniería para la reducción de este tipo de vibraciones están relacionadas con la suspensión del eje delantero del vehículo y de la cabina y han conseguido reducir significativamente los niveles de vibración.

Para ello es necesario conocer a fondo el diseño de los vehículos agrícolas. Como ya se ha comentado anteriormente, se sabe que los operarios de tractores agrícolas están expuestos a altos niveles de vibraciones de cuerpo entero durante sus horas de trabajo. Las vibraciones de baja frecuencia pueden dar lugar a la incomodidad del trabajador así como a la posible aparición de lesiones espinales. Desde que se descubrió esta relación, los vehículos agrícolas han incorporado una o más características de diseño que intentan reducir estos niveles de vibración. Esta tecnología pronto se extendió a otros vehículos agrícolas autopropulsados durante los años 70 y 80.

2.2.1. Suspensión del asiento del operario

Los asientos con suspensión se extendieron en este tipo de vehículos durante los últimos 40 años, siendo una característica obligatoria en los tractores. En primer lugar, el objetivo fue la mejora de la comodidad del trabajador y más tarde se intentó reducir su fatiga y aumentar así la productividad. [6] Estas mejoras fueron ampliamente reconocidas por los trabajadores como una inversión que merecía la pena hacer.



Ilustración 7. Resorte de tensión helicoidal

En un principio, el sistema de suspensión tenía deficiencias, pero era indiscutible que evitaba las grandes vibraciones, aunque solo proveían de suspensión en el eje vertical, utilizando principalmente resortes helicoidales de tensión (tracción) o resortes de torsión de caucho, junto con amortiguadores hidráulicos telescópicos, que hacían que el movimiento fuera solamente vertical.

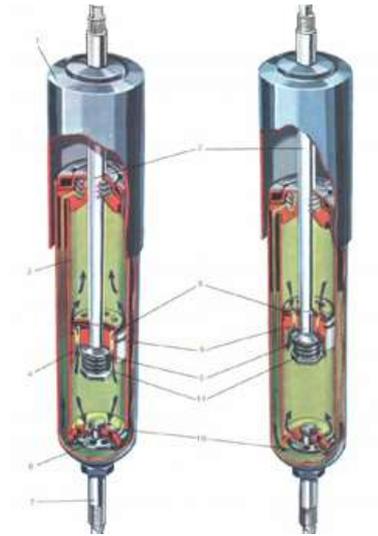


Ilustración 8. Amortiguador hidráulico telescópico

Los diseños posteriores utilizaban resortes de torsión mecánicos junto con una suspensión de tipo tijera de baja fricción, dando así un verdadero movimiento vertical y una altura ajustable. Muchos de los asientos de tractores modernos utilizan todavía este tipo de diseño, no obstante, los modelos más avanzados usan suspensión neumática que se ajustan más estrictamente al peso del operario, en lugar de la suspensión mecánica, más rudimentaria que se usaba anteriormente.

La mayoría de asientos modernos se adaptan a tractores de media o alta potencia integrando suspensión neumática y sistemas de suspensión con amortiguadores, todos ellos ajustables en el eje vertical, y resortes mecánicos y sistemas de amortiguación, todos ellos fijos, en el eje longitudinal.

Algunos fabricantes ofertan estos sistemas en el eje transversal, ya que el vaivén lateral es una fuente de las vibraciones de cuerpo entero, debido al aumento del tamaño de los tractores y al aumento de la altura del asiento respecto del centro del vehículo. Sin embargo, la anchura limitada de la cabina y la proximidad del asiento a los controles laterales, restringe los movimientos del sistema de suspensión en el eje transversal.

En 2002 el fabricante John Deere utilizó sistemas combinados de suspensión electrohidráulica y neumática, utilizando sensores electrónicos y controles electrohidráulicos de la altura, añadiendo detectores automáticos de la aceleración en el eje vertical del asiento, haciendo ajustes en el sistema de suspensión en función de los valores dados por el acelerómetro. [7]



Ilustración 9. Suspensión neumática en asiento

Esta tecnología de suspensión en asientos de tractores se ha trasladado a otro tipo de máquinas que no alcanzan los mismos niveles de vibración, aunque en aquellos vehículos más pequeños no se incluyen los asientos de suspensión por incompatibilidades del diseño.

2.2.2. Suspensión de la cabina del vehículo

El método lógico de reducir los niveles de vibración es añadir uno o varios sistemas de suspensión entre el operario y el vehículo. [6]Teniendo en cuenta los requerimientos básicos de un tractor para realizar las tareas a las que está destinado, la incorporación de un sistema de suspensión por ejes efectivo es una parte fundamental del diseño del tractor. Consecuentemente, muchos fabricantes de tractores que hayan integrado los sistemas de reducción de vibraciones, también tienen vistas a incorporar sistema de suspensión de la cabina.

Los primeros sistemas de suspensión de la cabina de los tractores fueron desarrollados como un prueba de concepto que verifica los conceptos teóricos estudiados. Una vez se han conseguido las reducciones de vibraciones sobre el operador, se desarrollaron sistemas para facilitar su incorporación en el diseño de los tractores del momento. Lamentablemente, solo unos pocos fabricantes añadieron la suspensión en cuatro puntos de la cabina, al no encajar con la demanda del mercado europeo, por ello, los fabricantes a escala mundial tampoco lo añadieron a sus modelos, con la excepción de Renault [8]. Hoy en día las principales marcas de tractores ofrecen algún tipo de sistema de suspensión de la cabina.

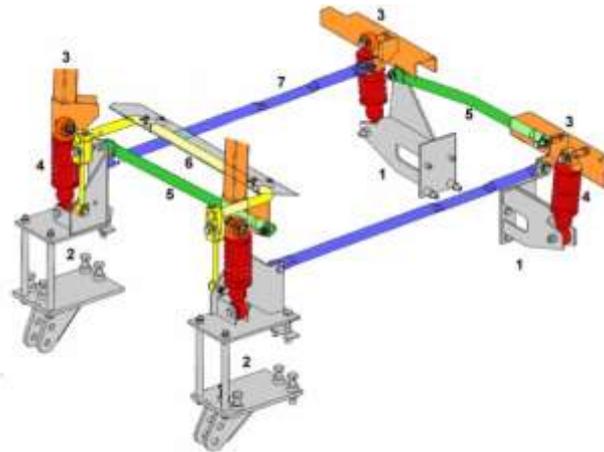


Ilustración 10. Sistema de suspensión de cabina Renault Hydrostable

El sistema de suspensión “Renault Hydrostable” fue el primer tractor con sistema de suspensión en cuatro puntos de la cabina fabricado en serie. Algunos otros fabricantes utilizaron elementos de suspensión oleoneumáticos para, de este modo, controlar la altura de la cabina con operadores de diferente peso. [6]La mayoría de fabricantes de tractores europeos optaron por un sistema de suspensión de cabina más simple donde la parte trasera de la cabina queda suspendida del eje trasero, lo que se denomina como “New Holland Comfort Ride”.



Ilustración 11. Sistema de suspensión de cabina "New Holland Comfort Ride"

2.2.3. Suspensión en los ejes del vehículo

Cuando los tractores de dos ejes motrices se hicieron populares, el eje delantero adquirió un nuevo papel en la capacidad de tracción y de dirección de estos nuevos vehículos. [6] Con esta nueva característica, aparece un nuevo problema respecto a los movimientos de balanceo, ya que se crean variaciones de carga en las ruedas delanteras, añadiendo movimientos de vaivén, sobre todo al empujar cargas muy pesadas. Este efecto de la variación de la tracción se denomina "power hop", provocando incomodidad en el trabajador y una pérdida en la eficiencia del tractor. Para solucionar este problema, se añadió la suspensión en el eje delantero, que proporciona un contacto estable entre las ruedas delanteras y la tierra. Por ello, estas nuevas características, se convirtieron en un extra muy común en los tractores de dos ejes, más aún teniendo en cuenta que las ruedas delanteras son las que dirigen el vehículo, por ello la suspensión en este eje mejoró más el manejo de la dirección en los tractores que la comodidad del trabajador.

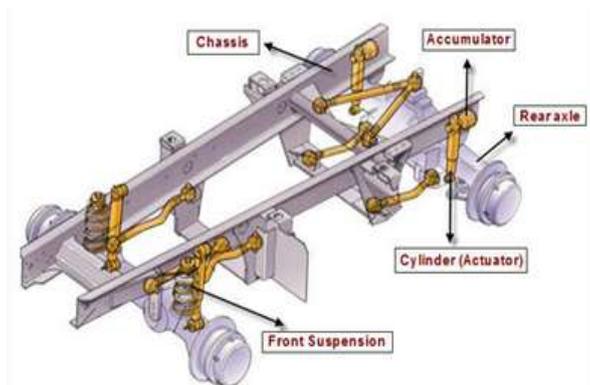


Ilustración 12. Suspensión en ambos ejes del modelo Fastrac de JCB

Los diseños más modernos de tractores intentaron alcanzar velocidades más altas, aunque la suspensión del eje delantero solo permitió llegar una velocidad limitada. Por ello, se necesitaba una suspensión completa que abarcara ambos ejes y que mejorara no solo el control de la dirección del tractor sino también la comodidad del operario que lo maneja.

La suspensión del eje delantero tiene un efecto negativo sobre la vibración del eje trasero sin suspensión, que aguanta más de la mitad de la carga del tractor. Esto hace que las ruedas traseras sufran más rebotes y que reduce el contacto de las ruedas con la superficie. Por otro lado, se sabe que la suspensión del eje delantero tiene gran influencia en la vibración longitudinal del tractor, mientras que la suspensión del eje trasero afectaba a las vibraciones en la mayoría de direcciones, especialmente en la vertical.

Muchos fabricantes de tractores vieron este tipo de suspensión como un complejo diseño que no obtendría el suficiente beneficio económico. Los sistemas de suspensión diseñados

experimentalmente como pruebas de concepto para el eje delantero fueron desarrollados por investigadores en colaboración por los principales fabricantes a escala mundial y tuvieron un éxito considerable. La mayoría de sistemas solo añadían la suspensión en el eje delantero al ser una simple modificación respecto a los tractores de un solo eje que estaban en el mercado entonces, pero la incorporación de la suspensión del eje trasero es algo más complejo debido al peso variable de los elementos propios del vehículo que se encuentran sobre este eje.

Con el lanzamiento de un vehículo llamado “Fastrac”, se consiguió un tractor que tuviera una suspensión completa en ambos ejes y que fuera capaz de realizar las tareas agrícolas y de llegar a una velocidad de hasta 65 km/h. Para ello, primero diseñó un vehículo con este tipo de suspensión y, más tarde, le añadió las funcionalidades necesarias para que actúe como un tractor. La suspensión delantera se consiguió mediante brazos radiales, resortes de presión y amortiguadores telescópicos, mientras que un sistema de suspensión hidroneumático soportaba el eje trasero.

2.2.4. Suspensión del enganche

Durante las tareas de trabajo, los tractores manejan diversos aperos que van cambiando y que, por ello, cambian el peso que le confieren al tractor, así como su influencia en el comportamiento del mismo. [7] Al añadir una herramienta al tractor las vibraciones aumentarían, reduciendo el control del tractor, especialmente durante aquellas tareas que requieran una mayor velocidad y que, por tanto, aumenten la peligrosidad del trabajo.

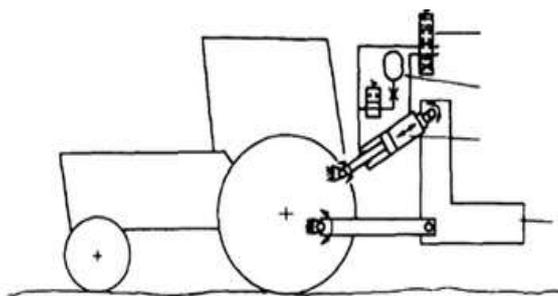


Ilustración 13. Ejemplo de la suspensión del enganche

Para reducir este efecto y controlar la vibración de la herramienta montada sobre el tractor, se puede usar un sistema de suspensión en la unión entre ésta y el tractor. Desde que estas herramientas se unen al tractor mediante una horquilla de soporte a tres puntos, este sistema se denomina “suspensión de horquilla”, siendo un sistema que utiliza una suspensión hidroneumática para la amortiguación de las vibraciones.

2.2.5. Conclusiones

Un tractor convencional sin suspensión contaría con dos únicas fuentes de absorción de vibraciones como son los neumáticos y el asiento, pero de esta manera el nivel de vibraciones provoca una gran incomodidad en los operarios. Por ello se empezó a incluir sistemas de suspensión, que absorbían las vibraciones que se transmitían directamente a la persona a través del asiento, tal y como se explica en la primera parte de este punto. Más tarde se añadieron sistemas más sofisticados de suspensión que mejoraban la reducción de las vibraciones aún más aunque su instalación era más costosa, ya que se trataba de instalarlos en la estructura del tractor concretamente en los ejes y la cabina. Finalmente se ha considerado necesario hablar del sistema de suspensión del enganche puesto que las herramientas adjuntas al tractor también son una fuente de vibraciones, aunque en menor medida y por ello también interesa reducir su impacto sobre el operario del tractor.

2.3. Efectos en la salud de la exposición a vibraciones

En este punto se va a hablar de cómo y de qué manera se ha demostrado que las vibraciones de cuerpo entero tienen unas consecuencias nocivas sobre la salud del trabajador, determinando concretamente cuáles son los efectos que tienen sobre la salud este tipo de vibraciones. Para ello, en primer lugar, se revisarán los factores que influyen en el aumento de las vibraciones en la maquinaria agrícola, para posteriormente explicar de qué manera se deben evaluar las vibraciones para poder conocer su influencia en la salud de las personas que se expongan a ellos. Finalmente se expondrán las alteraciones y enfermedades que pueden llegar a provocar las vibraciones de cuerpo entero en los distintos sistemas del cuerpo humano.

Durante el trabajo que realiza un operario en un tractor, éste recibirá unas determinadas vibraciones que tendrán una influencia negativa en la salud del trabajador. [9] Estas vibraciones están generadas por el terreno y el motor del tractor mientras se encuentra realizando las tareas agrícolas y se transmiten al cuerpo de la persona que lo conduce, de forma que si la exposición a estas vibraciones tiene lugar de forma prolongada puede provocarle serios problemas de salud. Por todo ello, medir y evaluar las vibraciones es un aspecto clave a tener en cuenta en el desarrollo de medidas de seguridad en los trabajos agrícolas.

El esfuerzo físico, las temperaturas extremas, la inhalación de diversos gases o la contaminación acústica son otros de los factores de riesgo a tener en cuenta en este tipo de tareas, pero las vibraciones es uno de los factores más dañinos. Son dañinas para todo el cuerpo en general, por eso son llamadas vibraciones de cuerpo entero y suponen un esfuerzo tanto psicológico como físico para la persona que conduce el tractor.

Con la mejora de la tecnología se ha permitido la optimización de algunos aspectos de los tractores, tales como un aumento en la potencia, controles de alta tecnología, o aumento de la velocidad del vehículo, pero, aunque también ha habido mejoras, no son suficientes aquellas relacionadas con la protección de los trabajadores con respecto a estas vibraciones, ya que por ejemplo, no todos los tractores cuentan con sistemas de suspensión, o por lo menos no incorporan una suspensión completa del tractor, haciendo que los neumáticos sean casi los únicos elementos que absorban las vibraciones.

Aunque la relación entre estas vibraciones y algunas enfermedades se conocía desde los años 60, se han evidenciado más aún en los últimos 20 años, cuando la medicina del trabajo empezó a estudiar la relación entre períodos de exposición a vibraciones de distintas duraciones y unas determinadas enfermedades.

Las exposiciones en un corto espacio temporal pueden causar sensaciones molestas en las personas tales como dolor en el abdomen y en la espalda, dificultades de respiración o pérdida del equilibrio, mientras que las exposiciones más a largo plazo pueden provocar desórdenes psicológicos, físicos y de psicomotricidad que pueden dar lugar a problemas de salud más serios, especialmente, los relacionados con la médula espinal.

La medición de las vibraciones en los tractores ha puesto en evidencia que existen riesgos para la salud de los trabajadores, incluso para aquellos que solo están expuestos una hora al día, de tal forma que los problemas de salud se manifiestan después de entre 3 y 7 años de trabajos (Prokeš et al., 2012). Por todo ello concluimos que es esencial realizar unas medidas precisas de las vibraciones, evaluarlas y reflexionar sobre el riesgo real que éstas tienen sobre el trabajador, pudiendo desarrollar sistemas de seguridad que reduzcan estos niveles de vibración.

2.3.1. Factores que influyen en las vibraciones

Cuando el tractor está realizando sus tareas agrícolas, está expuesto a estas vibraciones, tanto por los movimientos provocados por el motor como por las irregularidades del terreno. Los factores que influyen en las vibraciones, están relacionados con las fuerzas provocadas por el motor, la

estructura del motor, la forma en la que las vibraciones se propagan por el vehículo y su transmisión hacia el asiento del operario.

En el artículo “Whole body vibrations indicators in agricultural tractors” de Adolfson, se demuestra que exceptuando el asfalto, el resto de terrenos por los que los tractores se mueven tienen un gran impacto en las vibraciones transmitidas a la persona que conduce el tractor.

Podemos señalar que uno de los elementos clave en la protección del trabajador es el asiento del tractor puesto que es el elemento de transmisión de las vibraciones desde la cabina del vehículo hasta su cuerpo. Por ello, su sistema de suspensión es imprescindible, siendo la suspensión neumática la más utilizada actualmente, por sus cualidades ergonómicas. Otro factor importante a tener en cuenta es la velocidad del tractor, puesto que al realizar el mismo trabajo sobre el mismo terreno, las vibraciones varían hasta un 40% al aumentar 3 km/h la velocidad del vehículo, por lo que se debe dotar de unos mejores sistemas de suspensión que reduzcan las vibraciones a los tractores que alcancen una velocidad máxima superior a 15 km/h.

Además debemos tener en cuenta otro tipo de factores, tales como la antigüedad del vehículo o la experiencia del conductor. Actualmente los fabricantes de tractores utilizan diseños en los que tienen en cuenta estas medidas de seguridad y por lo tanto, intentan reducir al mínimo las vibraciones, mientras que en los tractores antiguos no se tenían en cuenta este tipo de consideraciones, de forma que la seguridad del trabajador puede verse afectada si se utilizan tractores de una determinada antigüedad. Por otra parte si el trabajador no tiene la suficiente experiencia, sus capacidades de controlar el tractor serán menores, y le será más complicado sortear los obstáculos y las irregularidades del terreno, aumentando el impacto de las vibraciones en su cuerpo.

Por todo ello podemos ver que es esencial tanto un buen diseño del tractor que cuente con los sistemas de suspensión apropiados, siendo estos normalmente los tractores más actuales, así como una buena instrucción de los trabajadores tanto para un buen manejo del vehículo, como para que tengan conocimiento de las medidas de seguridad que es necesario cumplir en materia de vibraciones, en particular y en el resto de aspectos de su trabajo, en general.

2.3.2. Evaluando los niveles de vibración de cuerpo entero

Las vibraciones se van a transmitir al trabajador de tres formas distintas, por el asiento, donde se inducen las vibraciones de cuerpo entero, por los controles manuales, donde se inducen las vibraciones que afectan a las extremidades superiores y a través del suelo y la superficie, donde se inducen las vibraciones que afectan a las extremidades inferiores.

La medida exacta y precisa de la fuerza que provoca las vibraciones es imposible, por lo que son las vibraciones las que son objeto de análisis. Las vibraciones que se han transmitido por el asiento, se pueden definir en el dominio de la frecuencia, con la medida de su desplazamiento, velocidad o aceleración, pero respecto a la medida y evaluación del impacto de las vibraciones en los operarios, la regulación legislativa, define la aceleración como el mejor parámetro de medida y evaluación siempre que éste sea ponderado correctamente en función de su frecuencia.

La evaluación del impacto de las vibraciones asume tres direcciones ortogonales de medida, para las vibraciones de cuerpo entero: una dirección longitudinal o vertical marcada como eje Z, y dos laterales que son el eje X, que recoge los movimientos hacia adelante y hacia atrás y el eje Y que recoge los movimientos hacia la derecha y hacia la izquierda.

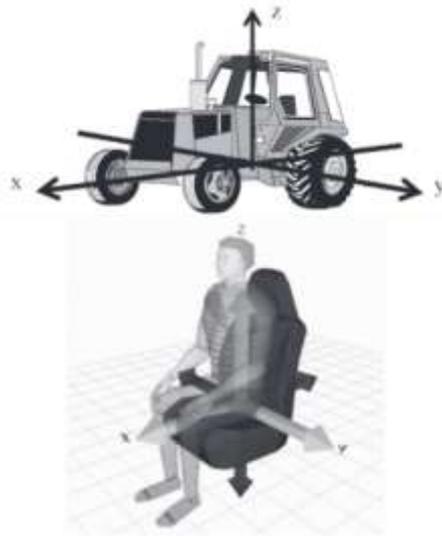


Ilustración 14. Definición de los ejes de medida

Los riesgos a los que se exponen los trabajadores con las vibraciones va a depender de las frecuencias a las que se den las vibraciones, por lo que debemos tener esto en cuenta a la hora de tomar los datos de aceleración.

La magnitud de las vibraciones se expresa en su valor efectivo (r.m.s.), que es la aceleración media medida en el asiento en relación con el período de tiempo en el que se ha tomado la medida. Por otra parte el valor de la aceleración equivalente, es el valor constante de la aceleración que tiene el valor de la energía igual al valor efectivo de la aceleración, durante cierto período de tiempo.

Finalmente, la estimación de los niveles de vibración total se lleva a cabo con dos métodos diferentes. Por un lado podemos realizar la evaluación determinando el nivel de exposición diaria expresada como aceleración continua equivalente para un período de 8 horas, siendo éste el método básico. Por otro lado, puede haber situaciones en las que el método de evaluación básico pueda subestimar algunos efectos de las vibraciones, por lo que, deberemos usar otro método como el cálculo del valor de dosis de vibración, que representa la dosis acumulada de vibraciones y que es más sensible a sus valores pico.

2.3.3. Efectos negativos de las vibraciones en la salud

Como todas las estructuras mecánicas nuestro cuerpo tiene frecuencias de resonancia a las que presenta una respuesta mecánica máxima, pero en nuestro caso no tenemos una única frecuencia de resonancia sino muchas y varían en cada persona y dependen también de la postura de la misma. El cuerpo tiene dos respuestas: impedancia y transmisibilidad.

La impedancia indica la cantidad de fuerza necesaria 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, incidiendo considerablemente en la forma en que se transmite las vibraciones [10].

En primer lugar se explican los efectos agudos:

Malestar

En la vibración vertical, a cualquier frecuencia, el malestar aumenta en proporción a la magnitud de la vibración. Este malestar es predecible si se aplican unas determinadas ponderaciones en

frecuencia, pero no existen límites prácticos en cuanto al malestar, ya que la tolerancia al mismo dependerá tanto de la persona como de los ambientes en los que se encuentre.

Interferencia con su actividad

Las vibraciones pueden deteriorar las interacciones entre el operario y el vehículo, al empeorar la adquisición de información sobre el entorno que lo rodea, la salida de información, refiriéndonos normalmente a dar instrucciones al vehículo para su dirección, y los procesos de aprendizaje, memoria o toma de decisiones.

Los efectos de las vibraciones sobre la visión y el control manual están causados por el movimiento de los ojos o la mano, respectivamente, lo que se puede reducir disminuyendo la transmisión de vibraciones a estos órganos o diseñando la tarea de nuevo.

Alteraciones de las funciones fisiológicas

Estas alteraciones tienen lugar cuando el trabajador está expuesto a las vibraciones en condiciones de laboratorio, ya que las alteraciones típicas a un estímulo determinado se normalizan con la exposición a las vibraciones. La relación entre la alteración de las funciones fisiológicas en el campo y las vibraciones es difícil de discernir puesto que suelen actuar conjuntamente con otros factores como un alto nivel de tensión, inhalación de sustancias tóxicas o contaminación acústica.

Alteraciones neuromusculares

Nuestro cuerpo actúa como un control de información constantemente ajustado por la información procedente de los sensores situados en los músculos, tendones y articulaciones. Las vibraciones de cuerpo entero producen un movimiento artificial pasivo del cuerpo, en las que el cuerpo no tiene información de control de las mismas, constituyendo así la principal alteración neuromuscular. Por otra parte, estas vibraciones se mueven en un rango de frecuencia de entre 0,5 Hz y 100 Hz, mientras que los movimientos voluntarios se encuentran en una gama de frecuencias de entre 2 y 8 Hz, explicándose así estas alteraciones para frecuencias muy bajas y para frecuencias altas.

Además estas vibraciones determinan una actividad relacionada con la aceleración en el electromiograma de los músculos superficiales de la espalda, que consiste en una prueba médica que registra mediante electrodos las corrientes eléctricas que se forman en los nervios y músculos al producirse las contracciones, obligando a las personas que están expuestas a mantener una contracción crónica. Los datos proporcionados por esta prueba nos indican que a frecuencias de entre 6.5 y 8 Hz, la columna puede verse sometida a una carga mayor al reducirse la estabilización muscular. Además, la fatiga de los músculos de la espalda, cuando la persona está expuesta a vibraciones de cuerpo entero, es superior que la de una persona que está en la misma posición pero sin sufrir estas vibraciones. También se ven afectados los reflejos de los tendones, que pueden reducirse o incluso desaparecer temporalmente durante la exposición a vibraciones superiores a 10 Hz.

Alteraciones sensoriales y del sistema nervioso central

Se ha indicado la existencia de alteraciones de la función vestibular relacionada con el equilibrio y el control espacial, causada por este tipo de vibraciones, al estar relacionada con la postura que adopta el trabajador. Estas alteraciones tienen un mayor impacto cuando las vibraciones se dan en frecuencias muy bajas.

Al realizar experimentos con exposiciones a las vibraciones y a ruido, tanto prolongadas como a corto plazo, se ha percibido que tienen un efecto sinérgico sobre la audición, de tal forma que a unas frecuencias de alrededor de 5 Hz se apreciaban desplazamientos temporales del umbral de audición.

Respecto a los efectos a largo plazo, se tienen información sobre los siguientes riesgos:

Riesgos para la salud de la columna vertebral

Los estudios epidemiológicos indican que existe un riesgo elevado para la salud en la columna vertebral de los trabajadores expuestos durante muchos años a intensas vibraciones de cuerpo completo. Las molestias tanto en la columna vertebral como en las lumbares pueden ser consecuencia de una alteración de las vértebras y los discos intervertebrales. La región lumbar seguida de la región torácica son las más afectadas de la columna vertebral por las vibraciones de cuerpo entero, ya que los problemas en la región cervical se atribuyen más a las malas posturas que a las vibraciones.

Por todo ello, se llegó a la conclusión de que la conducción de este tipo de vehículos son factores de riesgo importantes para las molestias lumbares y los trastornos de la espalda, además se observó un aumento del número de pensiones por discapacidad y de bajas laborales de larga duración causadas por trastornos relacionados con los discos intervertebrales entre los operarios de tractores.

A pesar de los estudios existentes, no ha sido posible establecer un nivel de seguridad que permita que los trabajadores se aseguren no tener ningún tipo de molestias de este tipo, ya que las investigaciones epidemiológicas no permiten establecer actualmente una relación entre dosis y efecto. Algunas consideraciones sugieren efectos perjudiciales de las cargas pico elevadas que actúan sobre la columna durante las exposiciones con altos valores transitorios, por lo que en este caso sería necesario calcular la dosis de vibración acumulada, más sensible a la evaluación y medición de picos de aceleración en las vibraciones de cuerpo entero.

Sistema nervioso, órgano vestibular y audición

Las vibraciones de cuerpo entero a frecuencias superiores a 40 Hz pueden causar daños del sistema nervioso central. En ciertos estudios se ha encontrado un aumento de molestias, tales como dolor de cabeza y aumento de la irritabilidad y también se ha indicado la aparición de alteraciones del electroencefalograma tras la exposición a las vibraciones de cuerpo entero.

De la misma manera que en los efectos agudos, en este caso, a largo plazo también se ha observado un aumento adicional de los desplazamientos permanentes, en este caso, del umbral de audición tras una exposición combinada tanto al ruido como a las vibraciones a cuerpo completo.

Embarazo

Se cree que el aumento del riesgo del aborto, puede estar relacionado con la exposición de larga duración a las vibraciones de cuerpo entero. No se puede deducir un umbral de exposición seguro que evite un aumento de estos riesgos para el embarazo, aunque los estudios sugieren que las vibraciones a las que se expone una trabajadora embarazada pueden afectar negativamente al feto.

Sistemas circulatorio y digestivo

Las principales de alteraciones circulatorias con mayor incidencia entre trabajadores expuestos a este tipo de vibraciones son trastornos periféricos, tales como el síndrome Raynaud, venas varicosas de las piernas, cardiopatía isquémica e hipertensión y alteraciones neurovasculares.

Aunque frecuentemente se ha observado una elevada prevalencia de diversos trastornos del sistema digestivo, casi todos los autores coinciden en que las vibraciones de cuerpo completo es solo una de las causas y quizá no la más importante de este tipo de trastornos.

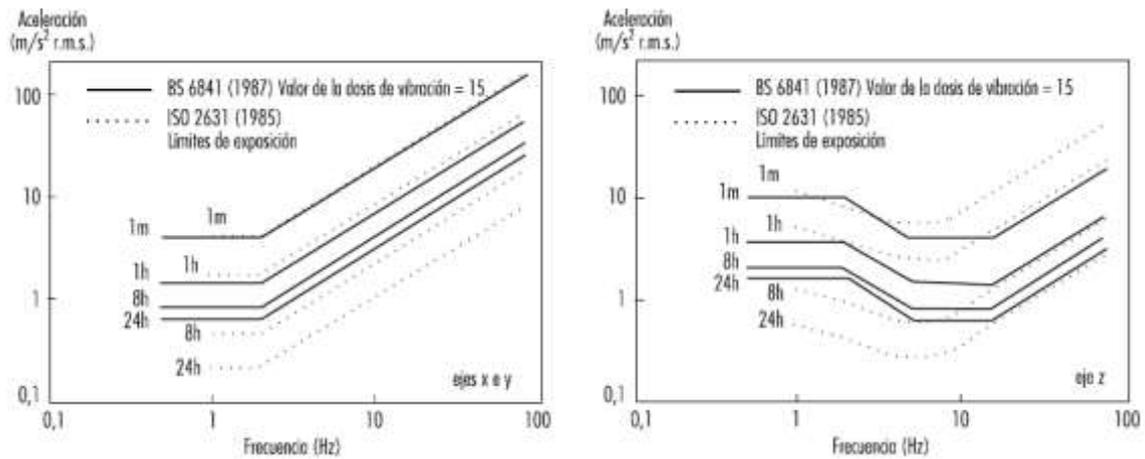


Ilustración 15. Dependencia de la aceleración respecto de la frecuencia en los tres ejes

Como se puede observar, en el estudio de las alteraciones a las que se puede enfrentar un operario de tractores expuesto a vibraciones de cuerpo completo, se diferencian los valores de la aceleración en función de la frecuencia a la que se producen, por lo que existe una relación entre la frecuencia a la que se producen las vibraciones así como la respuesta humana a las mismas, mostrada en la figura anterior [3].

También existe esta dependencia del tiempo de exposición a la vibración y la respuesta humana a la que se expone, tal y como se ve en la siguiente figura.

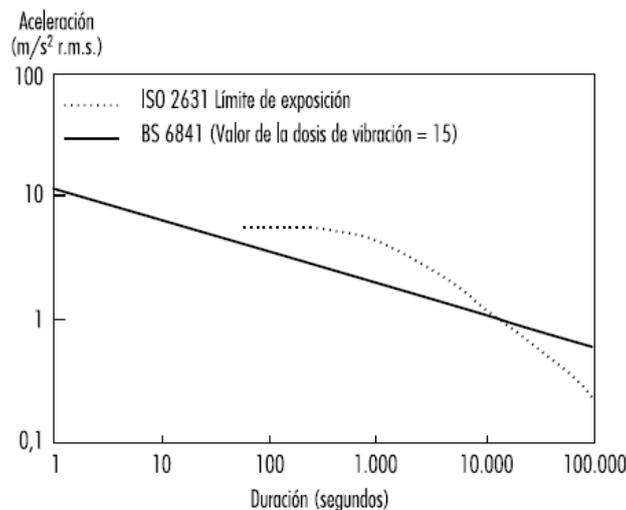


Ilustración 16. Dependencia de la aceleración respecto del tiempo de exposición

Efectos psicológicos

Hace unos años, Kjellberg llegó a la conclusión de que los estudios que analizaban las consecuencias psicológicas de la exposición a vibraciones de cuerpo entero se centraban en los efectos de la percepción visual y en las tareas de control del vehículo, aunque también señaló la poca información existente sobre el impacto de estas vibraciones en los procesos cognitivos y la necesidad de realizar investigaciones más profundas en este campo [11].

Los efectos a largo plazo causados por las vibraciones en las emociones del trabajador que se expone a ellas, tomando como objeto de estudio a los trabajadores que han estado alrededor de 20 años realizando tareas agrícolas en tractores, son, por ejemplo, fatiga, depresión, tensión, ansiedad o apatía entre otras.

Por otra parte, en el artículo “Affective Correlates of Occupational Exposure to Whole-Body Vibration” de Webb et al. se estudió el papel del locus de control de los individuos expuestos, refiriéndose al locus de control como la percepción que tiene una persona sobre donde se encuentra el origen de los acontecimientos de su vida cotidiana. El locus de control interno ocurre cuando la persona percibe que lo que ha ocurrido externamente es gracias a su comportamiento y tiene control sobre las consecuencias externas, mientras que el locus de control externo sucede cuando la persona percibe que un evento externo ha ocurrido de manera independiente a su comportamiento.

El estudio realizado por el artículo antes mencionado, demostró que, tras la exposición a vibraciones de cuerpo entero, los individuos tienden a creer que lo que les rodea no está bajo su control y por lo tanto desarrollan unos comportamientos más pasivos ante los estímulos del ambiente en el que se encuentran. Estos comportamientos si permanecen en el tiempo, pueden llegar a cambiar rasgos en la personalidad de la persona.

Como podemos ver, los efectos psicológicos consecuencia de las vibraciones de este tipo, son muy complicados de medir, por lo que se usan métodos objetivos que nos puedan dar una idea de cómo influyen en nuestro cuerpo. Estos estudios empíricos, han permitido asociar las vibraciones a una reducción en tareas de aprendizaje asociativo, así como en la disminución de memoria a corto plazo, aumentando significativamente el número de errores en aquellos individuos expuestos a vibraciones de bajo nivel (alrededor de 1 m/s^2).

Por todo ello, se puede asociar que existe una relación entre la exposición de una persona a vibraciones de cuerpo entero y ciertas alteraciones psicológicas en las mismas, especialmente, en las tareas cognitivas; aunque la relación entre ellas es mucho más compleja que una simple relación lineal entre la magnitud de las vibraciones y el funcionamiento deteriorado de las tareas cognitivas.

2.3.4. Conclusiones

Es importante conocer qué factores influyen en el aumento de las vibraciones puesto que nos permitirá conocer otras formas de reducirlas mediante la variación de elementos externos tales como la velocidad del tractor o la regularidad del terreno entre otros. Una vez se han tomado todas las medidas posibles para evitar niveles altos de vibración, debemos establecer unas prácticas comunes que nos permitan evaluar las vibraciones con los mismos métodos y tomando las mismas referencias, tal y como se explica en la segunda parte de este punto. Finalmente, también debemos ser conscientes de porque es necesario tomarnos tantas molestias en la reducción y evaluación de las medidas de cuerpo entero, para lo cual se han estudiado las posibles alteraciones y enfermedades que éstas puedan causar.

2.4. Prevención y legislación en el campo de las vibraciones

En este capítulo se van a analizar las medidas de prevención laboral que toman o deberían tomar los trabajadores que conducen los tractores. En primer lugar se van a conocer en qué trabajos los operarios están expuestos a las vibraciones de cuerpo entero, para luego explicar las medidas de prevención que distintas instituciones recomiendan para no sufrir los efectos nocivos de las vibraciones. Por último, se estudiarán los límites legales de la exposición de los trabajadores a este tipo de vibraciones recogidas en el Real Decreto 1311/2005 del Instituto Nacional de Salud e Higiene en el Trabajo dentro de la Legislación española, basándose en la Directiva 2002/44/CE del Parlamento Europeo.

2.4.1. Medidas de prevención

La prevención de las vibraciones o su reducción para que tengan el impacto mínimo es un aspecto clave, para proteger la seguridad de los trabajadores. Para poder diseñar los planes de prevención que reduzcan las alteraciones de salud en los individuos que manejan vehículos agrícolas, es necesario conocer donde tienen lugar la mayoría de estas vibraciones.

Según los datos de la VII Encuesta Nacional de Condiciones del Trabajo [12] realizada en 2011, el 13,9 % de los trabajadores ha señalado que tienen vibraciones en su trabajo, refiriéndose el 8,5% de ellas a vibraciones mano-brazo y el 2,8% a vibraciones de cuerpo entero y el 2,6% a vibraciones de ambos tipos.

Los hombres se encuentran más expuestos, un 21,8% de hombres frente a un 5,1% de mujeres. Por sector de actividad, los trabajadores de la construcción son los más expuestos, seguidos de los trabajadores del sector industrial. En el siguiente gráfico se muestran las ramas de actividad cuyos trabajadores se exponen más frecuentemente a vibraciones en su actividad laboral.



Ilustración 17. Ramas de actividad laboral donde se reciben más vibraciones

Clasificados por su ocupación, los trabajadores que indican una mayor exposición a las vibraciones de cuerpo entero son los trabajadores que se encargan de la conducción de vehículos,

como los operarios de tractores agrícolas, tema central del estudio en este documento, y los obreros industriales, tal y como se puede observar en el gráfico siguiente:



Ilustración 18. Ocupaciones laborales donde se reciben más vibraciones

Para minimizar los riesgos a los que se exponen los trabajadores, llevan a cabo actuaciones de tres tipos: administrativas, técnica y sobre el receptor [13].

Respecto a las actuaciones administrativas, las medidas a llevar a cabo son las siguientes:

- Reducción de los tiempos de exposición
- Variación en las tareas de los operarios
- Fijación de pausas para el descanso durante la jornada laboral

Por otra parte las actuaciones técnicas se diferencian entre aquellas que tienen lugar sobre el foco y aquellas que tienen lugar sobre el medio.

- El mantenimiento preventivo de las máquinas es una actuación muy importante sobre el foco.
- El operario debe adoptar una posición correcta sobre el asiento con un buen apoyo lumbar, que disminuya la presión intradiscal.

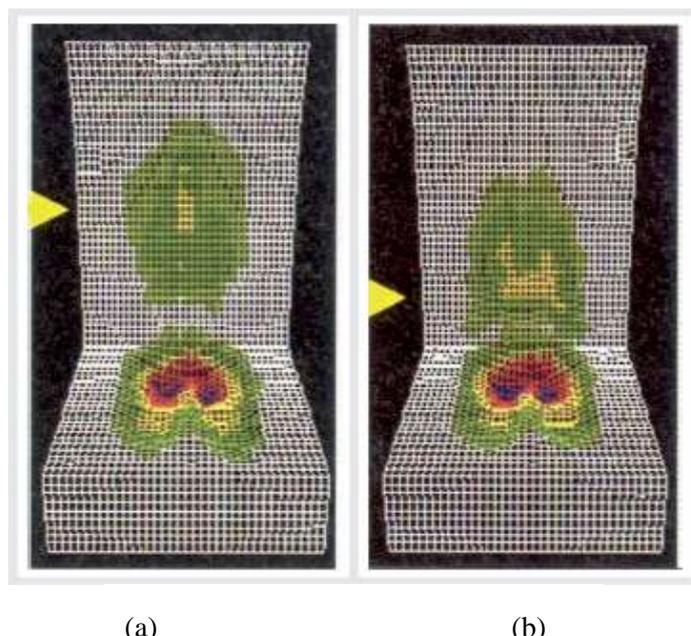


Ilustración 19. Posición correcta (a) e incorrecta (b) del operario sobre el asiento

- Utilización de materiales aislantes que atenúen la transmisión de las vibraciones al trabajador.
- Mantenimiento preventivo de los sistemas de suspensión
- Si las vibraciones se transmiten a través de partes de la maquinaria como palancas o controles entre otros, se pueden colocar fundas sobre éstas con materiales especiales que disminuyen la vibración transmitida a los trabajadores, como los viscoelásticos.
- Si las vibraciones llegan al trabajador a través del suelo, se debe colocar una alfombra que mejora la comodidad de los operadores.
- Utilización de sistemas de suspensión neumáticos en el asiento, sobre todo en vehículos utilizado por los trabajadores durante largos periodos de tiempo. Los trastornos de columna son muy frecuentes en los trabajadores agrícolas, ya que recae sobre esta región la carga corporal al estar en posición sentada.

Dentro de las actuaciones sobre el receptor, se encuentran aquellas medidas que se llevan a cabo o que deben tener en cuenta el operario que maneja el vehículo agrícola.

- Información y formación de los efectos de las vibraciones sobre la salud y las medidas que debe tener.
- Utilización de protecciones personales, como guantes antivibración especialmente cuando se van a exponer a vibraciones de alta frecuencia.
- Controles periódicos de la salud.
- Informar a los trabajadores de los niveles de vibración a los que están expuestos.

Además de estas medidas, a la hora de conducir los tractores y vehículos agrícolas, los operarios deben poner en práctica diversas prácticas para reducir las vibraciones a las que los trabajadores se exponen:

- Ajustar el asiento perfectamente al cuerpo del operador
- Limitar la intensidad del trabajo
- Limitar la duración del tiempo de conducción de estos vehículos, hay que la exposición alargadas a las vibraciones de cuerpo entero
- Usar la dirección asistida para tomar adecuadamente las curvas cerradas durante la realización de las tareas agrícolas.
- Regular la velocidad, evitando así movimientos inesperados.

2.4.2. Legislación sobre vibraciones

Las vibraciones a las que un trabajador se ve sometido al utilizar maquinaria agrícola deben verse limitadas para salvaguardar la salud y proteger la seguridad del trabajador. Para ello, la cantidad de vibraciones que recibe cada trabajador es regulada por [14] el Real Decreto 1311/2005 del Instituto Nacional de Salud e Higiene en el Trabajo dentro de la Legislación española, que se basa en la Directiva 2002/44/CE del Parlamento Europeo [15]

Tipos de vibración según la legislación

Al limitar las vibraciones a las que un trabajador se puede ver sometido, la regulación diferencia dos tipos de vibraciones distintas:

- Vibración transmitida al sistema mano-brazo: la vibración mecánica que, cuando se transmite al sistema humano de mano y brazo, supone riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores, en particular, problemas vasculares de huesos o de articulaciones, nerviosos o musculares.
- Vibración transmitida al cuerpo entero: la vibración mecánica que, cuando se transmite a todo el cuerpo, conlleva riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores, en particular, lumbalgias y lesiones de la columna vertebral.

El nivel de exposición se calcula como el promedio ponderado a lo largo de una jornada de 8 horas. Respecto a los límites establecidos se especifican dos valores de exposición diaria normalizada:

- Valor límite: representan niveles de exposición que no deben ser excedidos en ninguna jornada laboral. Al calcularse como un promedio, es posible que este valor se supere de forma instantánea. En caso de superarse este valor de forma ponderada, se deberán tomar medidas inmediatas, para reducir el nivel de vibraciones recibidas
- Los valores de exposición que dan lugar a una acción, en caso de superarse, se ejecutará el programa de medidas técnicas y organizativas y se someterá al trabajador a una adecuada vigilancia de la salud.

Valores límite de las vibraciones transmitida al sistema mano-brazo

- El valor límite de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas se fija en 5 m/s².
- El valor de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas que da lugar a una acción se fija en 2,5 m/s².

Valores límite de las vibraciones transmitida al cuerpo entero

- El valor límite de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas se fija en 1,15 m/s².
- 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 m/s².

Evaluación del riesgo

Para determinar los riesgos y actuar en consecuencia, debemos diferenciar tres casos distintos:

- Por debajo del valor que da lugar a una acción.
- Entre el valor que da lugar a una acción y el valor límite.
- Por encima del valor límite.

Si se opta por medir la aceleración producida por la vibración, deberá hacerse con instrumental y procedimientos acordes con las normas a las que remite el Anexo del Real Decreto 1311/2005.

En primer lugar debemos conocer el tiempo diario de exposición a la vibración. Si se realizan diferentes tareas, se deberá conocer la duración de cada una de esas tareas [16]. Pero la cuestión es ¿cómo determinar que valor de la aceleración tomamos como cuantificación correcta de esta magnitud? Para ello, se define el valor A(8).

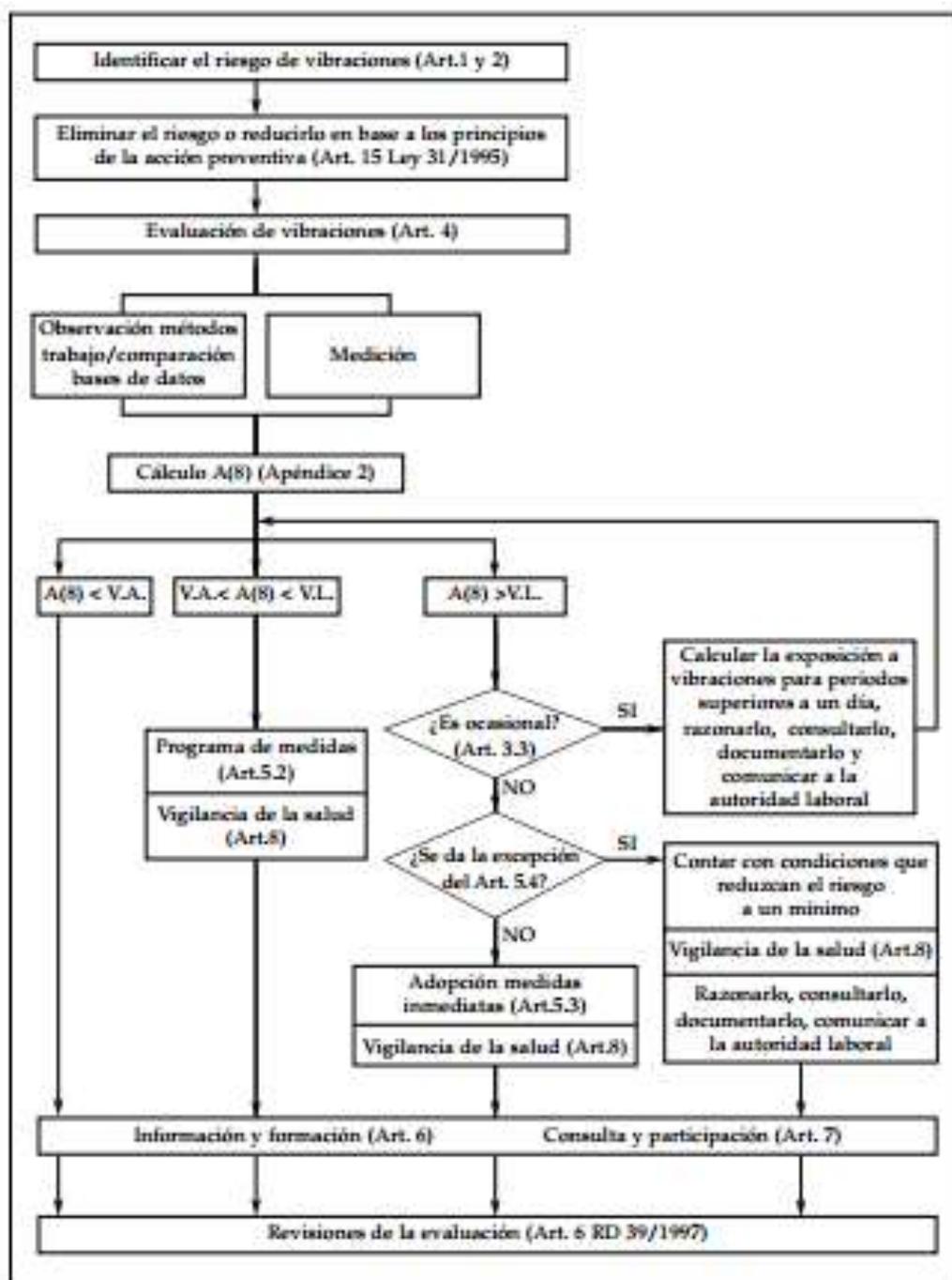


Ilustración 20. Actuaciones y medidas a realizar según los riesgos evaluados

2.4.3. Conclusiones

Para poder centrar el campo de acción donde sea necesario aplicar ciertas medidas y ciertas precauciones hemos estudiado, atendiendo a la Encuesta Nacional de Condiciones del Trabajo, en qué sectores y qué ocupaciones son aquellas en las que son más frecuentes las exposiciones de los trabajadores a vibraciones de cuerpo entero y por lo tanto aquellas en las que es más esencial que estos trabajadores tomen las precauciones adecuadas para evitar problemas de salud, descritas en este mismo punto. Además de las recomendaciones, es la propia legislación española, basándose en una directiva europea la que protege la salud de los trabajadores poniendo límite a las vibraciones a las que se exponen, determinando cuando es necesario tomar medidas y cuando no, tal y como se explica al final de este punto.

2.5. Android y los dispositivos móviles

En este apartado se va a explicar cómo es Android, el sistema operativo en el que se ha desarrollado la aplicación, y por qué se eligió para la realización de este proyecto. En primer lugar se comentará los orígenes de la compañía que sacó al mercado este sistema operativo y las características que lo distinguen de otros sistemas operativos. Seguidamente se comentará cómo se encuentra actualmente el mercado de sistemas operativos basándonos en cuántos móviles en uso tiene cada uno. Para terminar, se explicará cómo es la arquitectura de Android y qué función tiene cada una de sus partes.

2.5.1. Historia de Android y estado actual en el mercado

En los últimos años los teléfonos móviles han experimentado una gran evolución, desde aquellos dispositivos pensados únicamente para hablar por teléfono y escribir mensajes de texto, hasta los últimos modelos de alta tecnología que además de ser un medio de comunicación, integra todo tipo de utilidades.

Android es un sistema operativo para móviles que se basa en una versión modificada de Linux. Originalmente fue desarrollado por una empresa con el mismo nombre, Android INC. En 2005, Google compró Android y tomó el control de su trabajo y de su equipo de desarrollo.

Google quería que Android fuese libre y gratuito, por ello, la mayoría del código de Android fue lanzado bajo la licencia de código abierto de Apache, lo que significa que todo aquel que quisiera usar Android, podría hacerlo descargando el código completo de Android [17]. Esto permite que se puedan añadir extensiones propias.

Por todas estas razones, Android se convirtió en un sistema operativo muy atractivo que atrajo multitud de interesados, especialmente a aquellas empresas afectadas por el fenómeno generado por el iPhone de Apple, un dispositivo que revolucionó la industria de los smartphones, como es el ejemplo de Motorola y Sony Ericsson. Al ser lanzado el iPhone, algunos fabricantes optaron por mantener su propio hardware y potenciarlos con el uso del sistema operativo Android.

La verdadera ventaja de adoptar Android está relacionada con el desarrollo de aplicaciones, ya que los desarrolladores crearán aplicaciones basadas en Android, de tal forma que al estar este sistema operativo instalado en un gran número de dispositivos, el público de las aplicaciones desarrolladas en Android aumentará considerablemente.

Para ver si realmente Android está por encima de iOS, las compañías de investigación de mercados, cada cierto tiempo, publican las cifras de usuarios de cada una de las compañías.

En agosto de 2016, la compañía Gartner [18] publicó el estudio de mercado de los sistemas operativos móviles a nivel mundial, abarcando desde abril hasta junio de 2016, periodo durante el cuál Android llegó al 86.2% de participación de mercado, un aumento del 4% con respecto al mismo período del año anterior.

Sistema operativo	Unidades (2016)	Cuota de mercado (2016)	Unidades (2015)	Cuota de mercado (2015)
Android	296.912,8	86.2%	271.647,0	82.2%
iOS	44.395,0	12.9%	48.085,5	14.6%
Windows	1.971,0	0.6%	8.198,2	2.5%
Blackberry	400,4	0.1%	1.153,2	0.3%
Otros	680,6	0.2%	1.229,0	0.4%
Total	344.359,7	100%	330.312,9	100%

Ilustración 21. Estudio de mercado de los sistemas operativos utilizados actualmente

Los datos anteriores del estudio representan los miles de dispositivos utilizados. Le siguen el sistema operativo desarrollado por Apple, que es iOS, aunque ha bajado su cuota de mercado respecto del mismo periodo del año pasado, sigue siendo el segundo sistema operativo que tiene más éxito en el mercado. Por otra parte, son Windows y BlackBerry los sistemas operativos que menos usuarios tienen de entre los más conocidos.

2.5.2. Arquitectura de Android

La arquitectura de Android está formada por varias capas, todas estas capas están basadas en software libre, tal y como se puede ver en el siguiente esquema:

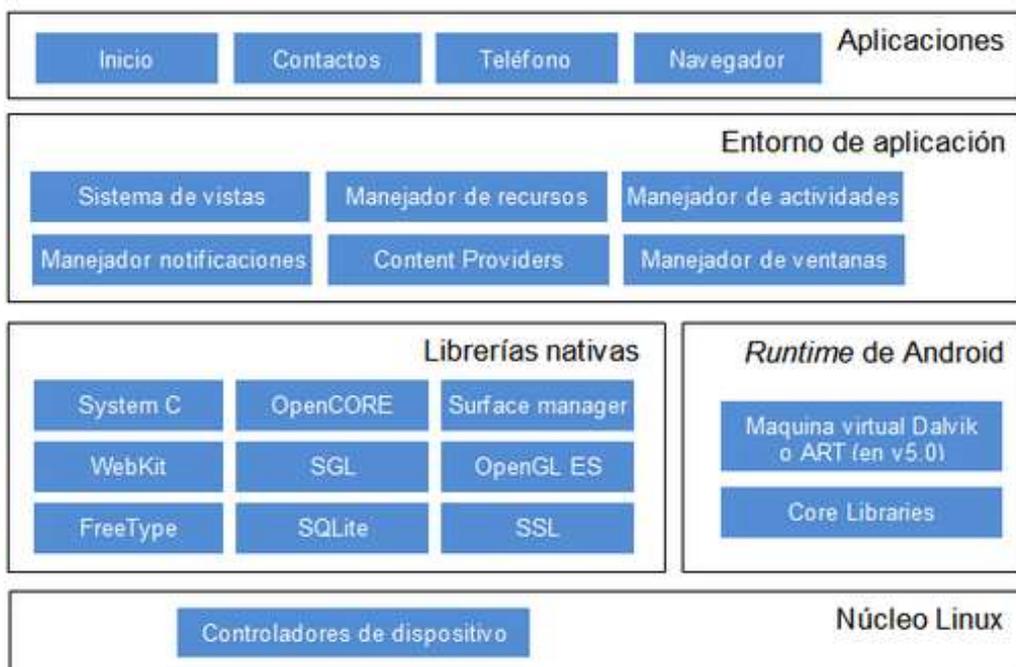


Ilustración 22. Esquema de la arquitectura del sistema operativo Android

En primer lugar nos encontramos el núcleo de Android, que está formado por el sistema operativo de Linux [19]. Esta capa proporciona servicios como la seguridad, los drivers o la pila de protocolos.

Esta capa actúa como una capa abstracta entre el hardware y el resto de la pila, de forma que es dependiente del hardware.

Por otra parte, tenemos el runtime de Android, que está basado en la máquina virtual que utiliza Java, aunque debido a las limitaciones de los dispositivos que utiliza Android no se pudo utilizar una máquina virtual Java estándar, sino que se creó la máquina virtual Dalvik.

Esta máquina virtual está basada en registros, de forma que cada aplicación corre en su propio proceso de Linux con su propia instancia de la máquina virtual Dalvik. Además utiliza un formato de ficheros ejecutables optimizado que permite optimizar recursos con la extensión .dex

En el runtime de Android también se incluyen la mayoría de las librerías disponibles en Java que se integran dentro del módulo Core Libraries.

La máquina virtual Dalvik es sustituida por ART a partir de la versión 5.0 de Android para reducir el tiempo de ejecución de código Java.

La arquitectura de Android también incluye un conjunto de librerías en C/C++ que se compilan en código nativo del procesador. La mayoría de las librerías utilizan proyectos en código abierto. Entre las tareas de las librerías utilizadas se encuentra el soporte de códec para el manejo de formatos de audio y vídeo con la librería Media Framework, el manejo del sistema de representación gráfica 2D y 3D con la librería Surface Manager y proporciona servicios de encriptación SSL .

Por otra parte, Android tiene una plataforma de desarrollo libre que ha sido diseñada para simplificar el desarrollo de las aplicaciones gracias a la reutilización de componentes.

Además en esta capa se incluyen los servicios tales como mecanismos de acceso a datos desde otras aplicaciones, denominados Content Providers, alertas personalizadas en las barras de estado, denominadas Notification Manager, o el mecanismo que proporciona acceso a los recursos que no están formados por código.

Debemos tener en cuenta que el entorno de programación de Android aprovecha el lenguaje de programación de Android, aunque el SDK de Android no ofrece completamente el entorno de ejecución de Java, pero sí, gran parte de él.

Finalmente nos encontramos con las aplicaciones que están instaladas en una máquina Android, que deben correr en las máquinas virtuales para garantizar la seguridad del sistema.

2.5.3. Conclusiones

Para desarrollar una aplicación en el lenguaje nativo de un determinado sistema operativo, es necesario elegir el que más nos convenga. En este caso, como hemos podido comprobar, Android es actualmente el sistema operativo más utilizado y se basa en software libre, por lo que se ha considerado el más adecuado para el desarrollo de la aplicación. Para poder desarrollar la aplicación es necesario conocer cómo funciona dicho sistema operativo, cómo es su arquitectura y cuáles son sus capas, razones por las cuales se ha estudiado en este apartado como se estructura Android, definiendo las funciones de cada una de sus partes.

2.6. Aplicaciones en Android para la medición de vibraciones

Con el avance en las tecnologías que integran los *smartphones*, ha aumentado el número de sensores que nos permiten obtener datos del entorno del terminal. En esta sección se va a hacer un repaso de las aplicaciones que son capaces de medir las vibraciones a las que es sometido el terminal, analizando las características de cada una de ellas.

2.6.1. Vibrations Analysis

Se trata una aplicación que está disponible únicamente en la tienda de aplicaciones de *Google Play*, y por lo tanto, se puede instalar en terminales con el sistema operativo de Android. Al iniciar la aplicación, nos permite seleccionar de qué modo vamos a poder ver los datos, de forma gráfica o a través de parámetros característicos de las medidas tomadas.

Cuando elegimos ver los datos de forma gráfica, debemos seleccionar que eje queremos visualizar. Obtenemos una gráfica que nos muestra la aceleración medida en m/s^2 pudiendo visualizar dentro de la misma pantalla las mediciones de hasta 2 segundos de duración.

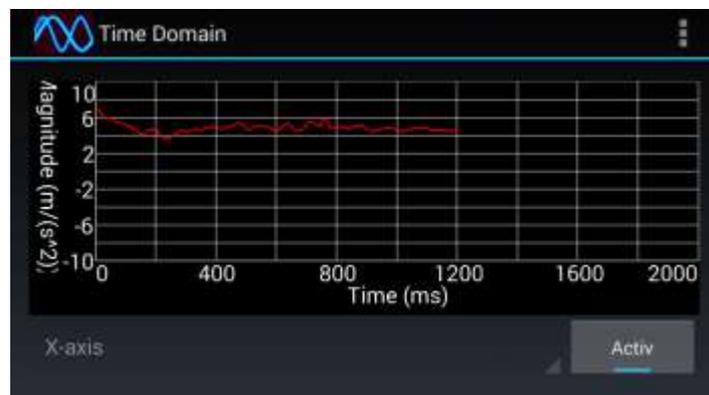


Ilustración 23. Captura del funcionamiento de *Vibrations Analysis* en su opción gráfica

En el caso de que seleccionemos obtener los resultados mediante parámetros, podremos ver para cada eje, el valor máximo y mínimo de la aceleración, el valor medio y el valor eficaz, así como la variación entre los valores anteriores de aceleración. Además se especifican la asimetría estadística, que es el parámetro que indica cómo es la simetría de la distribución de una variable respecto a su media aritmética y la kurtosis, un parámetro que mide cómo de achatada es la curva que se está representando.

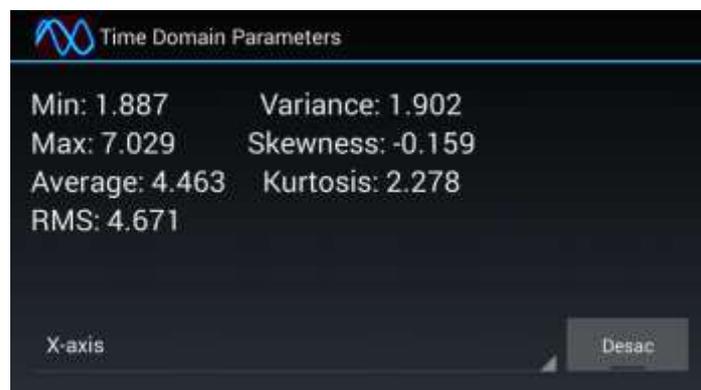


Ilustración 24. Captura del funcionamiento de *Vibrations Analysis* a través de sus parámetros

2.6.2. Vibrations

Esta aplicación, extiende alguna de las utilidades que podíamos ver en la aplicación anterior. Por una parte, nos permite ver la aceleración a la que está sometido el terminal en el dominio del tiempo mostrando una gráfica que representa dicha medida. Además muestra un indicador donde especifica cuál es la aceleración actual del dispositivo medida en 'g', una medida de aceleración que se basa en la aceleración que produciría la gravedad en el caso de no hubiera rozamiento, de forma que:

$$1g = 9.8066 \text{ m/s}^2$$

Por otra parte, la aplicación realiza un análisis espectral de las vibraciones, diferenciando entre las vibraciones de origen mecánico y aquellas que tienen origen acústico. Para ello, se mostrará una gráfica en el dominio de la frecuencia, expresándola tanto en hertzios (Hz) como en revoluciones por minutos (RPM), una unidad que también se suele utilizar para expresar la frecuencia. Sobre ella, se muestran dos gráficos, uno de ellos de color rojo que muestra el espectro correspondiente a las vibraciones mecánicas y otro de color azul en el que se muestra el espectro correspondiente a las vibraciones acústicas.

Además, también se indica con un marcador, para ambos tipos de vibraciones en qué frecuencia está el máxima del espectro de la aceleración.

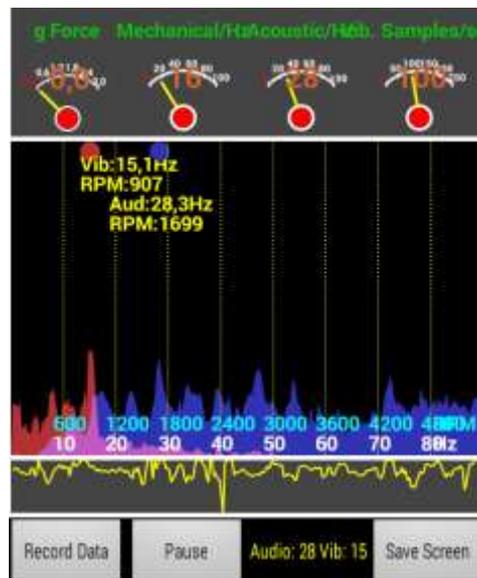


Ilustración 25. Captura del funcionamiento de Vibrations

La aplicación también nos indica a que velocidad se están tomando las muestras ya que, como se ha explicado anteriormente, no todos los *smartphones*, tienen la misma frecuencia máxima de muestreo, que es, en este caso, la frecuencia de muestreo que se está utilizando.

Para finalizar, esta aplicación nos da una opción que nos resulta muy útil en este tipo de herramientas de medición de las vibraciones como es la opción de guardar un fichero de texto con extensión .dat donde se guardan tanto los tiempos que en los que se ha tomado cada muestra, los valores de aceleración de cada uno de los ejes y la magnitud total de la aceleración, todas ellas en unidades del Sistema Internacional. Podemos guardar también una imagen con el gráfico obtenido, si necesitamos una información más gráfica de la medida. Esto resulta muy útil puesto que en ciertas ocasiones, como es nuestro caso, se necesita tratar los datos para obtener un determinado parámetro.

2.6.3. Vibrometer

La siguiente aplicación funciona de una forma muy similar a la explicada en primer lugar. En ella aparece una gráfica donde se muestran los valores de aceleración en tiempo real, medidos en m/s^2 . Se muestran los valores de cada eje en colores distintos, de forma que se pueden seleccionar y quitar la selección de qué ejes se representan sobre la gráfica.

Además, se registra el tiempo total que se llevan midiendo las vibraciones, así como el valor medio y el valor máximo de las aceleraciones.

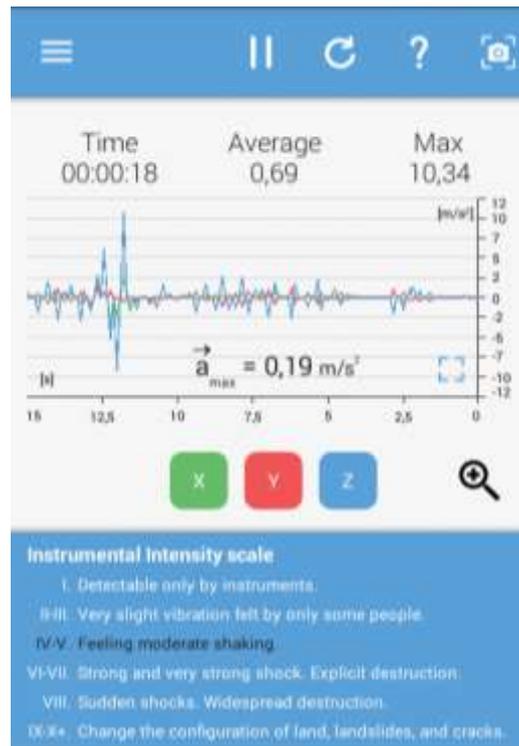


Ilustración 26. Captura del funcionamiento de Vibrometer

Esta aplicación introduce una escala que no se había utilizado anteriormente que es la escala sismológica de Mercalli. Se trata de una escala de doce grados que es utilizada para la evaluación de movimientos sísmicos.

Se han desarrollado numerosas escalas de intensidad numéricas, pero esta escala se basa en una serie de hechos que son consecuencia de los movimientos sísmicos, tales como movimiento de muebles, grietas en las paredes o daños en las estructuras de los edificios, entre otras; definiendo así varios niveles (del I al XII). La aplicación nos indica que nivel de esta escala se corresponde con las vibraciones a las que se está viendo sometido el dispositivo.

2.6.4. VibSensor

Se trata de una aplicación que analiza tanto las vibraciones como la inclinación del terminal. En primer lugar nos permite ver con un gráfico de sectores circulares la inclinación en cada uno de los tres ejes, además de mostrar en otro gráfico circular la vibración en cada eje. Se nos permite elegir si la vibración es medida en m/s^2 o en la unidad g.

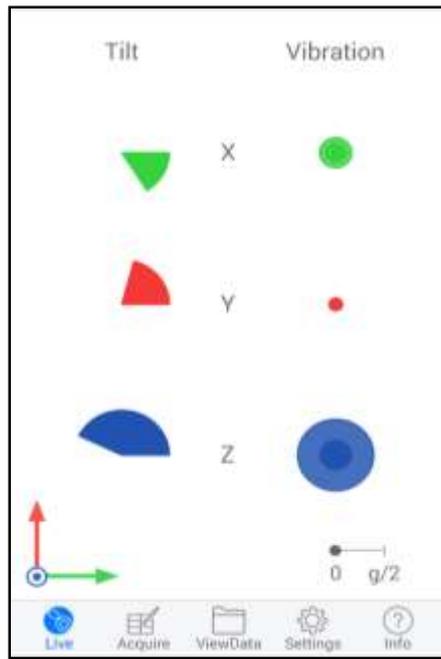


Ilustración 27. Captura del funcionamiento de VibSense

Incluye también la utilidad de guardar los datos grabados durante cierto período de tiempo, de tal manera que se guarda tanto el gráfico de la aceleración en el dominio del tiempo, en escala lineal y en escala logarítmica; como los valores pico de la aceleración en cada eje o sus frecuencias de resonancia.

2.6.5. Physics Toolbox Accelerometer

Se trata de una aplicación que muestra en tiempo real los valores de la aceleración, representando al mismo tiempo los tres ejes, diferenciándolos con tres colores distintos. La aceleración se mide en la unidad g.



Ilustración 28. Captura del Funcionamiento de Physics Toolbox Accelerometer

Además, esta aplicación nos permite guardar en un fichero .csv cada uno de los datos que la aplicación toma del sensor de la aceleración, de tal forma que posteriormente se puedan comparar los datos tomados con los de la aplicación desarrollada, siendo ésta una de las pruebas de comprobación del funcionamiento de esta aplicación.

2.6.6. Conclusiones

Al desarrollar una aplicación capaz de medir vibraciones es necesario conocer otras aplicaciones del mismo tipo, que tengan también esta utilidad para poder comparar que los datos que recoge la aplicación desarrollada, son correctos. Por ello esta sección ha analizado las características de varias de estas aplicaciones para poder así elegir cuál es la más apropiada para la realización de comprobaciones en la fase de pruebas del proyecto.

Capítulo 3. Materiales

En esta sección vamos a describir los materiales que se han utilizado para desarrollar este proyecto. En primer lugar, se va a hacer un análisis de las características de los *smartphones* que se han utilizado para la realización de pruebas, dos terminales de la marca Samsung y un terminal de la marca Asus más actual. 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 de adquisición de datos o DAQ, necesario para obtener los resultados de dichos acelerómetros. Una vez ya se hace esta revisión del hardware utilizado, se describen los programas software involucrados en el proyecto, empezando por aquellos que controlan el banco de vibraciones tanto para el movimiento sinusoidal como para el aleatorio y siguiendo con el programa que nos permite ver las mediciones de los acelerómetros en tiempo real. Para finalizar se explican las herramientas software necesarias para el desarrollo de la aplicación, tanto Android Studio, como Matlab para el análisis y manejo de datos matemáticos

3.1. Smartphone Samsung Galaxy Core GT-i8210

Este terminal es uno de los modelos utilizados para probar la aplicación, que cuenta con el sistema operativo Android, sobre el que se ha desarrollado la aplicación. Este dispositivo integra un procesador Snapdragon MSM8225 S4 Play con una CPU Cortex-A5 de ARM con 2 núcleos que llega a alcanzar una velocidad de reloj de 1.20Ghz.



Ilustración 29. Smartphone Samsung Galaxy Core GT-i8210

Las características técnicas del dispositivo son las siguientes [30]:

Pantalla

- Tamaño 4.3 pulgadas
- Tipo TFT
- Resolución 800x480
- Densidad de píxeles 217 ppp

Hardware y rendimiento

- Procesador Snapdragon MSM8225 S4 Play

- CPU Cortex-A5
- Núcleos 2
- Velocidad 1.20 GHz
- GPU Adreno 203
- Memoria RAM 1 GB
- Memoria Interna 8 GB
- Ampliación por MicroSD SÍ

Software

- Sistema operativo Android
- Versión SO 4.1.2
- Radio FM SÍ

Cámara

- Resolución 5.0 megapíxeles
- Flash Flash LED
- Características Geo-localización/reconocimiento de rostro/enfoque táctil

Batería

- Capacidad 1800 mAh
- Duración en conversación 14.00 h
- Duración stand-by 500.00 h
- Extraíble SÍ

Conectividad

- NFC NO
- Bluetooth v3.0, A2DP
- WiFi 802.11 b/g/n
- USB microUSB v2.0,
- Carga inalámbrica NO
- Tipo de tarjeta SIM sim
- Dual Sim SÍ
- Dual SIM 4G NO
- Redes 2G (GSM) 850 / 900 / 1800 / 1900
- Redes 3G (HSDPA) 900 / 2100
- Compatible 3G en España SÍ
- Compatible 4G en España NO

3.2. Smartphone Samsung Galaxy Core II

Para validar los datos obtenidos en la aplicación y poder contrastarlos, se ha utilizado también este terminal, con el objetivo de estudiar si los distintos teléfonos, utilizando acelerómetros distintos, proporcionan datos con la misma fiabilidad.

Sus características técnicas son las siguientes [31]:

Procesador

- Velocidad CPU: 1.2GHz
- Tipo CPU: Quad-Core

Pantalla

- Tamaño: 4.5" (114.2mm)

- Resolución: 480 x 800 (WVGA)
- Tecnología: TFT
- Número de colores: 262K

Cámara

- Resolución de grabación de vídeo: D1 (720 x 480) @30fps
- Cámara principal – Resolución: CMOS 5.0 MP
- Cámara frontal – Resolución: CMOS VGA

Memoria

- RAM (GB): 0.75 GB
- Interna (GB):4 GB
- Memoria Disponible (GB): 2 GB
- Externa: MicroSD (hasta 64GB)

Redes/Bandas

- Multi-SIM: Single-SIM
- Tipo de SIM:Micro-SIM (3FF)
- Infra:2G GSM, 3G WCDMA
- 2G GSM:GSM850, B9 (P-GSM 900MHz), DCS1800, PCS1900
- 3G UMTS:B1(2100), B2(1900), B8(900)

Conectividad

- Versión USB: USB 2.0
- Localización:GPS, Glonass
- Auriculares: 3.5mm Stereo
- Wi-Fi:802.11 b/g/n 2.4GHz
- Wi-Fi Direct: Sí
- DLNA:No
- Versión Bluetooth: Bluetooth v4.0
- Perfiles Bluetooth: A2DP, AVRCP, HFP, HID, HSP, MAP, OPP, PAN, PBAP, SAP

Sistema Operativo

- Sistema Operativo: Android KitKat 4.4
- Sensores: Acelerómetro



Ilustración 30. Smartphone Samsung Galaxy Core II

Especificaciones físicas

- Dimensiones (AlxAnxProf, mm): 130.3 x 68 x 9.8
- Peso (g): 139

Batería

- Capacidad 2000 mAh
- Duración en conversación 7.00 h
- Duración stand-by 30.00 h
- Extraíble SÍ

3.3. Smartphone Asus Zenfone Max ZC550kl

Otro de los dispositivos utilizados es el *smartphone* Asus Zenfone Max ZC550KL, que es más reciente que los anteriores y cuenta con mejores características técnicas. Este terminal cuenta con un procesador Cortex A53 de 4 núcleos y una velocidad de reloj de 1.2 GHz. Las características técnicas con las que cuenta son las siguientes [32]:

Hardware y rendimiento:

- Procesador: Qualcomm Snapdragon 410
- CPU Cortex A53
- Núcleos 4
- Velocidad 1.2 GHz
- GPU Adreno 306
- Memoria RAM 2 GB
- Memoria Interna 16 GB
- Ampliación por MicroSD SÍ
- Hasta 64 GB

Software

- Sistema operativo Android
- Versión SO 5.0
- Capa de personalización Asus ZenUI
- Radio FM NO

Batería

- Capacidad 5000 mAh
- Duración en conversación 38 h
- Duración stand-by 914 h
- Extraíble NO .

Conectividad

- NFC NO
- Bluetooth 4.0, EDR, A2DP
- WiFi WLAN 802.11 b/g/n
- USB micro USB v2.0
- Carga inalámbrica NO
- Tipo de tarjeta SIM microsim
- Dual Sim SÍ
- Dual SIM 4G SÍ
- Redes 2G (GSM) 850 / 900 / 1800 / 1900
- Redes 3G (HSDPA) 850 / 900 / 1900 / 2100
- Compatible 3G en España SÍ
- Redes 4G (LTE) 800 / 850 / 900 / 1700 / 2100 / 2600
- Compatible 4G en España SÍ



Ilustración 31. Smartphone Asus Zenfone Max ZC550KL

3.4. Banco de *squeak & rattle*

También se llevaron a cabo pruebas para la validación de la aplicación en un banco de *Squeak & Rattle*. Se trata de un banco formado por un brazo vibrante movido por un excitador Energizer SILVER de la marca MB DYNAMICS.

Las pruebas de Squeak and Rattle sirven para medir el impacto de las vibraciones sobre un determinado elemento [33]. Por un lado, *Squeak* se refiere al ruido inducido por la fricción de dos superficies en contacto deslizándose una sobre la otra en direcciones opuestas. Para generarlo, debe existir un determinado movimiento relativo entre dos superficies. Uno de los mecanismos de generación de *squeak* fundamentales es la vibración inestable con características de movimiento *stick-slip*.

Por otro lado, *Rattle* es el ruido de impacto inducido, cuyas frecuencias bajas de vibración generan frecuencias de ruido de banda ancha a baja frecuencia, siendo el rango de frecuencias barridas entre 50 Hz y 8kHz. En este caso estos movimientos nos van a permitir generar las vibraciones necesarias para realizar las pruebas de la aplicación, siendo estos movimientos generados por el excitador denominado Energizer SILVER.

3.4.1. Excitador SILVER y brazo vibrador

Este excitador es capaz de transferir una fuerza instantánea de pico de 89000 N, con un recorrido pico a pico de 50 mm, una velocidad máxima de 1.5 m/s, puede alcanzar frecuencias de hasta 2000 Hz y el peso de este excitador es de 14.9 kg [34]. Podemos ver este excitador en la siguiente figura:

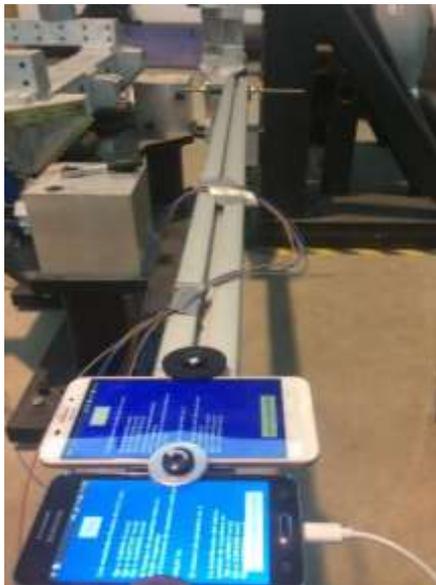


Ilustración 32. Brazo vibrante del banco *squeak & rattle*



Ilustración 33. Excitador Energy SILVER

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 se encuentra conectado a un ordenador mediante USB, de tal manera que, mediante un software específico del banco de *squeak & rattle*, se puede controlar las excitaciones a las que se somete el banco.

3.4.2. Acelerómetros instalados

Para poder controlar las vibraciones generadas, se han instalado en el sistema dos tipos de acelerómetros. Por una parte tenemos dos acelerómetros que se encargan de medir las vibraciones y mandar esta información como realimentación al propio banco de *squeak & rattle*, para que le permita conocer su estado de vibración en todo momento, pudiendo así modificar las vibraciones que se pretenden generar. Por otra parte, también se han instalado otros tres acelerómetros que se encuentran conectados al ordenador para que se puedan recoger las mediciones de las vibraciones generadas, de tal manera que se puedan tratar los datos y compararlos con los resultados obtenidos en la aplicación desarrollada

3.4.2.1 Acelerómetros de realimentación

Estos dos acelerómetros se encuentran conectados con el banco *squeak & rattle* mediante cables azules, para diferenciarlos del otro tipo de acelerómetros. El modelo utilizado es PCB 333B40, [35] correspondiente a un acelerómetro piezoeléctrico, cuyo funcionamiento se explica en el apartado 2.1.3 y, en este caso, cuenta con una interfaz con análisis de señales, adquisición de datos e instrumentos que nos permiten registrar los valores de aceleración medidos. Entre sus características técnicas se encuentran:

- Sensibilidad fijada mediante voltaje, sin tener en cuenta el tipo de cable que utilice ni su longitud.
- Señal de salida con baja impedancia, que se puede transmitir a lo largo de cables de longitud variable en entornos hostiles con una pérdida en la calidad de la señal mínima
- 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 va a depender de cómo se acople a la superficie vibrante, tal y como se puede observar en la siguiente figura:

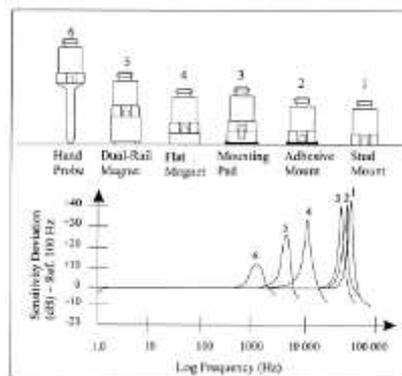


Ilustración 34. Sensibilidad del acelerómetro PCB 333B40 según su montaje

En nuestro caso se instalará mediante un disco de plástico y cera de abeja, al brazo vibrante de la siguiente forma:

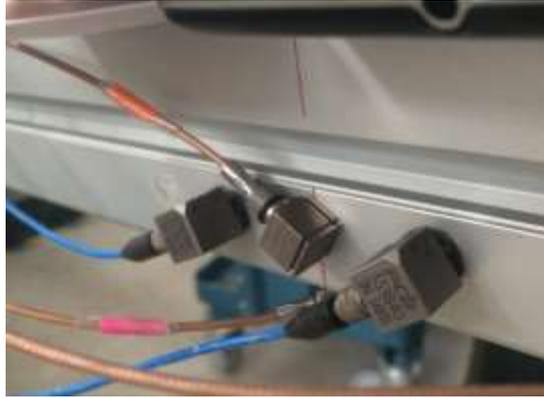


Ilustración 35. Instalación del montaje del acelerómetro PCB 333B40

3.4.2.2 Acelerómetros de medida de vibraciones

Estos acelerómetros se encuentran conectados al ordenador mediante cables marrones, para diferenciarlos del otro tipo de acelerómetros. El modelo utilizado es *Brüel & Kjaer 4507*, [36] correspondiente a un acelerómetro electrónico piezoeléctrico integrado.

Este tipo de acelerómetros se les denominan CCLD, un nombre genérico que identifica a todos aquellos acelerómetros y productos con acondicionamiento de la señal que opera con una alimentación constante de corriente y que obtienen señales de salida en forma de señales moduladas en voltaje. Permite utilizar cables de bajo coste sin afectar a la calidad de la señal de salida. Dentro del dispositivo está integrado un preamplificador de bajo ruido usando tecnologías de capa gruesa que incluye una referencia de voltaje que asegura un margen de error estable sobre el rango de temperaturas en el que opera.

Algunas de sus características técnicas son:

- Carcasa de titanio con un conector hermético de titanio también
- Fácilmente acoplable a diferentes objetos donde se evaluarán las vibraciones
- Baja sensibilidad en campos electromagnéticos de radio frecuencia
- Diseño con peso ligero que le da una alta relación sensibilidad-peso y una sensibilidad muy baja a factores ambientales.
- Excelente respuesta a baja frecuencia

Este tipo de acelerómetros están específicamente diseñado para medir en un ambiente hostil. Tiene una combinación de alta sensibilidad, bajo peso y pequeñas dimensiones, que mejora sus características de medición.

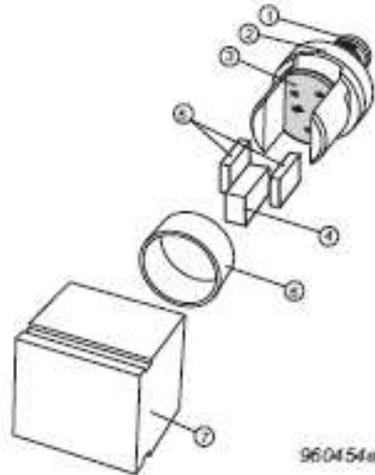


Ilustración 36. Estructura interna del acelerómetro B&K 4507

En esta estructura interna podemos observar un conector (1), como una pieza integrada de la pieza superior (2), que también contiene el preamplificador (3). El puntal cilíndrico ranurado sostiene una masa sísmica central (4) flanqueado por dos piezas piezoeléctricas (5). Este conjunto está sujeto por un anillo (6). Este conjunto está herméticamente soldado a la carcasa de titanio (7).

Dentro de la instalación del banco *squeak & rattle*, se instala un acelerómetro en cada eje sobre el brazo vibrador, pudiendo así distinguir los movimientos en las diferentes direcciones, tal y como adquirimos los datos procedentes de los sensores integrados en el dispositivo móvil. Con la instalación de estos acelerómetros se van a comparar los datos obtenidos a partir de éstos, y los de la aplicación desarrollada. Su instalación se puede apreciar en la siguiente figura:

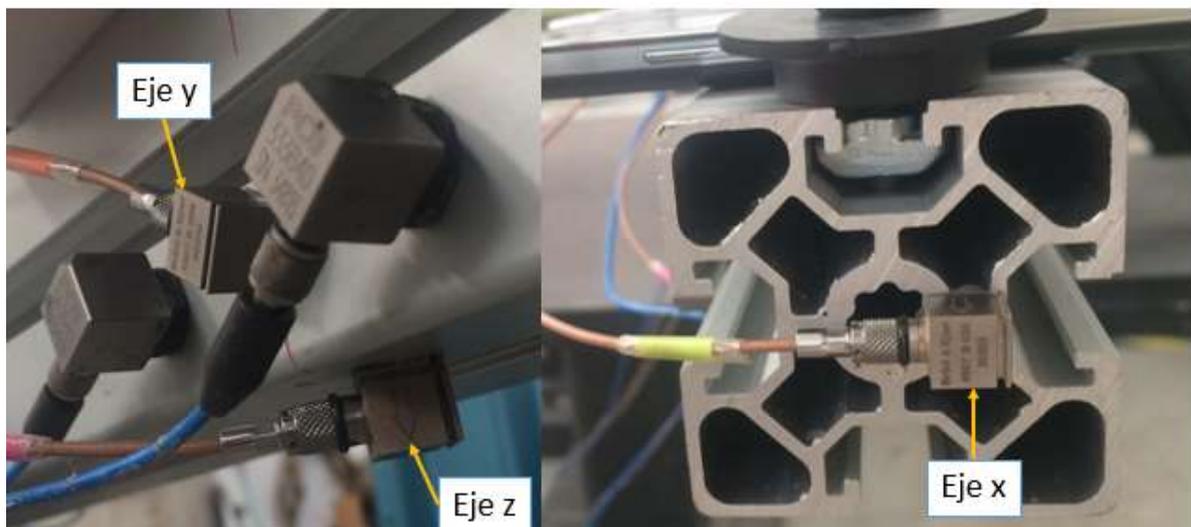


Ilustración 37. Instalación de los acelerómetros B&K 4507 de medición

Con ellos, a través de un software específico que se describirá más adelante, en este mismo capítulo, podremos obtener la medición de la aceleración en cada uno de los ejes y compararlo así con los resultados obtenidos en la aplicación.

3.5. Hardware de adquisición de datos National Instruments

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir un fenómeno físico con un ordenador. Un sistema DAQ consta de sensores, hardware de medidas y el software programable necesario para tratar los datos de las mediciones. [37] Un sistema de adquisición de datos consta de varias partes como se puede ver en la siguiente figura:



Ilustración 38. Estructura de un sistema DAQ

En primer lugar se necesitan sensores que, en nuestro caso, son acelerómetros, que se encuentran descritos en el apartado anterior 3.4.2.2.

En segundo lugar se debe utilizar un dispositivo DAQ, que en nuestro caso se trata de un sistema compacto. [38] Un sistema completo cDAQ requiere de un chasis, siendo el dispositivo NI cDAQ 9172 el utilizado en nuestros experimentos, y módulos de la serie C, concretamente del modelo NI 9234, para nuestros experimentos.



Ilustración 39. Sistema NI cDAQ 9172

La señal del sensor es digitalizada en el módulo y el chasis controla la temporización y la transferencia de datos para todo el sistema, por lo que dentro del chasis CompactDAQ se encuentra el controlador de temporización del sistema, lo que permite la sincronización de todos los módulos instalados en un solo chasis. Cada chasis CompactDAQ está equipado con cuatro chips de contador de uso general, a los que se puede acceder al instalar cualquiera de los módulos de E/S digital temporizadas por hardware, pudiendo tener hasta 8 canales.

El chasis tendrá de 8 a 14 ranuras con dos conexiones BNC en las partes laterales, que tienen un límite de ancho de banda de 1 MHz y que sirven para el enrutamiento de disparos para con el sistema CompactDAQ.

Este sistema va a ser la interfaz entre el ordenador y las señales provenientes de los acelerómetros. Para realizar esta función, va a digitalizar las señales analógicas para que las pueda procesar un

ordenador. Los tres pasos necesarios para esto son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC.



Ilustración 40. Conexión de los cables de los acelerómetros (3 ejes) con el módulo de serie C NI 9234

El acondicionamiento de señales es imprescindible puesto que las señales que se reciben pueden no ser aptas para medir directamente, por lo que es necesario manipularla de forma que el contenido y la calidad de la señal no quede dañada por estas modificaciones, haciendo que pueda ser acoplada a la entrada de un convertidor digital-analógico. Este circuito puede incorporar amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento. [39] En el caso de los acelerómetros el acondicionamiento que se necesita de la señal es su amplificación, filtrado excitación y alineamiento.

Para que una señal sea tratada por un equipo digital es necesario convertir la señal analógica en una señal digital, siendo necesario un chip ADC (Analog-Digital Converter), capaz de dar una representación digital de una señal analógica que varían continuamente en el tiempo, de tal forma que este dispositivo realizará un muestreo periódico de la señal cada cierto tiempo marcado por la frecuencia de muestreo. Estas muestras se transfieren al ordenador a través de un bus.

Los sistemas DAQ se conectan al ordenador a través de un puerto, de forma que el bus va a servir como la interfaz de comunicación entre el DAQ y el ordenador. Su función principal es la de reconstruir la señal original a través de las muestras digitales que se han obtenido del paso anterior. Hay varios tipos de buses que se elegirán según las necesidades de las mediciones y de su utilidad, tales como USB, PCI, PCI Express, Ethernet e incluso 802.11 Wi-fi que permite la comunicación inalámbrica entre el sistema DAQ y el ordenador.

3.6. Software propio del banco *squeak & rattle*

El software utilizado para el control y la medición de las vibraciones generadas sobre el banco de *squeak & rattle* tiene que ser específico y es proporcionada por la misma marca a la que corresponde dicho sistema. En las pruebas de validación de la aplicación se utilizan dos programas para hacer dos experimentos diferentes, por un lado *Sine Vibration Control* y por otro lado, *Random Vibration Control*.

3.6.1. Sine Vibration Control

Este software está proporcionado, como se indicaba anteriormente, por la marca Brüel & Kjaer. Es utilizado muy frecuentemente en pruebas de fatiga, ya que las pruebas que realiza consisten en concentrar toda la energía de excitación en una sola frecuencia, por ello en las pruebas realizadas a la aplicación, evaluará su comportamiento para las diferentes frecuencias.

Es capaz de crear una excitación con una señal de acondicionamiento de calidad analógica y parámetros de barrido que se pueden programar [40]. Estas vibraciones pretenden poder realizar una evaluación de las estructuras dinámicas de los dispositivos probados, midiendo de forma precisa la respuesta dinámica en las frecuencias de resonancia.

Los principales usos que se dan a este programa son las pruebas de onda sinusoidal escalonada para cumplir con las diversas normativas existentes en los distintos ámbitos; caracterización estructural dinámica y pruebas de fatiga y de durabilidad.

Otra de las características propias de este software es el tratamiento del dominio en tiempo real con una fuente sinusoidal con una calidad que se puede comparar a la analógica, basándose en la FFT (Fast Fourier Transform). Para poder identificar la función de transferencia del sistema se calcula mediante un pre-testeo con el espectro de banda ancha. Además se permite hacer las mediciones en magnitud y fase con hasta 2000 puntos en frecuencia.

Este test utiliza un ordenador para introducir los parámetros de configuración mediante una tabla en la que se puede especificar la aceleración, velocidad, o amplitud, y las frecuencias asociadas a cada test. Una vez establecidos estos parámetros del perfil de vibración, se crea una gráfica creada a partir de la tabla anterior donde se pueden ver reflejados los parámetros.

También se muestra el valor pico tanto de la aceleración, como de la velocidad así como el desplazamiento máximo pico a pico, medido. Integra un bucle de tiempo rápido de 10 ms para un control más exacto de las resonancias y también dispone de filtros de rastreo digitales con un ancho de banda que puede ser fijo o variable, proporcional a la frecuencia.



Ilustración 41. Sine Vibration Control. Tabla de parámetros que definen el perfil del experimento

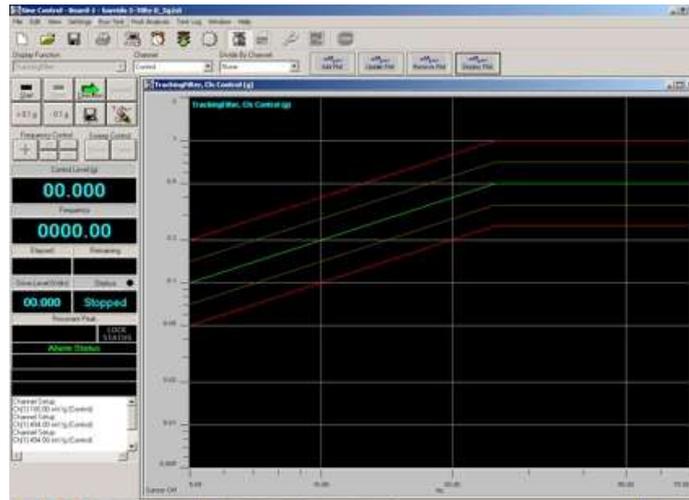


Ilustración 42. Sine Vibration Control. Gráfica del perfil del experimento

3.6.2. Random Vibration Control

Se trata de un software que, al igual que *Sine Vibration Control*, ha sido diseñado por la marca Brüel & Kjaer.[41] Es capaz de barrer un gran rango de vibraciones reales, excitando simultáneamente todas las frecuencias de resonancia, lo que le hace muy útil para los ensayos y los tests para la caracterización de estructuras dinámicas. Se realiza un bucle rápido en el tiempo, lo que permite obtener una gran exactitud de los datos. También permite control varios canales simultáneamente y realizar análisis en tiempo real.

Este software es utilizado en varios escenarios entre los que se encuentran la simulación de vibraciones sufridas por ensamblajes en coches, vehículos militares y naves espaciales, réplica de medidas de campo, pruebas de producción, exámenes de estrés, pruebas de prototipos y evaluación de los estándares de calidad de ciertos productos.

Un test aleatorio como los que genera este programa, se define introduciendo una densidad espectral de potencia a través de una tabla de puntos de interrupción o importando datos reales. Esta tabla consiste en la definición de amplitudes de densidad espectral de potencia y las frecuencias asociadas considerando las distintas pendientes. Se mostrará por pantalla el valor r.m.s. total, el máximo desplazamiento pico a pico y la velocidad pico máxima para el experimento realizado.

Es necesario especificar la resolución espectral en términos de FFT, de tal manera que cuanto mayor sea el número de puntos, más pequeña será la diferencia entre dos frecuencias consecutivas. Se permite aumentar la resolución espectral a expensas del número de canales de entrada.

El software integra algoritmos de control de procesamiento rápido que proporcionará un control seguro y preciso del bucle cerrado del experimento. En el caso de que los experimentos realizados sobrepasen los límites del sistema, el software notificará una advertencia al operario, de tal forma que si fuera necesario, el sistema pararía el experimento por razones de seguridad y para mantener el control del banco de vibraciones utilizado.

A continuación se ven algunas imágenes del funcionamiento del software.

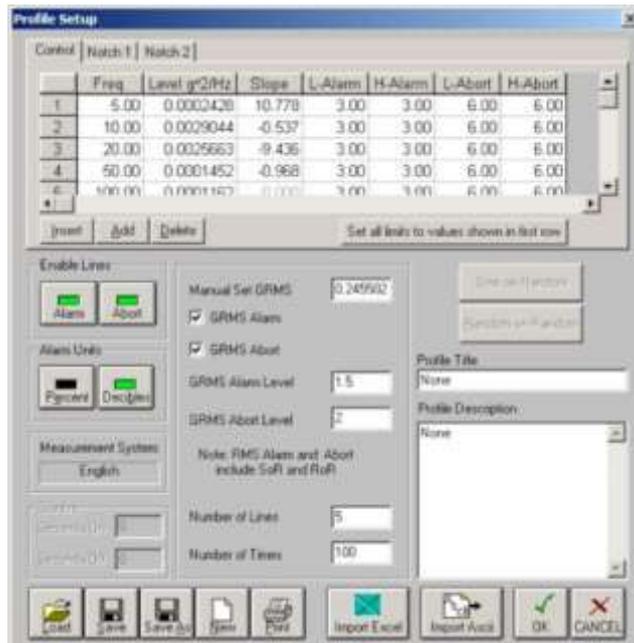


Ilustración 43. Random Vibration Control. Tabla de parámetros que definen el perfil del experimento

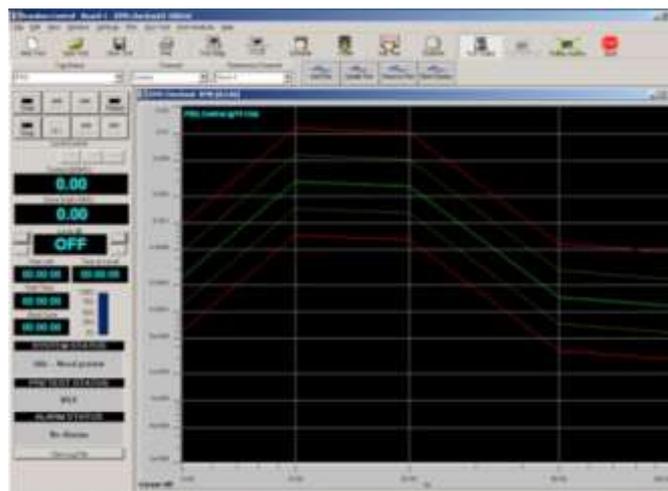


Ilustración 44. Random Vibration Control. Gráfica del perfil del experimento

3.7. Software *Signal Express* de *National Instruments*

El software *Signal Express* ha sido diseñado por la marca *National Instruments*, que nos va a permitir conocer los datos que miden los acelerómetros mientras están siendo tomados, sin que tengan que ser almacenados. Para que este software sea lo efectivo es necesario que sea compatible con la tarjeta de adquisición de datos, como ocurre 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 [42]. 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 *SignalExpress* permite realizar estas acciones con una gran facilidad de uso ya que aquellos que quieran adquirir y analizar señales no van a tener que programar ninguna aplicación. A continuación se muestra una captura de pantalla representativo del programa:

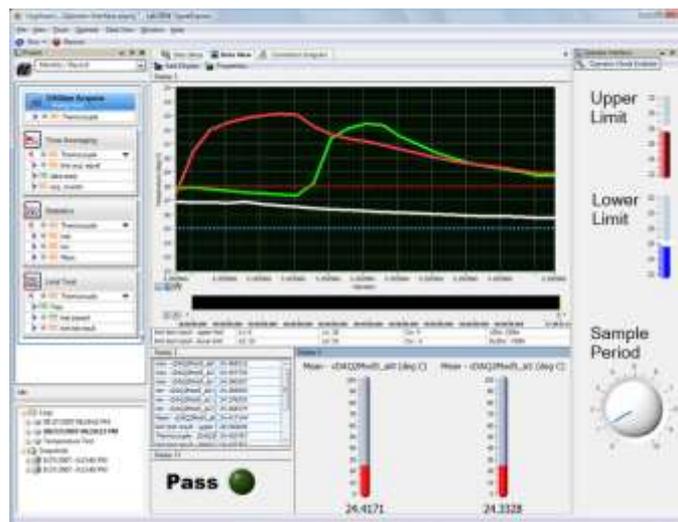
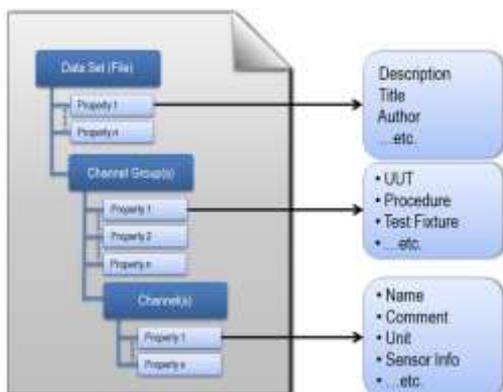


Ilustración 45. Captura de pantalla del funcionamiento de NI SignalExpress

Como se puede apreciar en la ilustración anterior, en la parte izquierda de la pantalla podemos ver una vista del proyecto que se está manejando, dentro del cual hay varios bloques, cada uno de los cuales va a corresponder con los diferentes cálculos o análisis que el programa realiza en tiempo real con las mediciones que le llegan procedentes de los sensores. En cada bloque se va a indicar tanto su función como los datos de entrada a la misma y la forma y el lugar en el que se van a mostrar los datos de salida o resultados obtenidos. Bajo la vista de proyecto se puede ver los directorios y ficheros relativos al proyecto que se están generando o ya se han generado durante las mediciones realizadas. La ventana central se reserva para mostrar los resultados de las mediciones realizadas principalmente, aunque es una ventana en la que se pueden abrir varias pestañas, donde también es posible modificar algunos parámetros del programa. Los resultados se pueden mostrar de formas diferentes con displays de distinto tipo, tales como indicadores, barras, gráficas o tablas entre otros. Es posible mostrar una ventana con la ayuda del programa que nos definirá las funciones que tiene y cómo utilizarla de forma correcta para hacer las medidas y experimentos que se vayan a llevar a cabo

El software SignalExpress también da la posibilidad de convertir sus proyectos a código de LabView y de exportar los datos mediante Microsoft Excel u otros programas, dando formato a estos resultados para facilitar su visualización y el tratamiento de los mismos. Incorpora también la utilidad de escribir los datos en formato TDMS (Technical Data Management Streaming).

Normalmente la información que se captura en tiempo real, no es capaz de registrar toda la información técnica del experimento realizado ya que no contiene información descriptiva suficiente del mismo, por esta razón National Instrument [43] ha desarrollado una solución de Gestión de Transmisión de Datos Técnicos (TDMS). Estos ficheros TDMS tienen la siguiente estructura de datos:



```

Date 04/12/2016
Time 14:24
Y_Unit_Label Band power (dB ref
1.00 g)
X_Dimension Frequency (Hz)
***End_of_Header***
X_Values Y_Values
0,500000 -87,098015
0,630000 -92,254085
0,800000 -87,840167
1,000000 -88,136815
1,250000 -90,124680
1,600000 -89,699886
2,000000 -92,901356
2,500000 -92,258006
3,150000 -93,262114
4,000000 -93,148629
5,000000 -90,737966
6,300000 -85,413049
8,000000 -45,618659
10,000000 -16,471448
12,500000 -37,198964
16,000000 -62,986033

```

Ilustración 46. Estructura de datos TDMS Ilustración 47. Ejemplo de exportación de datos en SignalExpress

Como podemos observar este formato incluye información descriptiva a los datos para permitir una documentación completa que permitirán facilitar la búsqueda y agilizar el análisis mediante otras herramientas de tratamiento de datos.

SignalExpress se utiliza en conjunto con el software DAQ Assistant, una guía gráfica e interactiva para configurar, evaluar y adquirir datos de medida. Con esto es posible que de una manera muy accesible se genere todo el código que deriva de nuestra configuración, acelerando el desarrollo de tareas complejas.

3.8. Software Android Studio

El software Android Studio es el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial que nos permite desarrollar aplicaciones para Android. Está basado en IntelliJ IDEA[44], un entorno de desarrollo integrado cuya finalidad es el desarrollo de programas informáticos, pertenece a la empresa JetBrains. Android Studio ofrece todas las herramientas de IntelliJ IDEA, un potente editor de códigos y otra multitud de utilidades que hace que este sea uno de los entornos más utilizados para el desarrollo de aplicaciones de Android.

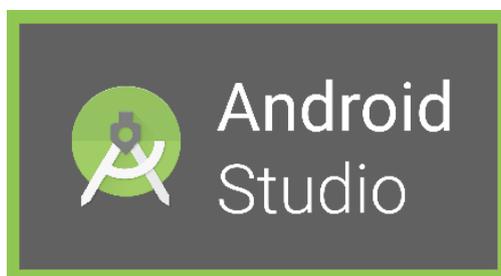


Ilustración 48. Software Android Studio para el desarrollo de aplicaciones en Android

Para comenzar a utilizar Android Studio debemos conocer la estructura del proyecto a desarrollar. El proyecto incluye varios módulos entre los que se incluyen [45]:

- Módulos de apps para Android
- Módulos de bibliotecas

- Módulos de Google App Engine

Cada módulo tiene las siguientes carpetas:

- **manifest:** contiene el fichero AndroidManifest.xml, un fichero de configuración donde podemos aplicar las configuraciones de la app a desarrollar. Su configuración puede modificarse a través tanto de una interfaz gráfica, como del propio fichero .xml, aunque para ello es necesario conocer la sintaxis que se utiliza en él. Está situado en la raíz de cada aplicación.
- **java:** contiene los archivos de código fuente de Java.
- **res:** contiene todos los recursos utilizados en el desarrollo de la aplicación, tales como imágenes, cadenas de caracteres, valores numéricos, etc.

Además, todos los archivos de compilación son visibles en el nivel superior de secuencias de comando de Gradles.

La interfaz de usuario utilizada por Android Studio es el siguiente:

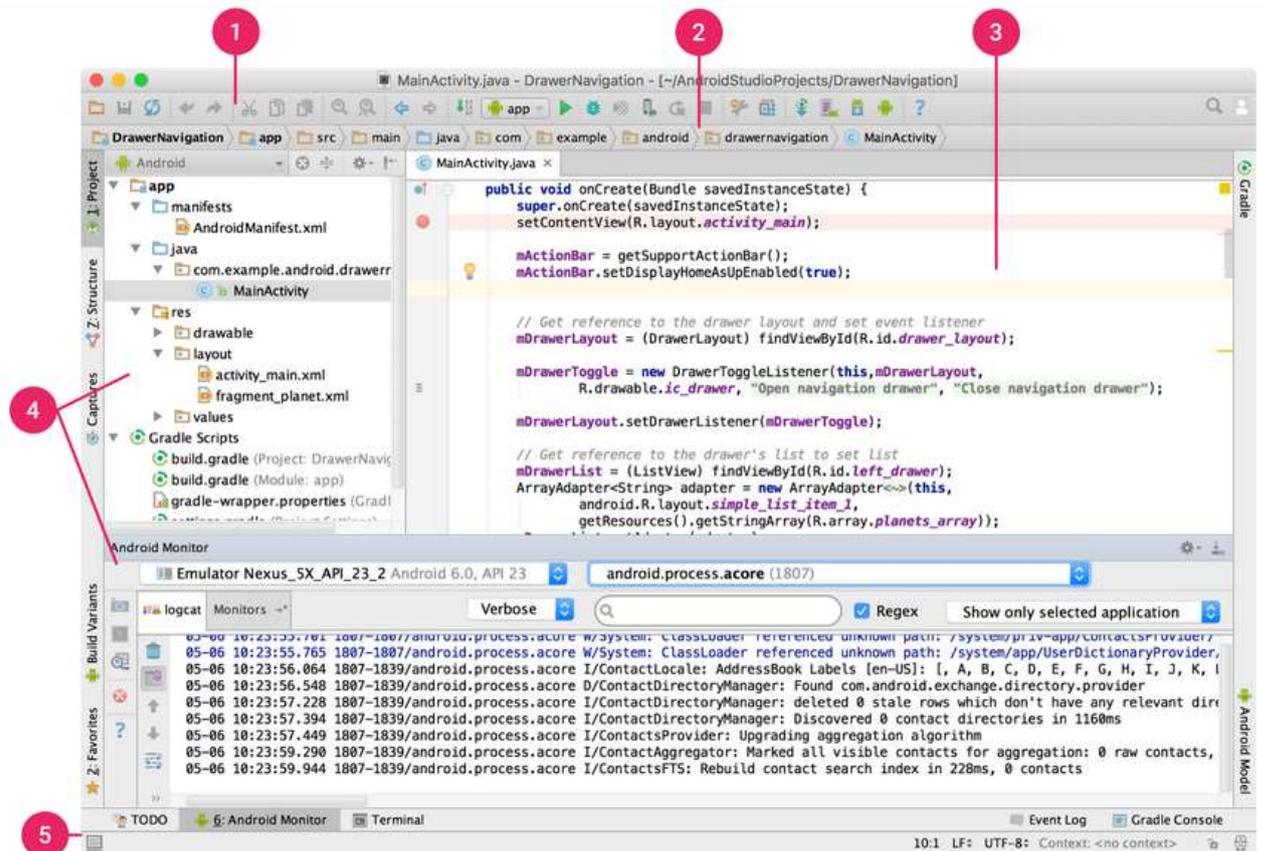


Ilustración 49. Interfaz de usuario Android Studio

A continuación se describirán las diferentes partes de la interfaz, a través de los números marcados sobre la figura anterior.

1. Barra de herramienta: permite una gran cantidad de acciones tales como sincronizar, guardar el proyecto, ejecutar la aplicación o la configuración de los terminales virtuales.
2. Barra de navegación: nos permite movernos en el proyecto, de forma que se ve la estructura jerárquica del proyecto, conociendo las carpetas en las que se almacenan los ficheros que constituyen la aplicación.

3. Ventana del editor: es el campo en el que se puede modificar el código, aunque en ocasiones, tales como los ficheros .xml que definen el diseño de la aplicación, se puede visualizar un editor de diseño propio donde poder observar cómo se están distribuyendo los elementos en la pantalla del terminal.
4. Ventana de herramientas: por un lado en la parte izquierda, nos encontramos con una ventana que nos permite administrar el proyecto y los ficheros que lo componen. Por otro lado, en la parte inferior nos encontramos con otra herramienta denominada Android Monitor, que nos da cuenta constantemente de la información que nos está mandando el terminal, y que también nos permite ir comprobando los resultados parciales que la aplicación está obteniendo, antes de conocer los resultados finales de la misma.
5. Barra de estado: muestra el estado del entorno integrado de desarrollo así como el estado del proyecto, además de algún tipo de advertencia o de mensaje con los posibles errores que se vayan a producir.

Android Studio usa Gradle como base del sistema de compilación. Este sistema de compilación se ejecuta en una herramienta integrada e independiente de la línea de comandos, que nos permite, sin modificar los ficheros de la aplicación desarrollada, hacer variaciones en el proceso de compilación, crear varios APK para un mismo proyecto o reutilizar código entre otras utilidades.

Los ficheros de compilación se llaman build.gradle, se trata de archivos de texto sin formato que configuran la compilación con elementos proporcionados por el complemento de Android para Gradle.

3.9. Software MATLAB usado para el procesamiento de los datos

MATLAB es una herramienta software utilizada, en este caso para el procesamiento de datos, aunque tiene muchas utilidades más tales como aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial o diseño de control, entre otros muchos campos. Se trata de una plataforma que se dedica a resolver problemas de ingeniería [46]. MATLAB cuenta también con su propio Entorno de Desarrollo Integrado (IDE).

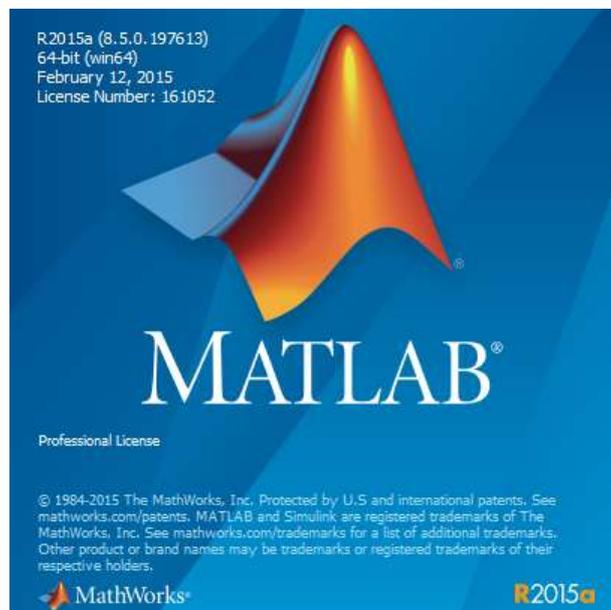


Ilustración 50. Herramienta de software MATLAB para procesamiento de datos

El lenguaje de MATLAB, que está basado en matrices, para expresar las matemáticas computacionales, se denomina el lenguaje M. [47] A partir de estos datos, almacenados en matrices es capaz de sacar gráficos que nos permitan una visualización de los datos y la obtención

más fácil de conclusiones a partir de ellos. Además cuenta con una amplia colección de toolboxes que nos permiten utilizar un gran número de algoritmos esenciales, que nos facilitarán la tarea a la hora de manejar los datos. La versión utilizada en este caso es la MATLAB R2015a.

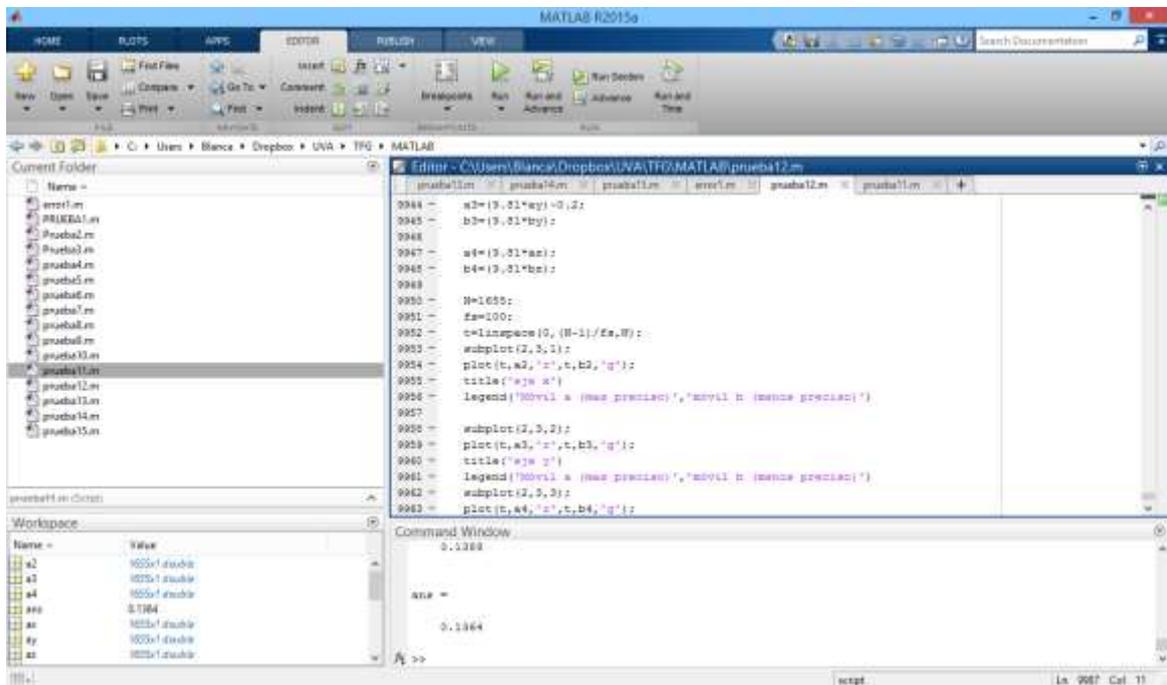


Ilustración 51. Ejemplo de funcionamiento del entorno de programación de MATLAB

En este proyecto, esta herramienta se ha utilizado para la validación de los datos de aceleración al compararlos con datos proporcionados por otras aplicaciones, así como para comprobar que el algoritmo utilizado para el cálculo de la FFT funciona correctamente.

[47]La explicación de las funciones y bibliotecas con las que cuenta MATLAB se encuentran explicadas en la documentación que está disponible en la web de este software, incluyendo la sintaxis de cada una de las clases y los métodos que se pueden utilizar, y ejemplos de los mismos.

3.10. Tractor New Holland TM 190

Las pruebas de campo se realizaron sobre un tractor del modelo New Holland TM 190, sobre el cual se instalaron tanto los acelerómetros profesionales con el sistema de adquisición de datos, como los *smartphones*.

Este vehículo, pertenece a la marca New Holland, con sede actualmente en Estados Unidos. Se trata de una marca cuyos equipos agrícolas son vendidos en todo el mundo y pertenece a la empresa Fiat Industrial S.p.A.

El New Holland TM 190 tiene una potencia de 142 KW y una velocidad máxima de 40 km/h, aunque en los experimentos realizados en este proyecto se utilizan velocidades más reducidas entorno a los 10 km/h aproximadamente.

Sus dimensiones son 4.84 m x 1.84 m x 2.98 m y tiene un peso de 6.5 toneladas.

Para hacer los experimentos, el vehículo no tenía agregado ningún apero agrícola. Debemos tener en cuenta que la anexión de este tipo de aperos puede afectar al valor de dosis de vibración que se está midiendo, puesto que modifican la estructura del vehículo, así como el reparto del peso sobre él.



Ilustración 52. Vehículo New Holland TM 190 durante la realización de las pruebas de campo

3.11. Conclusiones

En este capítulo se han descrito con precisión los materiales utilizados en este proyecto con la finalidad de conocer tanto su funcionamiento como sus limitaciones, puesto que al hacer los experimentos y las pruebas, varios de estos equipos o sistemas van a tener que trabajar juntos para que se puedan obtener los datos que necesitamos, por lo que es necesario evitar que el mal uso o mal funcionamiento de cualquiera de estos elementos constituyan una fuente de error.

Esto nos podría llevar a pensar que el error está en la aplicación y no en el equipo de medida, por lo que este análisis ha pretendido conocer más a fondo y evaluar si estos equipos son válidos para este proyecto, de tal forma, que al hacer las pruebas podamos fiarnos de los resultados que obtenemos.

Capítulo 4. Desarrollo de la aplicación

En este capítulo se va a describir minuciosamente todos los pasos que se han seguido para el desarrollo de la aplicación. En primer lugar se especifican los requisitos mínimos que debe tener el dispositivo móvil en el que se va a instalar la aplicación para que funcione de un modo correcto. A continuación se explicará de qué manera se adquieren los datos de la aceleración del dispositivo, en qué API se basan y cómo se implementa dicho código en la aplicación. Para cerrar el capítulo se expondrá el tratamiento que se le ha dado a los datos adquiridos para llegar a las medidas finales que nos permitirán hacernos una idea de a qué niveles de vibración está expuesta la persona que conduce el tractor que ha sido objeto de la medida durante un determinado periodo de tiempo.

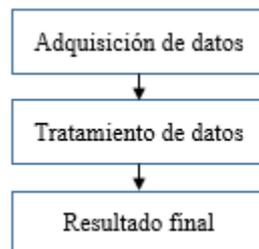
4.1. Requisitos del dispositivo móvil

Para que la aplicación funcione correctamente sobre el dispositivo y de unos resultados fiables en cuanto a la medición de vibraciones, es necesario que el dispositivo en el que se instala la aplicación cumpla una serie de requisitos:

- Tener instalado el sistema operativo Android en una versión 4.0 o superior.
- Integrar un sensor de aceleración o acelerómetro en el dispositivo
- Alcanzar una frecuencia de muestreo mínima de 100 Hz
- Disponer de 4 MB de memoria

4.2. Estructura de la aplicación

La aplicación tiene como objetivo realizar una medición de las vibraciones que afectan a los trabajadores que se ocupan de la conducción de maquinaria agrícola. Para ello en primer lugar se tomarán los datos procedentes del acelerómetro integrado en el dispositivo, para a continuación, realizar los cálculos oportunos sobre dichos datos para llegar así al resultado final.



El resultado obtenido nos permitirá conocer el alcance de las vibraciones para poder así determinar si éstas tendrán efectos nocivos sobre la salud del trabajador basándonos en la legislación vigente.

4.3. La adquisición de los datos

Los primeros pasos que se han dado en la aplicación son la toma de datos desde el acelerómetro de los dispositivos móviles de Android. En primer lugar se va a explicar el funcionamiento de los sensores con los que cuenta el dispositivo de Android, qué valores son los que se van a obtener de ellos y cómo se relacionan con las medidas de las vibraciones de cuerpo entero que queremos hacer. Seguidamente se describirá la implementación de estos pasos en los que se adquieren los datos en la aplicación. Para finalizar este apartado se explicará la problemática existente a la hora de elegir la tasa de adquisición de datos y las posibles soluciones que se le pueden dar.

4.3.1. Sensores de Android

La gran mayoría de dispositivos que integran el sistema operativo de Android, incorporan sensores que son capaces de medir el movimiento, la orientación y otras características del ambiente que lo rodean. Estos sensores proporcionan datos de gran precisión y exactitud, que tienen muchas utilidades, siendo la más conocida el cambio de orientación de la pantalla cuando giramos el dispositivo o la captación de gestos del usuario para determinados juegos [20].

Android soporta tres tipos de sensores:

- Sensores de movimiento: miden las fuerzas de aceleración y las fuerzas rotacionales a lo largo de los tres ejes. En esta categoría se incluyen el acelerómetro, sensores de gravedad, giroscopios y sensores de rotación.
- Sensores ambientales: en este caso se miden factores del entorno que rodea al dispositivo, tales como la temperatura ambiente, la presión, la iluminación y la humedad, para ello los sensores que incluye son barómetros, fotómetros y termómetros.
- Sensores de posición: mide la posición física del dispositivo, incluyendo sensores de orientación y magnetómetros.

Se puede acceder a los sensores del dispositivo y obtener sus datos, a través del Framework de Android, ya que proporciona diversas clases e interfaces que lo permiten.

Algunos de los sensores se basan en el hardware del dispositivo, mientras que otros se basan en el software. Aquellos que se basan en el hardware son componentes físicos que se encuentran dentro de los elementos electrónicos del dispositivo, al que le transfieren los datos que registran.

Por otra parte, aquellos sensores basados en software, no son elementos físicos que se integran en el dispositivo sino que imitan el comportamiento de los de los sensores hardware, es decir, toman los datos de algunos de estos sensores y los interpretan de forma que obtienen valores de otras magnitudes relativas.

En nuestro caso, el sensor que vamos a utilizar es el acelerómetro, que se basa en hardware y mide la aceleración en m/s^2 , que tiene lugar sobre los tres ejes (x, y y z), incluyendo la fuerza de la gravedad. Además los datos resultante son calibrados mediante compensación de temperatura y calibraciones en escala que tienen lugar de forma *online* mientras el sensor no está siendo utilizado, para evitar así saltos en los valores durante la toma de datos.

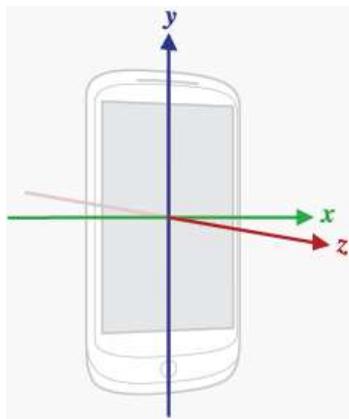


Ilustración 53. Ejes de medida de la vibración del dispositivo

Los datos se toman en función de los ejes del dispositivo que están dispuestos de la siguiente manera [21]:

Este sistema funciona de esta forma:

- Los valores del eje X aumentan hacia la derecha del dispositivo
- Los valores del eje Y aumentan hacia la parte de delante del dispositivo
- Los valores del eje Z aumentan hacia arriba del dispositivo

El Framework de sensores que utiliza Android nos va permitir obtener los valores de los sensores de los que disponga el dispositivo [22]. Este framework es parte del paquete *android.hardware* e incluye las siguientes clases e interfaces:

- **Sensor Manager:** se utiliza esta clase para crear una instancia del servicio de los sensores, además proporciona varios métodos para acceder a los sensores y registrar los detectores de eventos. Además también se obtienen diversos valores constantes que se utilizarán para determinar la tasa de adquisición de datos y la precisión del sensor.
- **Sensor:** Se usa esta clase para crear una instancia de un sensor específico, de tal forma que se proporcionan también varios métodos que te permiten determinar las capacidades que tiene el sensor en cuestión.
- **SensorEvent:** el sistema utiliza esta clase para crear un objeto que informe sobre los eventos del sensor, tales como los valores propios del sensor, el tipo de sensor que genera el evento o la precisión de los datos entre otros.
- **SensorEventListener:** en este caso, se trata de una interfaz que se utiliza para crear dos métodos que reciben notificaciones siempre que el valor del sensor cambia o que la precisión del sensor varíe.

[22]En una aplicación que utilice sensores, se debe monitorizar los eventos que tienen lugar en él. Un evento ocurre en un sensor siempre que se detecte un cambio en alguno de los parámetros a medir. Cada evento nos da 4 informaciones:

- El nombre del sensor que provoca el evento
- El momento en el que tiene lugar
- La precisión del evento
- El valor del sensor donde tiene lugar dicho evento.

En nuestro caso, el sensor que utiliza esta aplicación, el acelerómetro, está integrado en todos los dispositivos desde las versiones más tempranas de Android.

4.3.2. Implementación en la aplicación desarrollada

Por todo ello, el primer paso que se realiza en el desarrollo de esta aplicación es la toma de datos de los valores del acelerómetro. Para poder utilizar el sensor de aceleración seguimos los siguientes pasos:

Para manejar el acelerómetro de Android, en primer lugar al crear la actividad, ésta deberá implementar la interfaz `SensorEventListener`, de tal forma que se puedan registrar los cambios en los valores del sensor.

Es necesario declarar tanto el sensor como el gestor de sensores que vamos a utilizar:

```
Sensor sensores;  
SensorManager sm;
```

A continuación hay que obtener una instancia de la clase `SensorManager` llamando a la función `Context.getSystemService()` con el argumento `SENSOR_SERVICE`; de tal forma que nos

devuelva un servicio a nivel de sistema, en este caso, el servicio es poder usar los sensores del sistema:

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

Para usar el objeto de la clase SensorManager hay que solicitar instancias del tipo de sensor que queremos, que en este caso es el acelerómetro. Para ello se utilizará la función getDefaultSensor() siendo el argumento de la función el tipo de sensor del acelerómetro, es decir, Sensor_TYPE_ACCELEROMETER.

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

También es necesario registrar el SensorEventListener, que es el detector de eventos del sensor, una interfaz utilizada para recibir notificaciones procedentes del SensorManager para una frecuencia de muestreo dada, que en este caso viene dado por una constante, cuyo significado se explica en el siguiente apartado:

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

Por último la interfaz SensorEventListener, nos hará implementar dos métodos:

- OnAccuracyChanged en la cual implementamos todo aquello que se vaya a realizar cuando se cambia la precisión de los valores del sensor que utilizamos.
- OnSensorChanged en la cual implementamos las acciones que tendrán lugar cuando un sensor experimente un cambio. En nuestro caso es este método el que recogerá los datos y realizará los cálculos oportunos.

Dentro de este método OnSensorChanged, es donde vamos a recoger los datos procedentes de los sensores de la siguiente forma:

```
double ejex = event.values[0];  
double ejey = event.values[1];  
double ejez = event.values[2];
```

De forma que estos datos se van a ir almacenando en un ArrayList cuya longitud va a ir aumentando conforme se vayan cogiendo los datos, para luego pasarlos a un array de la clase Complex, explicada anteriormente, que será lo que le pasemos a la clase FFT para que realice el cálculo.

4.3.3. Tasa de adquisición de datos

La tasa de adquisición de datos, es a lo que nos referimos como tasa o frecuencia de muestreo, es decir, el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para obtener una señal discreta.

Para seleccionarla debemos tener en cuenta que las vibraciones de cuerpo entero, que son aquellas que nos interesan para la aplicación que se va a desarrollar, abarcan un rango de entre 0,5 Hz y 80 Hz.

El teorema de Nyquist-Shannon [23], indica que para poder reproducir con exactitud la forma de una onda, es necesario, por una parte, que la señal tenga una banda limitada y, por otra parte, que

la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia de la señal de interés. Por ello, lo ideal sería que, puesto que la frecuencia máxima de la señal que estamos tratando, es de 80 Hz, la frecuencia de muestro mínima para poder reproducir la señal de forma exacta sería de un mínimo de 160 Hz.

Si esto no ocurre, se produciría el aliasing o el solapamiento de espectro, lo que significa, que al pasar la señal muestreada al dominio de la frecuencia su espectro se solapará con las réplicas que aparecen en frecuencia, haciendo que, posteriormente, a la hora de reconstruir o tratar la señal, nos sea imposible hacerlo con la exactitud deseada

En el siguiente ejemplo podemos ver la primera figura en la que no hay aliasing, porque la frecuencia de muestreo es mayor que el doble de la frecuencia máxima de la señal:

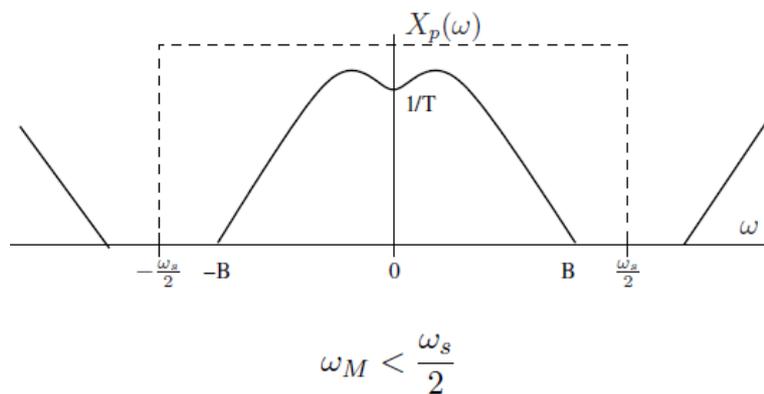


Ilustración 54. Ejemplo de señal en frecuencia muestreada sin aliasing

Por otra parte, en esta segunda figura, se puede ver un ejemplo en el que hay aliasing, debido a que la frecuencia de muestreo es menor que el doble de la frecuencia máxima de la señal de interés.

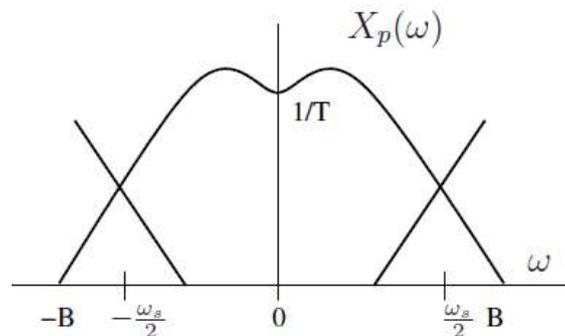


Ilustración 55. Ejemplo de señal en frecuencia muestreada con aliasing

Una vez se conoce esta restricción debemos seleccionar la frecuencia de muestreo para la aplicación. Cada dispositivo de Android, utiliza tasas de adquisición de datos de los sensores diferentes, puesto que tienen hardware distintos entre sí.

A la hora de programar la aplicación, el código se ejecutará en distintos dispositivos, por lo que no podemos especificar una cifra exacta para todos [24]. Como se ha comentado anteriormente, la clase SensorManager proporciona una serie de valores constante propios que cada dispositivo. Respecto a la frecuencia de muestreo los valores constantes que nos proporciona esta clase son los siguientes:

- **SENSOR_DELAY_IU:** frecuencia específica para la actualización de las características de interfaz de usuario.
- **SENSOR_DELAY_NORMAL:** Especifica la tasa por defecto.
- **SENSOR_DELAY_GAME:** Selecciona una tasa de muestreo adecuada para su uso en el control de juegos.
- **SENSOR_DELAY_FASTEST:** Especifica la frecuencia más rápida posible de actualización del sensor.

Device	Fastest
Nexus 1	24.45 Hz
Sony Ericsonx10 mini	94.77 Hz
Motorola Droid X	5.19 Hz
Motorola Droid X2	6.23 Hz
ZTE Blade	9.11 Hz
HTC Nexus One	24.86 Hz
HTC Evo 4G	37.54 Hz
HTC Wildfire	38.40 Hz
HTC Desire	47.27 Hz
LG Nexus S	49.44 Hz
Samsung Galaxy S2	96.03 Hz
Samsung Galaxy Nexus	99.8 Hz
Samsung Note II	100 Hz
Samsung Galaxy Core II	100 Hz
Samsung Galaxy Teos	109.42 Hz
LG Nexus 4	198 Hz

Ilustración 56. Frecuencias de muestreo máximas de varios dispositivos móviles

Los dispositivos más nuevos, pueden llegar a frecuencias de muestreo bastante altas, pero en aquellos que tienen una determinada antigüedad, las frecuencias de muestreo son bastante más bajas. A continuación se especifican aquellos valores experimentales de frecuencia de muestreo más altas, es decir, el valor de **SENSOR_DELAY_FASTEST** de cada uno de estos dispositivos:

Como mínimo, se puede determinar que debe haber una frecuencia de muestreo mínima que pueda dar una fiabilidad de los datos. Teniendo en cuenta que el rango de frecuencias que se manejan dentro de las vibraciones de cuerpo entero está entre 0,5 Hz y 80 Hz, si utilizamos una frecuencia de muestreo de aproximadamente 100 Hz, se respetarán los datos de hasta 50 Hz, que nos dará la fiabilidad suficiente para obtener unos datos realistas.

4.4. Tratamiento de los datos

En este apartado se van a describir los pasos que se dan para, a partir de los datos de aceleración que los sensores nos ofrecen, obtener las medidas finales que nos darán una idea de a qué nivel las vibraciones afectarán a la salud del cuerpo de la persona expuesta y si éstas están dentro de los márgenes de la legislación. Los pasos a seguir son los siguientes:

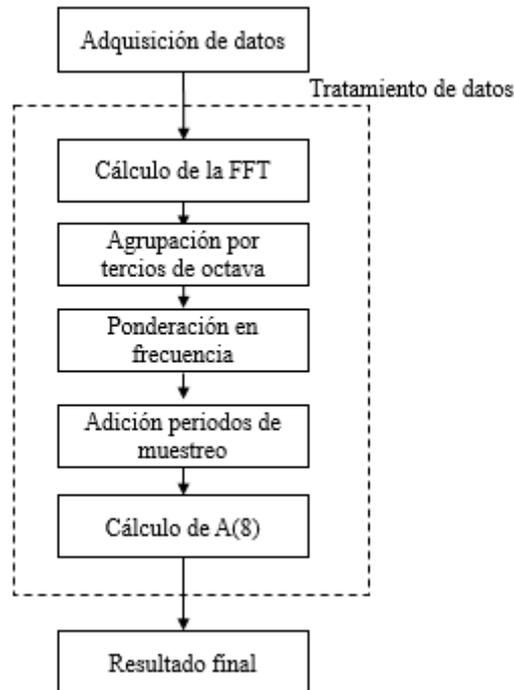


Ilustración 57. Procedimiento de cálculo a seguir para llegar a la medida final

En este capítulo se analizarán teóricamente cada uno de estos pasos, para, más tarde, explicar su implementación en el código de la aplicación.

4.4.1. Cálculo de la FFT

Como se puede apreciar en el esquema anterior el primer paso por el que pasan los datos es un paso al dominio de la frecuencia. En nuestro caso, se va a trabajar con datos discretos pues son el tipo de datos de aceleración de los que disponemos y también el tipo de datos que necesitamos para poder realizar cálculos con ellos en la aplicación.

La transformada de Fourier toma una señal en el dominio del tiempo y la pasa al dominio de la frecuencia, y tiene una amplia variedad de aplicaciones en los campos de la física y de la ingeniería, permitiéndonos conocer la amplitud de la señal en cada una de las frecuencias que ésta abarca.

La transformada discreta de Fourier o DFT es la equivalente de la transformada de Fourier continua, para señales que solo se conocen en N instantes separados por un tiempo T .

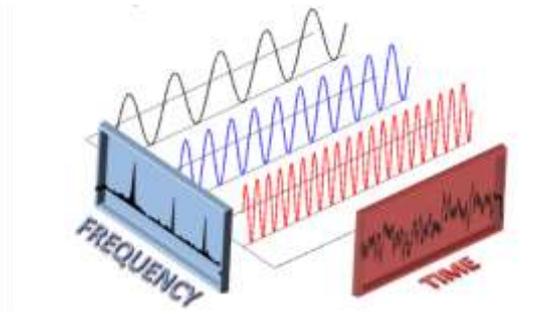


Ilustración 58. Esquema del significado de la Transformada de Fourier en una señal

Los resultados de la DFT de una secuencia se pueden interpretar desde dos puntos de vista, por un lado, como los coeficientes espectrales de una señal periódica discreta cuyos muestreos coincidan con la secuencia o, por otra parte, como el espectro de una señal aperiódica discreta cuyos muestreos corresponden a dicha secuencia.

4.4.1.1 Fundamentación Teórica

La DFT es una aproximación al espectro de la señal analógica original y su magnitud se ve influenciada por el intervalo de muestreo mientras que su fase depende de los instantes de muestreo [25].

La importancia de la DFT se encuentra en que es posible utilizar un algoritmo llamado FFT (Fast Fourier Transform), que lo realiza de forma eficiente y rápida. La definición de la DFT es la siguiente:

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

Una primera aproximación al cálculo de la DFT requeriría la suma compleja de N multiplicaciones complejas para cada una de las salidas, es decir, un total de N^2 , multiplicaciones complejas y de N^2 sumas complejas para realizar una DFT de N puntos. El algoritmo de la FFT consigue reducir considerablemente el número de operaciones en este cálculo -[26]. Para ello se descompone la suma realizada en la DFT en dos sumas cada una con la mitad del número total de muestras y se realiza la decimación del tiempo, un proceso que consiste en expresar la suma de la DFT como dos sumas separadas en las que respectivamente se procesan las muestras pares y las impares siguiendo el siguiente proceso

$$X_1(n) = \sum_{k=0}^{N/2-1} x_{2k} W_N^{2nk} + \sum_{k=0}^{N/2-1} x_{2k+1} W_N^{(2k+1)n}$$

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

se llega a la suma de dos DFTs de longitud $N/2$

$$X_1(n) = \sum_{k=0}^{N/2-1} x_{2k} W_N^{2nk} + W_N^n \sum_{k=0}^{N/2-1} x_{2k+1} W_N^{(2k)n}$$

Para explicar el desarrollo de la FFT se toma como ejemplo los cálculos realizados cuando $N=4$, de forma que la ecuación que definía la FFT se convierte en lo siguiente:

$$\begin{aligned}
X(0) &= x_0(0)W^0 + x_0(1)W^0 + x_0(2)W^0 + x_0(3)W^0 \\
X(1) &= x_0(0)W^0 + x_0(1)W^1 + x_0(2)W^2 + x_0(3)W^3 \\
X(2) &= x_0(0)W^0 + x_0(1)W^2 + x_0(2)W^4 + x_0(3)W^6 \\
X(3) &= x_0(0)W^0 + x_0(1)W^3 + x_0(2)W^6 + x_0(3)W^9
\end{aligned}$$

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

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix}$$

Es en este punto cuando debemos aplicar las siguientes propiedades:

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

Obteniendo que la expresión matricial anterior queda como:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^0 & W^2 \\ W^0 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix}$$

Lo que se puede factorizar, obteniendo estos resultados:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix}$$

Si agrupamos el producto de la derecha obtendremos:

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

De tal forma que obtenemos que $x_2[n]$ es:

$$\begin{aligned}x_2(0) &= x_1(0) + x_1(1)W^0 \\x_2(1) &= x_1(0) + x_1(1)W^2 = x_1(0) - x_1(1)W^0 \\x_2(2) &= x_1(2) + x_1(3)W^1 \\x_2(3) &= x_1(2) + x_1(3)W^3 = x_1(2) - x_1(3)W^1\end{aligned}$$

Para calcular los componentes pares solo se necesita realizar una suma y una multiplicación compleja, mientras que para los impares solo se necesita una suma compleja.

Se puede observar que la cantidad de carga computacional necesaria para hacer este tipo de transformada se reduce considerablemente. Mientras que al hacer la DFT con $N=4$, se realizarían 16 multiplicaciones complejas y 12 sumas complejas, con la FFT, se hace tan solo 4 multiplicaciones complejas y 8 sumas complejas.

Extendiendo este resultado de forma general, si $N=2^x$, con la FFT, el número de multiplicaciones, que son las operaciones que más incrementan la carga de computación, serán de $Nx/2$ y el número de sumas será Nx .

Por este motivo, se los datos que hemos obtenido del acelerómetro en el dominio del tiempo se pasarán al dominio de la frecuencia mediante la aplicación del algoritmo FFT, haciendo más eficiente el cálculo e incluyendo la clase compleja para el resultado de los valores de la transformada.

4.4.1.2 Implementación en la aplicación desarrollada

Para la implementación de la FFT en el código de la aplicación de Android [27], se han utilizado dos clases distintas, la primera de ellas, es la clase Complex.java que nos permite la utilización de números complejo, pudiendo definir un número complejo a partir de su parte real y de su parte imaginaria, con el constructor que aparece a continuación.

```
public class Complex {
    private final double re;    // parte real
    private final double im;    // parte imaginaria

    // creación del objeto
    public Complex(double real, double imag) {
        re = real;
        im = imag;
    }

    ...
}
```

Dentro de esta clase también nos permite la realización de operaciones con complejos, tales como sumas, obtener su módulo o su fase, entre otras.

Una vez, se ha incorporado esta clase a la aplicación se incorpora la clase FFT.java que permite la realización de la FFT siguiendo la fundamentación teórica anterior:

```
public class FFT {

    // Calcula la FFT de x, dando por hecho que su longitud es una
    potencia de dos
    public static Complex[] fft(Complex[] x) {
```

```

int N = x.length;

// Contempla el caso en que solo haya un valor en x
if (N == 1) return new Complex[]{x[0]};

// Comprueba si la longitud es efectivamente una potencia de 2
if (N % 2 != 0) { throw new RuntimeException("N is not a power
of 2"); }

// Cálculo de la FFT de los 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);

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

// Combina el calculo de los términos pares e impares
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;
}
...
}

```

Una vez se haya realizado el paso al dominio de la frecuencia mediante la FFT, se va a aplicar un truncamiento de los datos para evitar un error mayor debido al aliasing, antes de la agrupación por tercios de octava. Esto consiste en que solo se tendrán en cuenta para el siguiente cálculo aquellas frecuencias que no sobrepasen la mitad de la frecuencia de muestreo, evitando así que se produzca el fenómeno del aliasing, que puede llevar a dar errores por dar valores a las frecuencias más altas.

4.4.2. Agrupación de la frecuencia por tercios de octava

Al realizar un análisis en frecuencia, nos dará unos determinados valores para cada valor de frecuencia, lo que hemos obtenido tras realizar la FFT.

A continuación debemos agrupar los valores de las frecuencias en tercios de octava. En primer lugar es necesario conocer el término de una octava. Para tener más información sobre el espectro, éste se divide en un número de bandas, llamadas octavas, debido a que entre el primer y el último valor de la frecuencia de esa franja hay una octava. Las octavas se utilizan mayoritariamente en el campo de la acústica.

4.4.2.1 Fundamentación teórica

En nuestro caso, los valores los agrupamos en tercios de octava, de tal forma que cada una de las bandas en las que se dividía el espectro por octavas se va a dividir en tres partes, obteniendo una información más detallada aún del espectro. La frecuencia central de la octava “n”, viene dada por la siguiente fórmula

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

y las frecuencias limítrofes con los tercios de octava consecutivos se calculan de la siguiente manera:

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

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

La tabla de frecuencias en tercios de octava se adjunta a continuación

número de banda de frecuencia	frecuencia	frecuencias en tercios de octava
-3,5		0,447
-3	0,5	0,501
-2,5		0,562
-2	0,63	0,631
-1,5		0,708
-1	0,8	0,794
-0,5		0,891
0	1	1,000
0,5		1,122
1	1,25	1,259
1,5		1,413
2	1,6	1,585
2,5		1,778
3	2	1,995
3,5		2,239
4	2,5	2,512
4,5		2,818
5	3,15	3,162
5,5		3,548
6	4	3,981
6,5		4,467
7	5	5,012
7,5		5,623
8	6,3	6,310

número de banda de frecuencia	frecuencia	frecuencias en tercios de octava
8,5		7,079
9	8	7,943
9,5		8,913
10	10	10,000
10,5		11,220
11	12,5	12,589
11,5		14,125
12	16	15,849
12,5		17,783
13	20	19,953
13,5		22,387
14	25	25,119
14,5		28,184
15	31,5	31,623
15,5		35,481
16	40	39,811
16,5		44,668
17	50	50,119
17,5		56,234
18	63	63,096
18,5		70,795
19	80	79,433
19,5		89,125

Ilustración 59. Tabla de frecuencias en tercios de octava

El proceso a seguir dentro de la aplicación para la agrupación de las frecuencias en tercios de octava es el siguiente:

En primer lugar debemos tener en cuenta que, el rango de frecuencias que queremos abarcar es de entre 0,5 Hz y 80 Hz, de tal forma que, como mínimo la resolución frecuencial que se necesita es de 0,5 Hz, es decir:

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

Como anteriormente se ha fijado una frecuencia de muestreo mínima de unos 100 Hz aproximadamente, el número de puntos de la DFT será como mínimo 200, aunque en nuestro caso se han manejado valores de 1024 puntos, aumentando más aún la resolución espectral y obteniendo, así una mayor resolución espectral.

Una vez conocemos la resolución espectral, para realizar la agrupación por tercios de octava, vamos a ir comprobando para cada valor de la frecuencia que tenemos, en qué tercio de octava está.

Para agrupar por tercios de octava, en una función continua hay que integrar todos los valores de la aceleración entre las frecuencias límite del tercio de octava correspondiente. La integración sería correcta en una función continua pero al estar manejando datos discretos, se ha utilizado la fórmula de la suma de Riemann, que tienen el mismo objetivo que la integración pero para valores discretos, de tal forma que se hace el sumatorio de cada valor de la aceleración por el espacio existente entre este valor y el siguiente, que en este caso es f_s/N . La fórmula de la suma de Riemann utilizada es la siguiente:

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

Aunque en nuestro caso los límites del sumatorio vendrían dados por los límites de los tercios de octava.

4.4.2.2 Implementación en la aplicación desarrollada

Para hacer la agrupación de las frecuencias, en primer lugar se hace el sumatorio de todos los valores de la aceleración correspondientes a aquellas frecuencias pertenecientes a dicho tercio de octava, como se puede ver en este ejemplo del código usado en la banda número 3 de tercio de octava:

```
if (ejefrec[j] > 1.778 && ejefrec[j] < 2.239) {
    foxa[7] = foxa[7] + frecuencyx[j].abs();
    foya[7] = foya[7] + frecuencyy[j].abs();
    foza[7] = foza[7] + frecuencyz[j].abs();
}
```

Para, una vez se ha hecho esto para los valores correspondientes a todas las frecuencias, se haga el producto por la separación frecuencial entre los distintos valores de la aceleración cuyo valor es $\frac{f_s}{N}$. Este producto se realizará en el siguiente paso correspondiente a la ponderación en frecuencia para no volver a recorrer el vector de frecuencias de forma repetida, mejorando así la eficiencia de la aplicación.

De esta forma, se realizarán los cálculos para 23 tercios de octava, desde la número -3 hasta la 19, abarcando así el rango de frecuencias de interés de las vibraciones de cuerpo entero.

4.4.3. Ponderación en frecuencia

4.4.3.1 Fundamentación teórica

La manera en la que las vibraciones afectan a la salud, al bienestar, a la percepción y al mal del movimiento es dependiente de la frecuencia de la vibración [28]. Se requieren diferentes ponderaciones en frecuencia para los diferentes ejes de vibración, para ello, se disponen de unos coeficientes W que se aplicarán a las distintas octavas de frecuencias que hemos calculado:

- 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.

Los valores de los coeficientes de ponderación en frecuencia se adjuntan a este documento en la página siguiente.

Tal y como podemos ver en el siguiente gráfico, que corresponde a las curvas de ponderación en frecuencia para las ponderaciones principales, dentro del rango de frecuencia que nos interesa (0,5 a 80 Hz), en las frecuencias más bajas tienen unos coeficientes más altos, que hacen que tengan un mayor peso en el cálculo final de la aceleración, mientras que por el contrario, las frecuencias más altas tienen unos coeficientes mucho más bajos haciendo que influyan en menor medida.

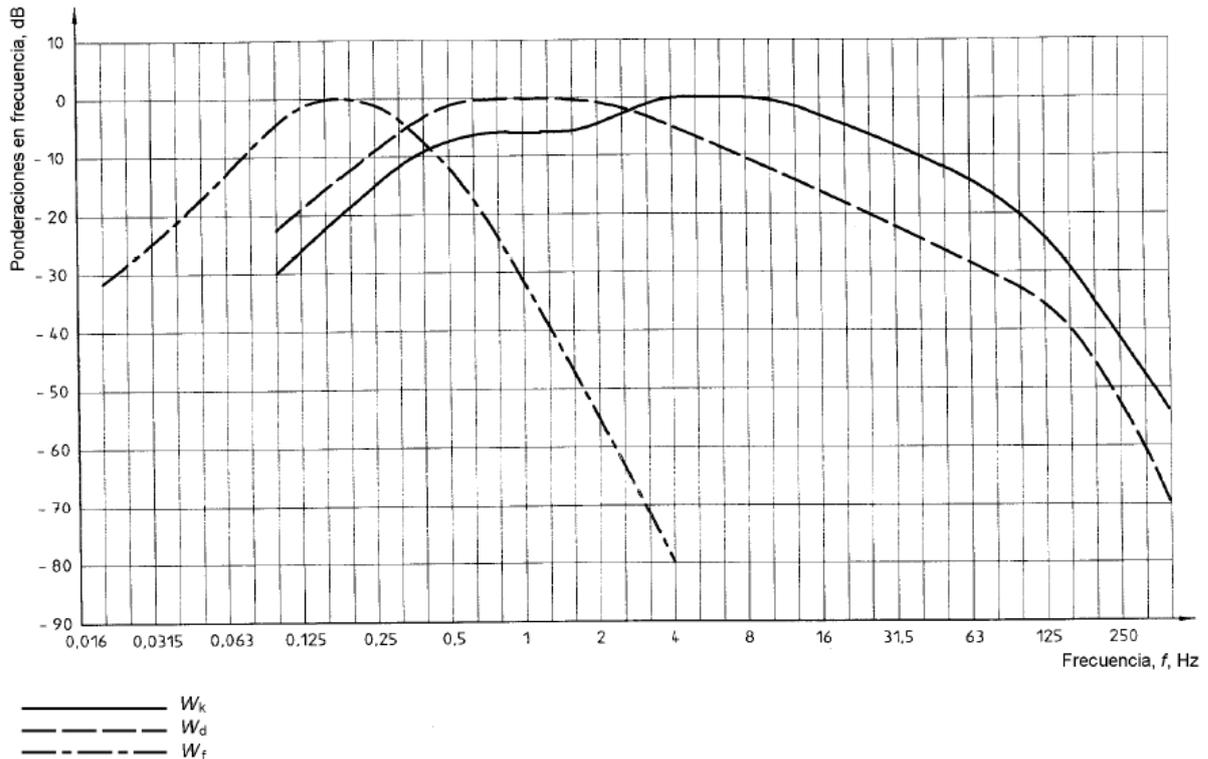


Ilustración 60. Gráfica de la ponderación en frecuencia

Dentro de la aplicación desarrollada, la ponderación en frecuencia sigue el siguiente proceso: una vez ya hemos hallado la señal de aceleración en el dominio de la frecuencia y las hemos agrupado por tercios de octava, se van a cargar los coeficientes descritos en el Anexo 2 en un fichero .xml de valores y se van a aplicar al tercio de octava correspondiente.

Para hallar el valor de aceleración ponderada final de un eje y para un período de tiempo T se debe realizar la siguiente operación

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

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.

Número de banda de frecuencia ¹⁾ <i>x</i>	Frecuencia <i>f</i> Hz	<i>W_k</i>		<i>W_a</i>	
		factor × 1 000	dB	factor × 1 000	dB
-17	0,02				
-16	0,025				
-15	0,031 5				
-14	0,04				
-13	0,05				
-12	0,063				
-11	0,08				
-10	0,1	31,2	-30,11	62,4	-24,09
-9	0,125	48,6	-26,26	97,3	-20,24
-8	0,16	79,0	-22,05	158	-16,01
-7	0,2	121	-18,33	243	-12,28
-6	0,25	182	-14,81	365	-8,75
-5	0,315	263	-11,60	530	-5,52
-4	0,4	352	-9,07	713	-2,94
-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	0,10
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	80,0	-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

Ilustración 61. Coeficientes de ponderación en frecuencia

4.4.3.2 Implementación en la aplicación desarrollada

Dentro del código, la implementación de estas operaciones correspondientes a la ponderación en frecuencia se realizan de la siguiente forma, incluyendo el producto comentado en la sección anterior para la agrupación por tercios de octava:

```
for (int j = 0; j < foxa.length; j++)
{
    foxa[j]=foxa[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;
foya[j] = Math.pow(foya[j], 2.0);
ejey2 = ejey2 + foya[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(ejex2);

```

La división entre 1000 se debe a que el array descrito en el fichero .xml con los coeficientes de la ponderación en frecuencia consta de números enteros por lo que es necesario hacer esta división para llegar a su valor real que no se corresponde con números enteros.

Todos estos cálculos se van a realizar tras el período de toma de datos, de tal forma que el proceso está siendo el siguiente:

1. Se toman N datos de aceleración procedente de los sensores
2. Se hacen los cálculos descritos anteriormente para obtener los valores de la aceleración ponderada de cada eje durante ese tiempo de toma de datos.
3. Esos valores calculados se van almacenando en un array (uno por eje)
4. Cuando el usuario indique que ha terminado la medición, se hace entonces la adición de los diferentes períodos de muestreo.
5. Para finalizar se procede al cálculo del valor de la aceleración normalizado con el valor de referencia de 8 horas.

4.4.4. Adición de los períodos de muestreo

Para reducir la carga computacional que la aplicación supone al dispositivo, se opta por realizar tomas de datos durante reducidos períodos de tiempo (con una duración de segundos), tras los cuales se realizan los cálculos apropiados, cuyos resultados se almacenan en un array [28].

Cuando el usuario indica la finalización de la toma de datos, es necesario adicionar todos los datos de aceleración ponderada de cada uno de los períodos de medición. Para ello se realiza la siguiente operación

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

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 de las vibraciones.

Este paso se realiza cuando el usuario de nuestra aplicación ya ha indicado que quiere parar la medición. Cuando hemos ido tomando las muestras se ha ido almacenando en un array el tiempo total de duración de cada muestra, por lo que al llegar a este paso, en primer lugar se suman todas las duraciones de cada muestra llegando así a la duración total de la muestra, guardando ese valor en una variable auxiliar. A continuación se realiza el sumatorio, haciendo uso también de variables auxiliares tal y como se muestra en las siguiente líneas de código:

```

aux4=(double) tiempomuestreoarray.size();
for (int jo = 0; jo < ejexarray.size(); jo++) //Adición de períodos
{
    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 se ha realizado el sumatorio, se completa el cálculo de la adición de los períodos dividiendo el valor obtenido por el tiempo total de la medida (almacenada en la variable aux4) y con la raíz cuadrada de ese valor final. A continuación se muestra, lo hecho con el eje x:

```

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

```

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

4.4.5. Cálculo de valor de dosis diaria normalizada

La evaluación del nivel de exposición a las vibraciones se basa en el cálculo de la exposición diaria A(8) expresada como la aceleración continua equivalente para un periodo de 8 horas [29], calculada como el mayor de los valores eficaces de las aceleraciones ponderadas en frecuencia determinada según los tres ejes ortogonales.

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

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

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

donde:

- a_{wz} representa el valor eficaz de la aceleración ponderada en frecuencia según los ejes ortogonales x, y, z.
- T_{exp} es el tiempo de exposición
- T_0 es el tiempo de referencia cuyo valor es 8 horas
- k es el factor de ponderación propio de cada eje.

El factor “k” corresponde a la realización de otra ponderación cuya finalidad es la diferenciación entre la influencia en la aceleración de cada uno de los ejes, puesto que no influyen de la misma forma las vibraciones en el eje vertical que en el lateral o en el longitudinal. Esta ponderación se realizará como cálculo final

La ponderación en frecuencia debe aplicarse a personas con los factores de multiplicación k que se indican a continuación:

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

La aceleración r.m.s. ponderada debe determinarse para cada eje (x, y, z) de la vibración translacional sobre la superficie que soporta a la persona.

La evaluación de los efectos de la vibración sobre la salud debe realizarse de manera independiente en cada eje. La evaluación de la vibración debe realizarse con respecto a la aceleración ponderada en frecuencia más alta obtenida en cada uno de los ejes del asiento.

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 el valor de *time* es la raíz cuadrada del tiempo de exposición entre el tiempo de referencia que se ha declarado anteriormente:

```
time = Math.sqrt(aux4) / Math.sqrt(3600*number);
```

siendo *number* el número de horas de referencia que normaliza el valor de la dosis de vibración. En el caso de $A(8)$, esta variable tiene el valor 8.

Una vez que ya tenemos los $A(8)$ por ejes, la evaluación de la vibración debe realizarse con respecto a la aceleración ponderada en frecuencia más alta obtenida en cada uno de los ejes del asiento.

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

Es este valor el que debemos ver si se encuentra dentro de los límites de la ley establecidos en el REAL DECRETO 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la 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.

4.5. Manual de usuario de la aplicación

En este capítulo se indican las principales características de la aplicación así como la descripción de la navegación en la misma. Primeramente se describe el icono de la aplicación, para, a continuación, explicar el uso de la aplicación pasando por las diferentes pantallas y opciones que contiene la aplicación.

4.5.1. Icono de la aplicación

La aplicación estará representada con un icono que permitirá el acceso directo a la misma y que se muestra en la siguiente figura:



Ilustración 62. Icono de la aplicación

El icono muestra el símbolo de la Universidad de Valladolid al que se le ha añadido la imagen de un tractor y unas líneas que representan las vibraciones.

4.5.2. Uso de la aplicación.

Al iniciar la aplicación, nos encontramos con una pantalla de bienvenida con el nombre de la aplicación y tres botones distintos: “Empezar a medir”, “Legislación” y “Ayuda”.

La pantalla de bienvenida tiene el siguiente aspecto:



Ilustración 63. Pantalla de bienvenida

La primera opción se seleccionará cuando se quiere realizar una medición de las vibraciones a las que se ve sometido el conductor del tractor cuando realiza los trabajos agrarios. Una vez pulsamos en esta opción la aplicación nos va a dar la opción de seleccionar en qué posición vamos a fijar el dispositivo en relación con el asiento del tractor puesto que esto determinará que tratamiento tendrán los datos de aceleración recogidos en cada eje del dispositivo. Esto se debe a que, según el eje al que correspondan los datos, éstos se ponderan de forma distinta y los coeficientes utilizados en los cálculos finales, son diferentes también. En esta pantalla también se especifica que al cambiar la posición del *smartphone* con respecto a la del dispositivo, es muy recomendable reiniciar la aplicación.

Una vez seleccionamos esta opción la aplicación navega hasta la siguiente pantalla que nos permite seleccionar el número de horas de referencia con el cual se va a realizar el cálculo del valor de dosis normalizado. Estas dos pantallas se muestran a continuación:

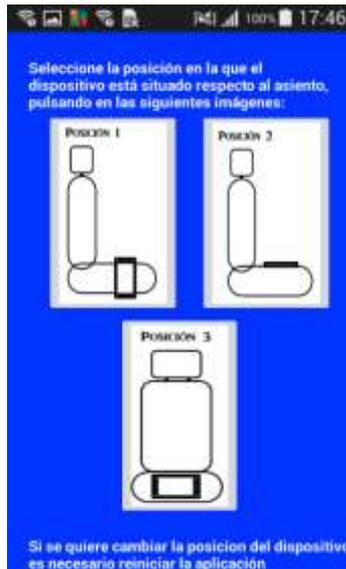


Ilustración 64. Pantalla de elección de posición respecto al asiento del tractor

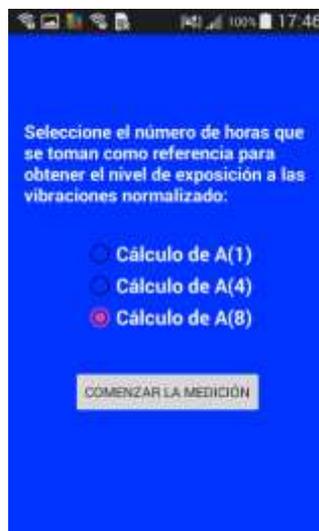


Ilustración 65. Pantalla de elección del número de horas de referencia

De esta forma ya hemos seleccionado los parámetros que marcarán la medición de las vibraciones. Al empezar a realizar las vibraciones, durante el primer período de medición, la aplicación nos indica que se están tomando los primeros datos de las vibraciones por lo que no puede mostrar datos parciales. Cuando comienza el segundo período de muestreo la aplicación empieza a mostrar resultados parciales así como el tiempo de muestreo ya calculado en los períodos anteriores, la frecuencia media de muestreo del dispositivo y el número de períodos que lleva tomando muestras procedentes del acelerómetro.

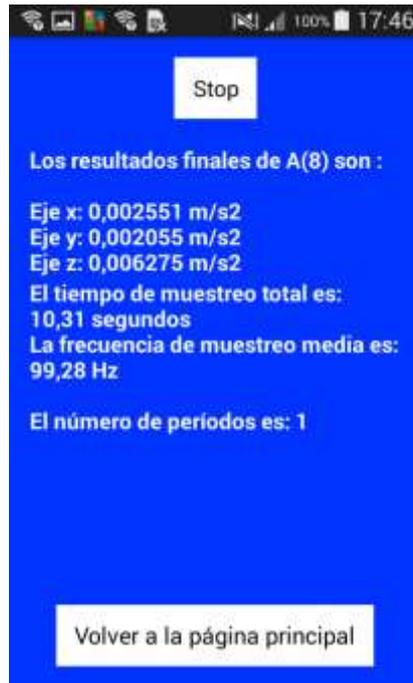


Ilustración 66. Pantalla mostrada durante la toma de datos

Además, se muestran dos botones, uno de ellos con la palabra Stop que indicará que se quiere terminar la medición de tal forma que nos llevará a la pantalla con los resultados finales, mientras que el botón “Volver a la página principal” hará que la aplicación deje de medir y vuelva a la pantalla de bienvenida sin mostrar resultado alguna sobre la medición que ha quedado inacabada.

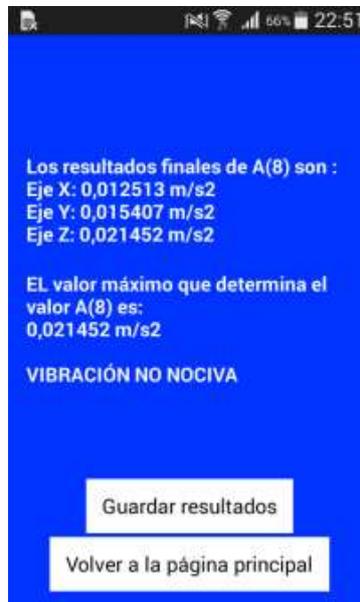


Ilustración 67. Pantalla con los resultados finales de la medición

Al finalizar, si se elige que el número de horas de referencia sea 8 horas, que es la medida para la cual la legislación marca los valores límite, en la pantalla de los resultados finales no solo se mostrarán estos resultados, sino que también se considerará si la vibración es muy nociva, poco nociva o no nociva según los límites de la legislación española, basada en la correspondiente directiva europea. Se considerarán:

- No nociva: si el valor de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas es menor que el valor de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas que da lugar a una acción.
- Nociva: si el resultado se encuentra entre el valor de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas que da lugar a una acción y el valor límite de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas.
- Muy nociva: si el resultado es mayor que el valor límite de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas.

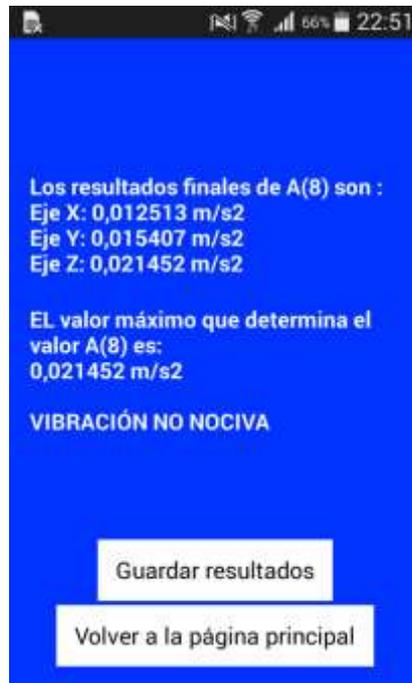


Ilustración 68. Pantalla de resultados finales

Cuando ya se han mostrado los resultados finales, la aplicación nos va a dar la opción de volver a la pantalla de bienvenida con el botón situado en la parte más inferior.

Además también se tiene la opción de guardar los resultados de los valores parciales de exposición diaria normalizado al número de horas que se hayan elegido, siendo el último valor el resultado final de la medición, en un fichero de texto con la extensión .txt.

También al final del documento guardado se van a mostrar los valores numéricos separados de cada eje en forma de array, con la finalidad de facilitar que los usuarios puedan utilizar estos datos para graficarlos o manipularlos en herramientas matemáticas tales como Matlab como se ha utilizado en el desarrollo de este proyecto.

La aplicación te permite elegir el nombre del fichero donde se guardarán dichos datos, mediante una ventana emergente que nos permite escribir ese nombre.

Para poder crear ficheros y guardarlos en el almacenamiento del *smartphone*, es necesario que la aplicación tenga los permisos necesarios para que le permita realizar esta acción, pero la forma en la que se obtienen estos permisos depende de la versión de Android que tenga instalado el dispositivo.

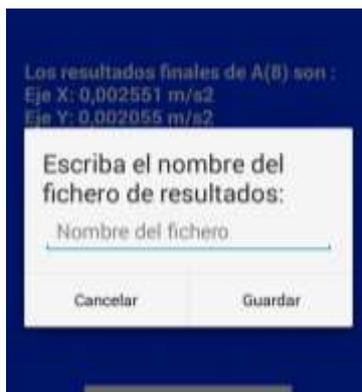


Ilustración 69. Ventana emergente de guardado de ficheros

[49] Si el dispositivo tiene instalado Android 6.0 (nivel de API 23) o versiones posteriores y el atributo `targetSdkVersion` de la app es 23 o superior, la app solicita los permisos al usuario en el tiempo de ejecución. El usuario puede revocar los permisos en cualquier momento. Por ello, la app debe controlar si tiene los permisos cada vez que se ejecuta. Para obtener más información sobre la solicitud de permisos en tu app, consulta la guía de capacitación *Cómo trabajar con permisos del sistema*.

Si el dispositivo tiene instalado Android 5.1 (nivel de API 22) o versiones anteriores, o el atributo `targetSdkVersion` de la app es 22 o un valor inferior, el sistema solicita al usuario que otorgue los permisos al instalar la app. Si agregas un permiso nuevo a una versión actualizada de la app, el sistema solicita al usuario que otorgue ese permiso al actualizar la app. Una vez que el usuario instale la app, la única manera que tiene de revocar el permiso es desinstalar la app.

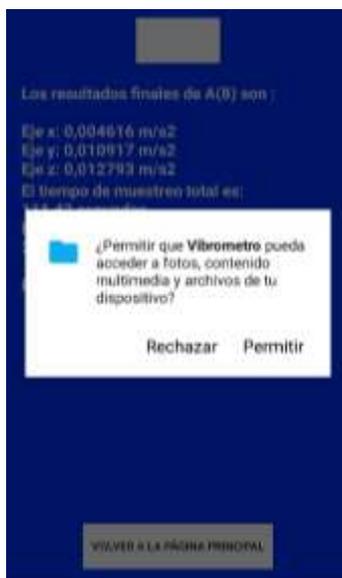


Ilustración 70. Petición de permiso de almacenamiento al usuario

Cuando los datos se hayan guardado correctamente, aparecerá el siguiente mensaje:

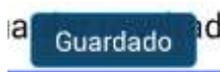


Ilustración 71. Mensaje emergente que indica que los datos se han guardado correctamente

Con esto finalizaría el proceso de realización de mediciones y almacenamiento de resultados.

Volviendo a la pantalla de bienvenida, existen dos botones adicionales además del que permite comenzar la medición de las vibraciones. En el primero de ellos, llamado “Legislación”, podremos acceder a la legislación relacionadas con las disposiciones de seguridad y salud relativa a la exposición de los trabajadores a las vibraciones.



Ilustración 72. Pantalla con el menú de información sobre legislación

Al pulsar sobre este botón se abrirá un menú con una lista de cuatro opciones:

- UNE: Directiva europea sobre las vibraciones
- Real Decreto: normativa española basada en la directiva europea anterior
- ISO: norma internacional que especifica cómo hay que realizar las mediciones de las vibraciones correctamente
- Enlaces: en esta sección se proporcionan los enlaces web que referencian a las páginas que contienen estas normas o legislaciones completas, ya que en los apartados anteriores no se muestra la ley completa, sino que están descritas las partes más importantes y que están más relacionadas con los cálculos realizados en la aplicación.

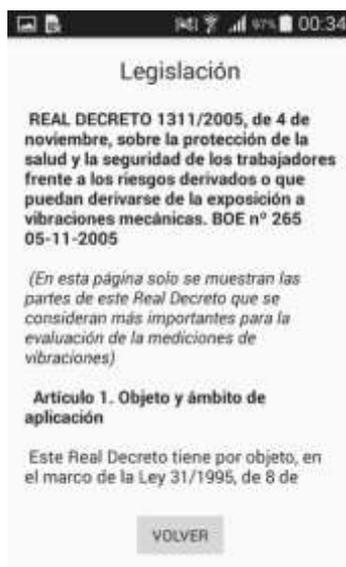


Ilustración 73. Pantalla con la información del Real Decreto de la legislación española sobre las vibraciones



Ilustración 74. Pantalla con la ayuda sobre la aplicación

Finalmente, en la pantalla de bienvenida el botón inferior, denominado “Ayuda” se refiere a la información que el usuario puede llegar a necesitar al utilizar la aplicación, es decir, las instrucciones de uso de la misma.

Capítulo 5. Resultados sobre la mesa de vibraciones

En este capítulo se van a describir los procedimientos realizados para la evaluación de la aplicación utilizando una mesa de vibraciones. En primer lugar se harán experimentos relacionados con la adquisición de los datos, haciendo comparaciones con los resultados obtenidos en otras aplicaciones. Seguidamente, se comprueba el buen funcionamiento del algoritmo FFT y se calcula el error que puede provocar el tiempo de cálculo con respecto al tiempo de toma de datos total. A continuación se explican las pruebas sinodales y random realizadas con el banco squeak and rattle. Más tarde se explica el experimento realizado en el que se comparan los resultados obtenidos en varias pruebas random acotadas a diferentes frecuencias máximas. Finalmente se describen las pruebas relacionadas con el número de muestras que se toman en cada período.

5.1. Pruebas en la adquisición de datos

La primera prueba que se lleva a cabo para la comprobación del buen funcionamiento de la aplicación desarrollada es la validación de los datos de aceleración en m/s^2 . Para poder comparar los datos tomados se han utilizado los *smartphones* Samsung Galaxy Core II y Samsung Galaxy Core GT-i8260, para tomar los datos, así como el software MATLAB para la comparación de datos obtenidos.

5.1.1. Experimento 1

El primer experimento consiste en la utilización de la aplicación Physics Toolbox Accelerometer, en los dos *smartphones* explicados anteriormente. Este experimento tiene como finalidad saber si, en una aplicación desarrollada y publicada para la medición de vibraciones, al exponer a ambos terminales a los mismos movimientos, se obtienen los mismos datos de aceleración. Debemos tener en cuenta que esta aplicación expresa los valores de aceleración con la unidad g , por lo que debemos expresarlo en m/s^2 , unidad que estamos utilizando en la aplicación desarrollada.

Esta aplicación, como hemos comentado en el segundo capítulo de este proyecto, nos permite exportar los datos en un formato .csv, que se puede visualizar mediante el software de Microsoft Office Excel 2016. De esta forma, es muy fácil declarar una variable en MATLAB, por cada uno de los tres ejes e inicializarla con los valores del fichero obtenido. Se realizan estos pasos, para los datos de ambos terminales.

A continuación, vamos a graficar los datos, teniendo en cuenta la frecuencia con la que se han tomado los datos, que en ambos terminales es de aproximadamente 100 Hz. Se declara un vector de tiempos donde cada muestra está separada de la siguiente, un tiempo de 0,01 segundos, utilizando el comando linspace, que nos permite crear un vector de muestras equiespaciadas, indicándole su valor de comienzo, su valor final y el número de puntos que se deben coger entre esos dos valores.

Los gráficos obtenidos son los siguientes:

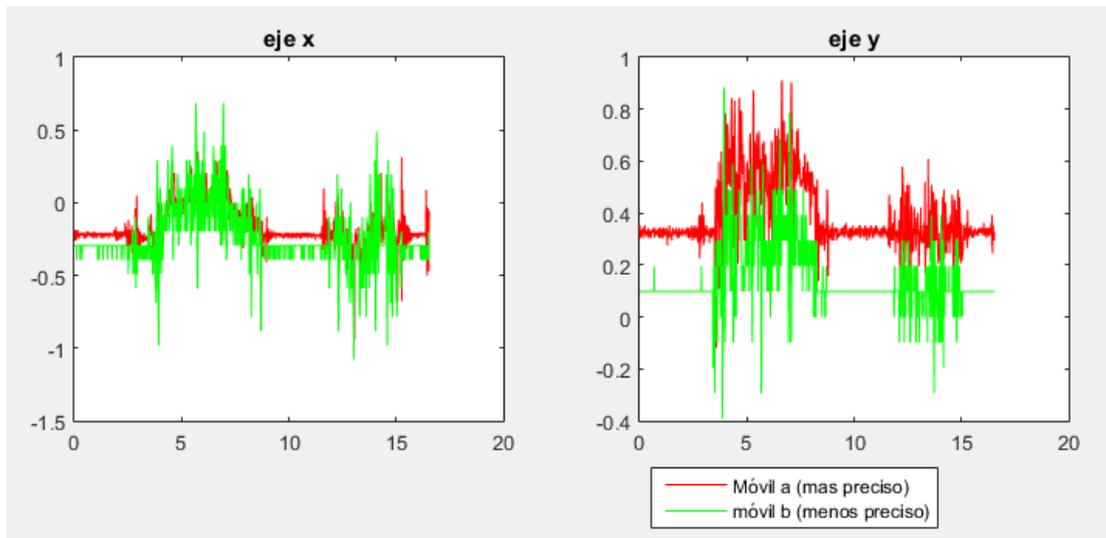


Ilustración 75. Comparación de los valores obtenidos con la app Physics Toolbox en dos smartphones distintos, para los ejes x e y

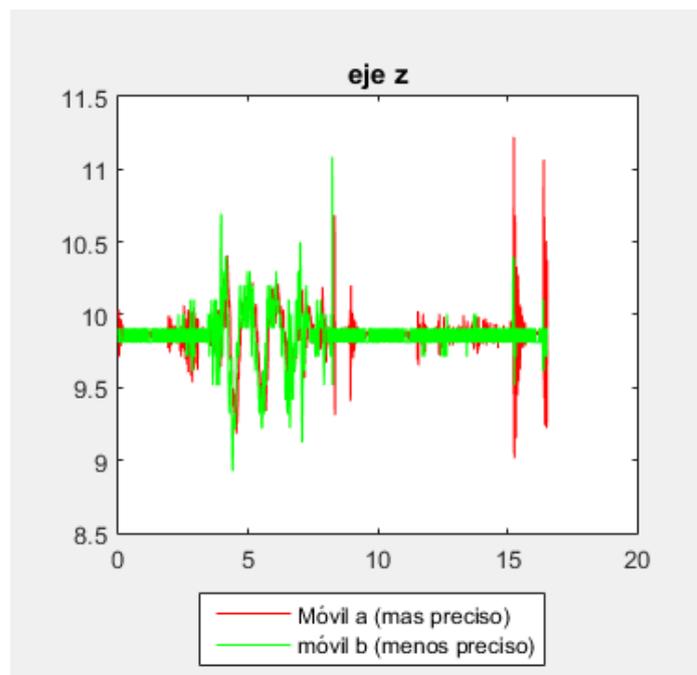


Ilustración 76. Comparación de los valores obtenidos con la app Physics Toolbox en dos smartphones distintos, para el eje z

Debemos tener en cuenta que el terminal más preciso es el Samsung Galaxy Core GT-i8260, cuyos valores se representan en las gráficas con el color rojo, mientras que el terminal menos preciso es el Samsung Galaxy Core II, cuyos datos se representan en las gráficas con el color verde. En el terminal Samsung Galaxy Core GT-i8260, la aplicación nos da valores de la aceleración con una precisión de milésimas, mientras que en el Samsung Galaxy Core II, la aplicación nos da valores de la aceleración con una precisión de centésimas. Esto, puede ser una fuente de error que hace que los resultados varíen de uno a otro dispositivo.

En el eje x podemos ver que la forma de la señal obtenida es muy semejante en ambos terminales, pero existe una diferencia entre ambas de aproximadamente 0.1 m/s^2 , de esta misma forma en el eje y podemos ver que la forma de la señal obtenida es también muy semejante en ambos terminales pero existe una diferencia entre ambas de aproximadamente 0.2 m/s^2 . Sin embargo en el eje z podemos ver que ambas señales son muy similares sin una diferencia constante entre ambas, como ocurría en los dos primeros ejes.

Pero al reflexionar sobre el error que esta diferencia puede provocar, hay que tener en cuenta que sumar una constante a una señal, no modifica el espectro de la misma, salvo en la frecuencia cero, que en nuestro caso no nos es de relevancia puesto que el espectro que nos interesa a la hora de evaluar las vibraciones de cuerpo entero consta de los valores entre 0.5 Hz y 80 Hz. Para comprobar esta idea, se van a calcular los espectros de ambas señales.

Para ver las señales en el dominio de la frecuencia, se va a utilizar el comando `fft` de MATLAB. Para graficar los espectros, de la misma forma que realizábamos en el dominio del tiempo, es necesario declarar un vector de frecuencias, de forma que las muestras en este caso estarán separadas entre sí $\frac{f_s}{N}$.

Los colores utilizados mantienen el código de colores utilizados en las gráficas anteriores. Las gráficas obtenidas son las siguientes:

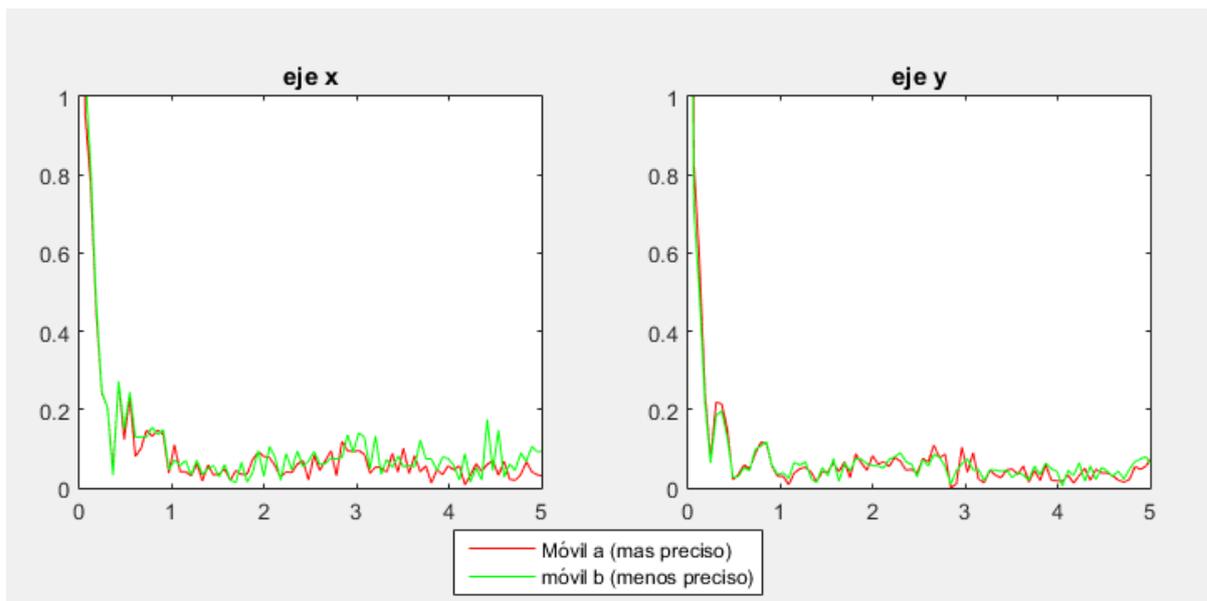


Ilustración 77. Comparación del espectro de la señal para dos smartphones distintos, para los ejes x e y

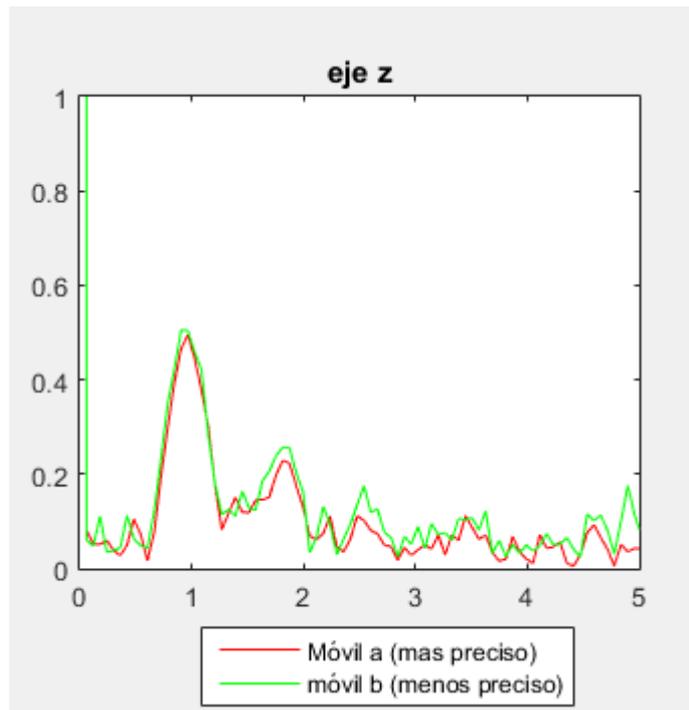


Ilustración 78. Comparación del espectro de la señal para dos smartphones distintos, para el eje z.

Estas gráficas han sido aumentadas en el eje horizontal barriendo los valores entre 0 y 5 Hz y en el eje vertical, barriendo los valores entre 0 y 1 m/s^2 , con la finalidad de poder comparar mejor ambos espectros.

Podemos ver que los espectros obtenidos para ambas señales son muy similares, aunque puedan tener ligeras variaciones en algunos datos, se trata de variaciones con un valor muy reducido, por lo que comprobamos que ambas señales pueden ser válidas, aunque sean resultado de dos terminales distintos.

5.1.2. Experimento 2

El segundo experimento realizado consiste en dejar correr ambas aplicaciones, tanto la aplicación desarrollada en este proyecto, como la aplicación *Physics Toolbox Accelerometer* en el mismo móvil, al mismo tiempo. El objetivo de dicho experimento es la comprobación de que los datos que nos muestra la aplicación desarrollada son similares a los valores ofrecidos por la otra aplicación en la medida de lo posible. En esta ocasión se utilizará el *smartphone* Samsung Galaxy Core II.

La obtención de los datos de la aplicación *Physics Toolbox Accelerometer* sigue el mismo proceso que se explicó para el primer experimento, utilizando los ficheros .csv que se exportan a Microsoft Office Excel 2016 para a partir de ahí poder declarar un array para cada eje en MATLAB con los datos que nos proporciona la aplicación, pasándolos a m/s^2 .

Respecto a la exportación de los datos en la aplicación desarrollada, se ha añadido a la aplicación la utilidad de guardar los datos de aceleración tomados del sensor de aceleración del terminal. La implementación de esta utilidad en el código de la aplicación es la siguiente:

En primer lugar se especifica un directorio concreto del terminal, en nuestro caso "Documents", de tal forma que si esta no existe en el directorio raíz, se crea uno con este mismo nombre:

```

File root = new File(Environment.getExternalStorageDirectory(), "Documents");
if (!root.exists()) {
    root.mkdirs();
}

```

A continuación se crea un fichero en el directorio especificado anteriormente y un *FileWriter* que es una clase que nos va a permitir escribir cadenas de caracteres dentro del fichero donde queremos exportar los datos.

```

File filepath = new File(root, "prueba.txt");
FileWriter writer = new FileWriter(filepath);

```

Por último vamos a indicar qué caracteres queremos añadir al fichero mediante el método *writer*. También se invoca el método *flush* que nos va a permitir descargar sobre el fichero todos aquellos caracteres que se encuentren en los *buffers*. Finalmente se cerrará el fichero con el método *close*. En este ejemplo se puede observar cómo se van a exportar los datos de aceleración del eje x.

```

writer.append("eje x: \n");
for (int p = 0; p < sensorDatosx.size(); p++) {
    writer.append(sensorDatosx.get(p) + "\n");
}

writer.flush();
writer.close();

```

Finalmente se obtiene un fichero con extensión *.txt* que se puede abrir y manejar con el *Bloc de Notas* que nos proporciona *Windows*.

Una vez hayamos recogido los datos que ha tomado la aplicación desarrollada los trasladamos a *MATLAB* de la misma forma que hacíamos con los datos ofrecidos por la otra aplicación, es decir, creando un *array* con los valores de aceleración de cada eje. En este caso no va a ser necesario hacer una conversión de unidades puesto que los datos que nos proporciona el sensor de aceleración del terminal se nos dan en valores de m/s^2 .

Al graficar los datos de ambas aplicaciones obtenemos las siguientes señales en el dominio del tiempo:

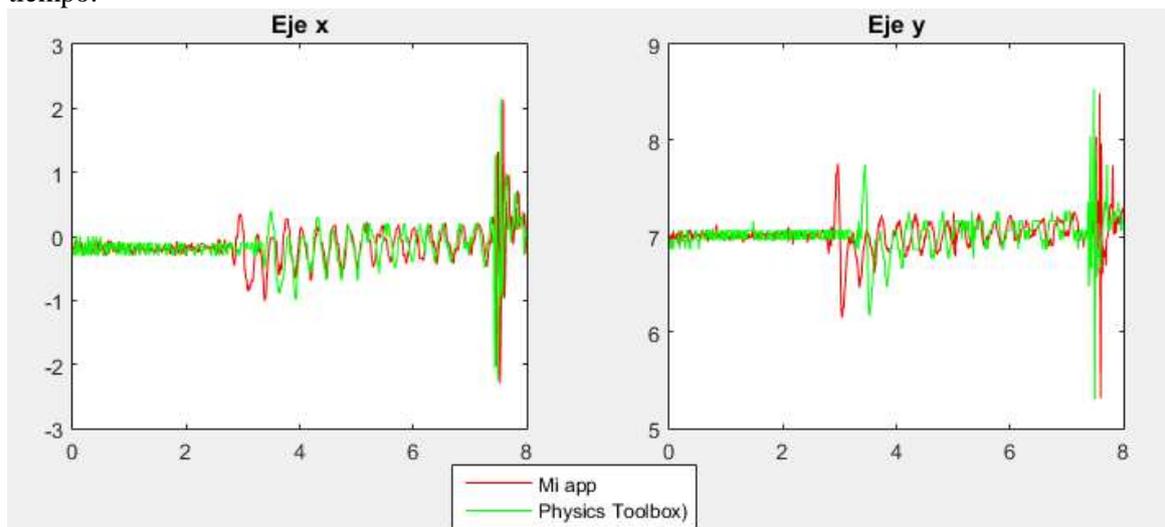


Ilustración 79. Comparación de los valores obtenidos con ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core II, para los ejes x e y

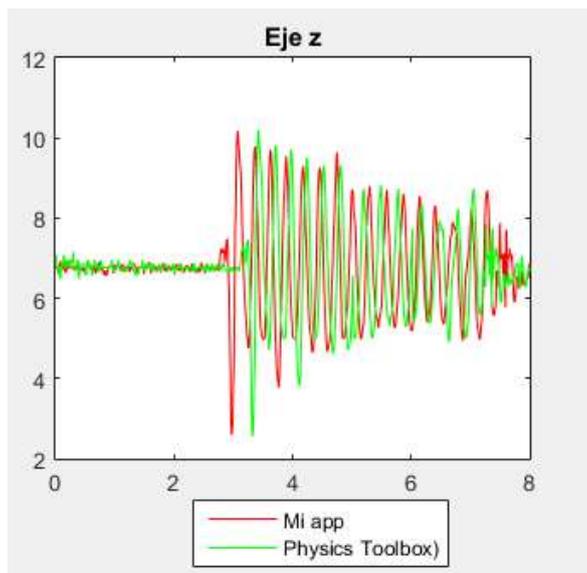


Ilustración 80. Comparación de los valores obtenidos con ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core II, para el eje z.

En esta ocasión podemos ver que en los tres ejes se observan un comportamiento muy similar de las señales. Tanto al comienzo como en el final de la toma de los datos se observan diferencias notables en las señales, esto se debe a que desde que se le indica a la primera aplicación que tiene que registrar los datos y se le indica esto mismo a la segunda aplicación existe un pequeño periodo de tiempo que hace que las señales estén ligeramente desfasadas entre sí.

Sin embargo, tal y como hacíamos en el primer experimento, para ver qué efecto puede tener esto sobre nuestros resultados finales vamos a calcular la transformada de Fourier de la señal, mediante el algoritmo de la FFT (*Fast Fourier Transform*), para poder graficar la señal con los valores de la aceleración en el dominio de la frecuencia.

Los gráficos obtenidos son los siguientes:

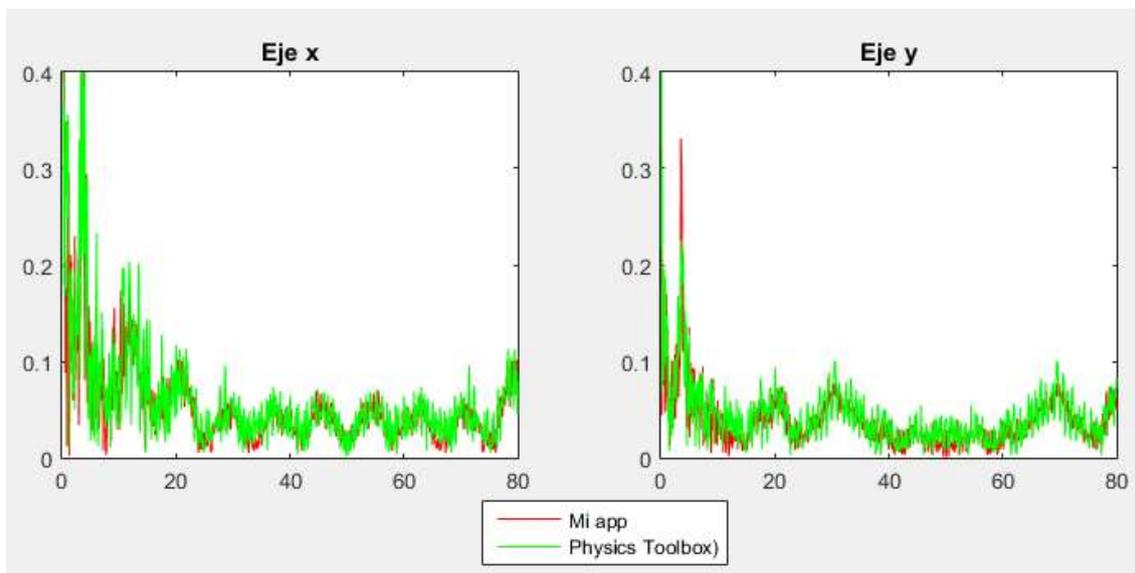


Ilustración 81. Comparación del espectro de la señal usando ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core II, para el eje x y el eje y.

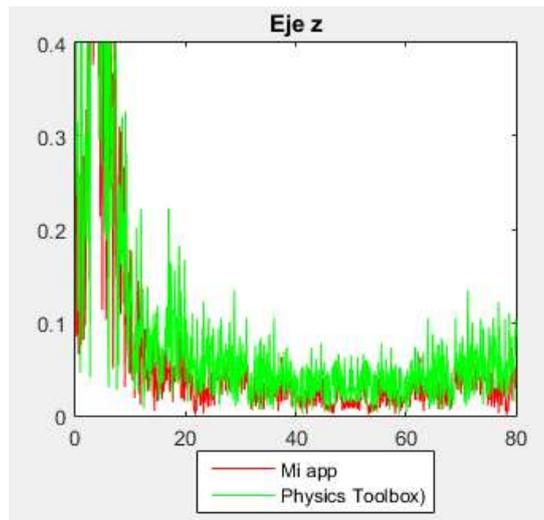


Ilustración 82. Comparación del espectro de la señal usando ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core II, para el eje z

Tal y como se puede observar las diferencias entre los resultados en el dominio de la frecuencia para ambas aplicaciones son muy reducidas, sobre todo en los ejes x e y, puesto que en el eje z las diferencias pueden ser ligeramente mayores, aunque no superan las diferencias de 0.1 m/s^2 , por lo que en el resultado final no supondría un error notable.

Para asegurarnos de esto, se van a realizar los cálculos del valor de A(8) en MATLAB sobre los valores de aceleración de los tres ejes y de cada una de las aplicaciones por separado para conocer la diferencia que existe entre el resultado final calculado con la aplicación desarrollada y el calculado con la aplicación *Physics Toolbox Accelerometer* pudiendo cuantificar el error en el cálculo de A(8) en nuestra aplicación procedente de la adquisición de los datos. No debemos olvidar que se ha introducido un desfase entre las dos señales por la imposibilidad de indicar al terminal que empiece a tomar datos en las dos aplicaciones a la vez (en pantalla sólo aparece una aplicación).

Los resultados de A(8) para una única toma de datos, es decir, para una medición con una duración de 10,24 segundos y una frecuencia de muestreo de 100 Hz son los siguientes:

A(8)	Eje x	Eje y	Eje z
Mi aplicación	0.0001 m/s^2	0.00006 m/s^2	0.0009 m/s^2
Physics Toolbox Accelerometer	0.0002 m/s^2	0.00006 m/s^2	0.0010 m/s^2
Diferencia entre ambas	0.0001 m/s^2	0.0 m/s^2	0.0001 m/s^2

La diferencia obtenida entre ambas medidas sobre nuestro resultado final es del orden de las diezmilésimas por lo que no constituye una fuente de error remarcable.

5.1.3. Experimento 3

El tercer experimento realizado para la comprobación de la fase de adquisición de datos es muy similar al anterior puesto que consiste en realizar la misma prueba, es decir, en dejar correr ambas

aplicaciones, tanto la aplicación desarrollada en este proyecto, como la aplicación Physics Toolbox Accelerometer en el mismo móvil, al mismo tiempo; pero en este caso se va a utilizar un terminal diferente, el Samsung Galaxy Core GT i-8260.

Debemos tener en cuenta que los resultados que nos proporciona la aplicación Physics Toolbox Accelerometer en este terminal son más precisos que los que proporcionaba esta misma aplicación en el terminal Samsung Galaxy Core II, puesto que en este dispositivo se va a tener una precisión de milésimas de g, mientras que en el anterior nos ofrecía una precisión de centésimas.

Tras exportar los datos obtenidos desde el terminal a MATLAB, se van a mostrar los resultados gráficamente en el dominio del tiempo, obteniendo los siguientes resultados:

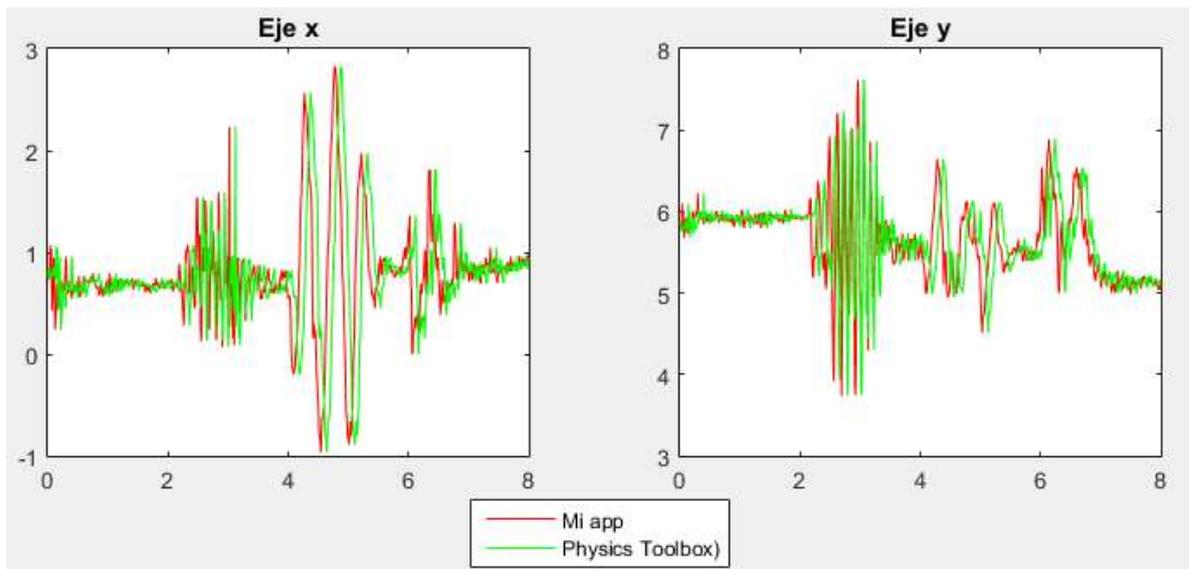


Ilustración 83. Comparación de los valores obtenidos con ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core GT i-8260, para el eje x y el eje y

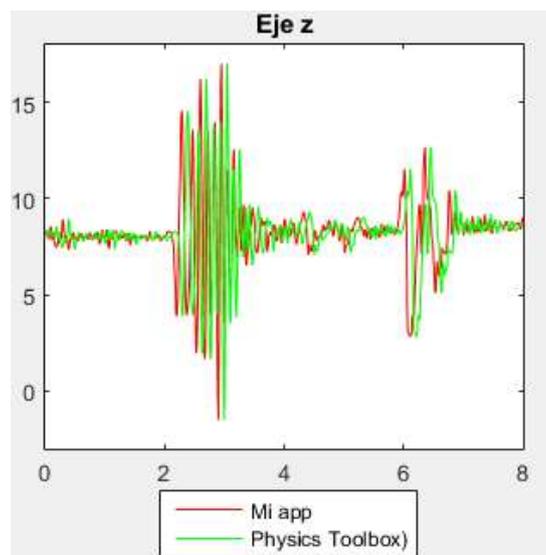


Ilustración 84. Comparación de los valores obtenidos con ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core GT i-8260, para el eje z

En este caso, se demuestra que los datos son muy similares, asumiendo que existe un pequeño desfase temporal debido a la diferencia de tiempos entre que una aplicación comienza a tomar los datos y la otra aplicación empieza a realizar las mediciones, tal y como ocurría en el segundo experimento.

Se observan resultados más precisos incluso que en el caso anterior por la precisión de los datos, que en este terminal ofrece un decimal más que en el caso anterior, por lo que el redondeo de los datos en esta aplicación es casi imperceptible.

También es recomendable observar que el espectro obtenido para los tres ejes es lo suficientemente similar puesto que, aunque los datos en el dominio del tiempo nos permiten predecir que los espectros serán también muy parecidos, realizaremos la prueba como en los experimentos anteriores.

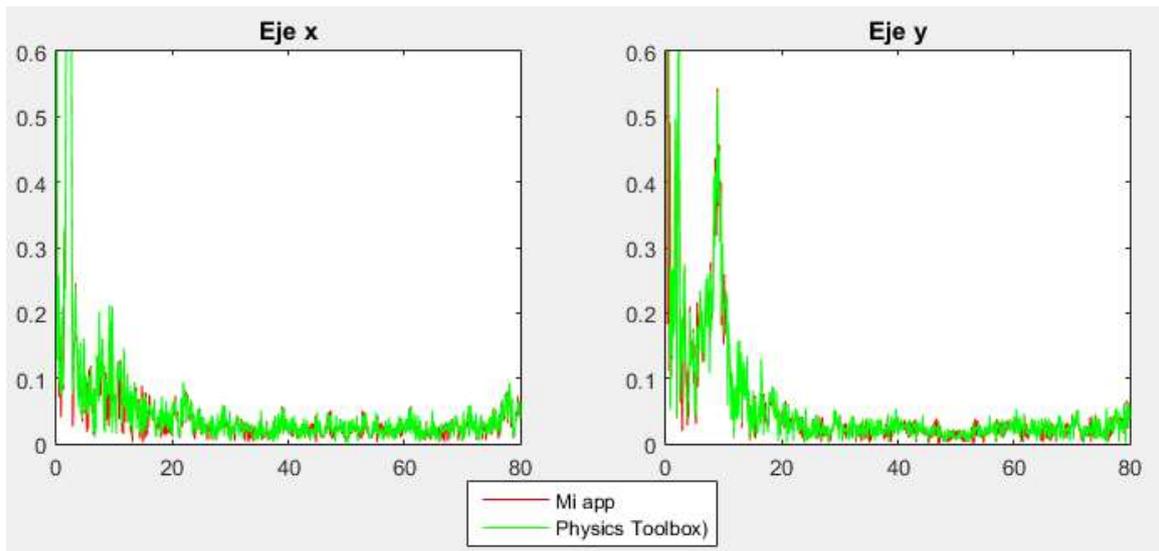


Ilustración 85. Comparación del espectro de la señal usando ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core GT i-8260, para el eje x y el eje y

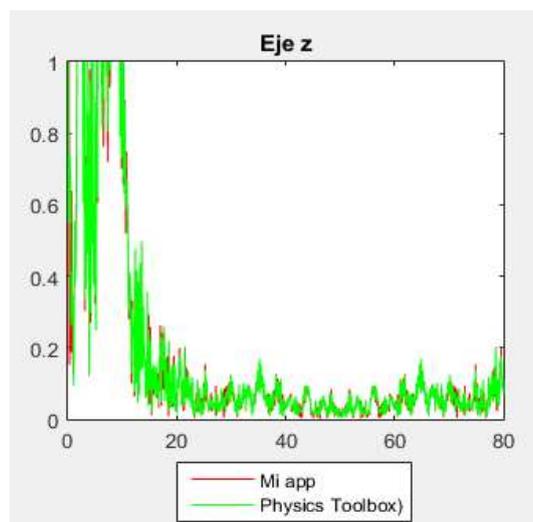


Ilustración 86. Comparación del espectro de la señal usando ambas aplicaciones en el Samsung Galaxy Core GT i-8260, para el eje z

Se puede comprobar que las diferencias en los espectros obtenidos con los datos de ambas aplicaciones para ambos ejes son inapreciables. Para asegurarnos de esto, se van a calcular los valores de $A(8)$ para un período de muestreo de 10,24 segundos y una frecuencia de muestreo de 100 Hz, para evaluar el impacto del error obtenido en la adquisición de los datos.

A(8)	Eje x	Eje y	Eje z
Mi aplicación	0.0008 m/s^2	0.0003 m/s^2	0.0593 m/s^2
Physics Toolbox Accelerometer	0.0009 m/s^2	0.0003 m/s^2	0.0595 m/s^2
Diferencia entre ambas	0.0001 m/s^2	0.0 m/s^2	0.0002 m/s^2

Se demuestra que el error introducido es del orden de las diezmilésimas, por lo que se asume que, al igual que ocurría con el terminal Samsung Galaxy Core II, en el terminal Samsung Galaxy Core GT i-8260, la aplicación toma bien los datos del sensor acelerómetro, de forma que esta fase no constituye una fuente de error a considerar.

5.2. Comprobación del algoritmo FFT

Dentro de la aplicación el siguiente paso en su desarrollo, consiste en el tratamiento de los datos, siendo la primera fase el paso de la señal obtenida en el dominio del tiempo a la señal obtenida en el dominio de la frecuencia. Tal y como explicábamos anteriormente, en el capítulo de desarrollo de la aplicación, el lenguaje utilizado para la realización de la aplicación no puede procesar señales continuas, por el contrario, tomará valores discretos de la aceleración. Por esta razón, no será posible calcular la transformada de Fourier de una señal continua, sino que será necesario calcular la Transformada Discreta de Fourier o DFT.

Al realizar esta operación, se necesitaría una gran capacidad de procesamiento del dispositivo y se ocuparía mucha memoria, por lo que se opta por utilizar el algoritmo de la FFT que nos permite reducir la carga de computación del dispositivo. La fundamentación teórica que explica en qué medida se reduce la carga computacional con la utilización de este algoritmo, así como su funcionamiento, está recogida en el apartado 4.4.1.

En esta fase de pruebas vamos a comprobar que el algoritmo utilizado en el código de la aplicación que implementa el cálculo de la FFT funciona correctamente. Para ello, en primer lugar se exportan los datos de aceleración tomados por la aplicación desarrollada a través de un fichero .csv. Esos datos se introducen en un *array* de MATLAB, una vez declarados como un array de tipo *double*, se calcula la FFT con la función específica que tiene MATLAB para dicho cálculo, salvando el valor absoluto del resultado en otro *array*. A continuación, cuando la propia aplicación ha calculado la señal en el dominio de la frecuencia mediante el algoritmo de la FFT implementado, se van a exportar los datos obtenidos de la misma forma que se hacía con los datos de la aceleración en el dominio del tiempo. Finalmente, estos datos se introducen en otro *array* en MATLAB para poder comparar los resultados obtenidos. Los gráficos obtenidos son los siguientes:

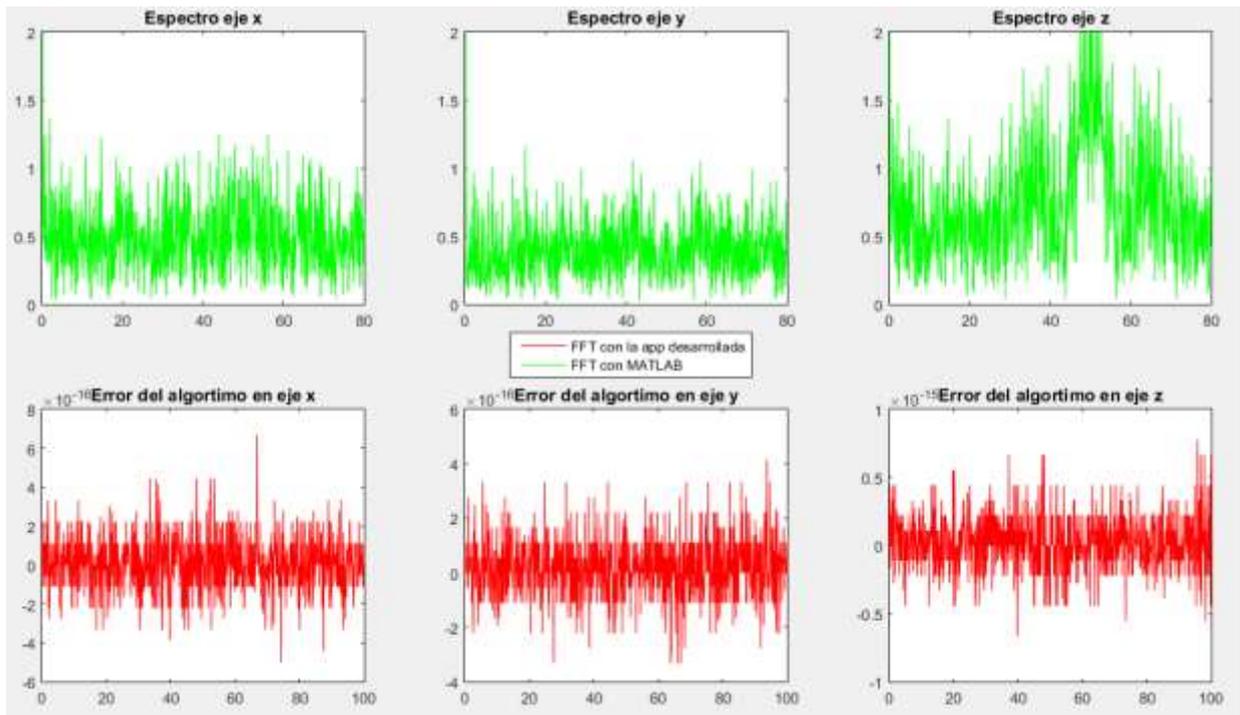


Ilustración 87. Comparación de los valores en frecuencias calculados con MATLAB y en la aplicación desarrollada y error del algoritmo implementado

Para conocer los posibles errores que pueda introducir el algoritmo de la FFT implementado en el fichero FFT.java, se representan los resultados en varias gráficas, dos gráficas por cada eje, de tal forma que en la primera gráfica se representa en verde los resultados de la FFT calculados por la aplicación y en rojo los resultados de la FFT calculados por MATLAB; mientras que en la segunda se calcula el error absoluto entre los dos resultados.

Podemos comprobar que el algoritmo implementado funciona correctamente puesto que los resultados son aproximadamente iguales en los tres ejes, obteniendo un error del orden de 10^{-15} , por lo que se demuestra que la utilización de este algoritmo no constituye una fuente de error en el tratamiento de los datos recogidos por la aplicación.

5.3. Pruebas del error por tiempo de cálculo

Cuando hacemos las mediciones con unos acelerómetros profesionales, se trata de un hardware de adquisición de datos profesional respaldado por un software de mucha potencia que se encargará de hacer medidas y almacenar todos los datos de esas medidas para posteriormente realizar los cálculos finales y llegar a obtener el parámetro que nos ofrece la aplicación desarrollada como resultado final.

Sin embargo, al realizar las mediciones en un *smartphone*, la memoria y la potencia de cálculo del dispositivo no va a ser la misma por lo que, en vez de almacenar todos los datos y posteriormente realizar todos los cálculos a la vez, se realiza un período de toma de datos se realizan los datos oportunos para esos datos, y se vuelve a realizar otra toma de datos y así sucesivamente, por lo que a cada período de muestreo le corresponde un corto período de tiempo de toma de datos.

Durante ese tiempo de realización de cálculos, no se van a tomar datos, por lo que en este punto podemos encontrar una fuente del error entre los datos procedente de los móviles y aquellos procedentes de los acelerómetros. Para ver qué error puede llegar a suponer se han hecho pruebas

con el dispositivo Samsung Galaxy Core II calculando los tiempos de cálculo concretos para cada período de muestras, su media y su impacto con respecto al tiempo de toma de datos.

En una primera prueba se van a realizar un total de 23 períodos de medición, es decir un tiempo de 235.52 segundos. En este caso el *smartphone* no estará utilizando a la vez ninguna otra aplicación que pueda reducir su capacidad de cálculo. Los resultados de los tiempos de cálculo para cada uno de los tiempos de toma de datos son los siguientes:

Nº de muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Tiempo de cálculo	0.63	0.57	0.57	0.59	0.64	0.60	0.64	0.55	0.63	0.70	0.52	
Nº de muestra	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Tiempo de cálculo	0.62	0.57	0.63	0.58	0.64	0.70	0.52	0.57	0.6	0.55	0.71	0.53

La media muestral del tiempo de cálculo en este experimento es de 0.6026 segundos, teniendo en cuenta que el tiempo de toma de datos de media es de 10.24 segundos. Por todo ello en este caso supondría un error relativo del 5.5%

A continuación se realiza una segunda prueba, en el que se utilizan los mismos parámetros, es decir, 23 períodos de muestreo que tienen lugar en 235.52 segundos, pero en este caso, el *smartphone*, va a estar utilizando a la vez otras aplicaciones que puede mermar la memoria y capacidad de cálculo de la aplicación.

Los resultados de los tiempos de cálculo para cada uno de los tiempos de toma de datos en este segundo experimento son los siguientes:

Nº de muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Tiempo de cálculo	0.55	0.67	0.70	0.70	0.55	0.60	0.55	0.70	0.60	0.52	0.69	
Nº de muestra	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Tiempo de cálculo	0.56	0.70	0.57	0.75	0.52	0.62	0.65	0.65	0.66	0.70	0.73	0.65

En este caso vamos a tener una media muestral de 0.6343 segundos de tiempo de cálculo, lo que supone un error relativo total del 6.2%.

Al realizar el mismo experimento con el dispositivo Asus Zenfone Max, con los mismos parámetros y teniendo en cuenta que la frecuencia de muestreo media es de 205 Hz, es decir, que los períodos de toma de muestras son de 5 segundos. Los resultados obtenidos con este dispositivo sin estar otras aplicaciones abiertas a la vez son los siguientes:

Nº de muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tiempo de cálculo	0.208	0.202	0.223	0.205	0.223	0.217	0.195	0.205	0.208	0.194	0.194
Nº de muestra	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Tiempo de cálculo	0.197	0.202	0.189	0.202	0.21	0.209	0.205	0.233	0.211	0.222	0.201

Se obtiene una media muestral del tiempo de cálculo de 0.2068 segundos, que suponen un error relativo del tiempo de cálculo de 2.02%.

De la misma forma que hacíamos en el caso anterior, repetimos el experimento, pero en este caso abriendo otras aplicaciones al mismo tiempo para ver qué impacto tiene sobre el tiempo de cálculo. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Nº de muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tiempo de cálculo	0.215	0.223	0.234	0.221	0.215	0.229	0.218	0.226	0.212	0.209	0.214
Nº de muestra	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Tiempo de cálculo	0.232	0.225	0.224	0.234	0.228	0.208	0.214	0.219	0.216	0.238	0.219

La media muestral del tiempo de cálculo obtenido es de 0.221 segundos, que sobre un tiempo de medición medio de 5 segundos, supone un error relativo del 2.16%

Se ha podido demostrar que al utilizar más aplicaciones al mismo tiempo que el vibrómetro desarrollado, su capacidad de cálculo y su memoria se reduce por lo que aumenta el tiempo de cálculo y de este modo, aumenta el error relativo introducido por esta variación de los tiempos de medición en comparación con los tiempos utilizados por los acelerómetros, aunque en el caso del *smartphone* Samsung Galaxy Core II el error relativo varía en mayor medida, un 0.7%, mientras que en el Asus Zenfone Max, esta diferencia es menor puesto que varía en un 0.14%, al ser un dispositivo con mejores características técnicas, sobre todo en lo que a memoria se refiere.

5.3.1. Distribución del tiempo cálculo

En esta sección se va a explicar cómo se distribuye el tiempo de cálculo, entre las diferentes tareas que va a realizar la aplicación para convertir los datos de aceleración procedentes de los sensores en el valor de la dosis de vibración final.

Los cálculos a realizar por la aplicación son los siguientes:

- Cálculo de la FFT
- Agrupación por tercios de octava
- Ponderación
- Adición de períodos
- Cálculo final
- Reinicio de variables

Para realizar las pruebas que nos permitan ver en qué tareas se destina más tiempo, se van a realizar mediciones con los dispositivos conectados al ordenador poniendo marcas de tiempo en la aplicación a cada paso realizado y comparándolas entre ellas. Los resultados de los porcentajes del tiempo utilizados es el siguiente:



Ilustración 88. Gráfico de distribución de tiempo de cálculo

Tal y como se muestra en el gráfico el cálculo que ocupa el 56% es el cálculo de la *Fast Fourier Transform*, siendo la tarea que ocupa un tiempo mayor, seguida por la agrupación de la aceleración en tercios de octava que constituyen un 30% del tiempo total. El siguiente cálculo, correspondiente con la ponderación de cada uno de los tercios de octava, lleva un 11% del tiempo de cálculo.

Finalmente los tres últimos pasos que tienen un impacto mínimo en el cálculo de la dosis de vibraciones son la adición de los períodos de muestreo, el cálculo final del valor de la dosis y el reinicio de las variables necesario para empezar un nuevo período de muestreo.

5.4. Pruebas con el banco de *squeak and rattle*

Una vez hemos comprobado como la aplicación toma los datos de aceleración de forma correcta, con los acelerómetros que los móviles incorporan y que los transforman a frecuencia también correctamente, es necesario saber si los datos que obtenemos de los acelerómetros son los suficientemente precisos para poder calcular los valores de dosis de vibraciones, y cuál es el rango de margen de error se están manejando en los terminales donde se experimenta la aplicación desarrollada.

5.4.1. Primera prueba sinusoidal

En primer lugar, es necesario saber que es posible que los dispositivos no funcionen de la misma manera ni tengan los mismos márgenes de error trabajando en diferentes frecuencias, por ello se realiza esta prueba.

El experimento consiste en excitar el brazo vibrante a una frecuencia concreta dentro del espectro de interés de las vibraciones de cuerpo entero, de tal manera que se va a realizar una medición de 60 segundos para cada uno de los tercios de octava que estamos considerando, siendo su frecuencia central la que excite al brazo vibrante.

Para la realización de esta prueba se utiliza el software de control denominado Sine Vibration Control, explicado anteriormente en el apartado 3.6.1.

Algunos de los parámetros que hay que introducir para caracterizar el perfil del experimento es la amplitud del movimiento, puesto que la aceleración pico vendrá dada por la frecuencia de cada prueba. El movimiento que se va a provocar corresponde a un movimiento armónico simple (M.A.S.). El desplazamiento del elemento que se expone a dicho movimiento se define con la siguiente ecuación:

$$x = A \operatorname{sen} \omega t + \varphi_0$$

A partir de la cual podemos obtener la fórmula tanto de la velocidad y de la aceleración, con la derivada primera y segunda respecto del tiempo, respectivamente:

$$v = A \omega \cos \omega t + \varphi$$

$$a = -A \omega^2 \operatorname{sen} \omega t + \varphi$$

La aceleración máxima en módulo se alcanzará cuando el desplazamiento del elemento en movimiento sea máximo, es decir, cuando alcance la máxima amplitud, momento en el cual la velocidad será nula. Por ello la aceleración máxima en módulo será:

$$a_{max} = -A \cdot \omega^2 = -A \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2$$

Por ello se puede comprobar que en el caso de tener una frecuencia de 0.5 Hz y una amplitud de 7.6 mm en unidades del Sistema Internacional el valor absoluto de la aceleración máxima siguiendo la ecuación anterior será de 0.075 m/s^2 .

A continuación aparece la tabla donde se muestra en verde los datos de los parámetros de los experimentos realizados para las diferentes pruebas a distintas frecuencias. La amplitud al ser una medida de longitud se expresa tanto en milímetros como en inch o pulgadas, siendo 1 pulgada equivalente a 25.4 mm, aunque la unidad de medida de longitud del Sistema Internacional es el metro. La aceleración está expresada tanto en m/s^2 , la unidad de medida en el Sistema Internacional como en g, de forma que 1 g equivale a 9.81 m/s^2 .

senoidal 1									
	AMPLITUD		Acc. pico		Acc. pico		AMPLITUD		
0,50 Hz	0,300 inch	7,6 mm	0,075 m/s ²	0,0077 g	0,200 g	1,96 m/s ²	198,792 mm	7,83 inch	0,50 Hz
0,63 Hz	0,400 inch	10,2 mm	0,159 m/s ²	0,0162 g	0,200 g	1,96 m/s ²	125,216 mm	4,93 inch	0,63 Hz
0,80 Hz	0,500 inch	12,7 mm	0,321 m/s ²	0,0327 g	0,200 g	1,96 m/s ²	77,653 mm	3,06 inch	0,80 Hz
1,00 Hz	0,500 inch	12,7 mm	0,501 m/s ²	0,0511 g	0,200 g	1,96 m/s ²	49,698 mm	1,96 inch	1,00 Hz
1,25 Hz	0,500 inch	12,7 mm	0,783 m/s ²	0,0799 g	0,200 g	1,96 m/s ²	31,807 mm	1,25 inch	1,25 Hz
1,60 Hz	0,500 inch	12,7 mm	1,284 m/s ²	0,1308 g	0,200 g	1,96 m/s ²	19,413 mm	0,76 inch	1,60 Hz
2,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,401 m/s ²	0,0409 g	0,200 g	1,96 m/s ²	12,425 mm	0,49 inch	2,00 Hz
2,50 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,627 m/s ²	0,0639 g	0,200 g	1,96 m/s ²	7,952 mm	0,31 inch	2,50 Hz
3,15 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,995 m/s ²	0,1014 g	0,200 g	1,96 m/s ²	5,009 mm	0,20 inch	3,15 Hz
4,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	1,604 m/s ²	0,1635 g	0,200 g	1,96 m/s ²	3,106 mm	0,12 inch	4,00 Hz
5,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	2,507 m/s ²	0,2555 g	0,200 g	1,96 m/s ²	1,988 mm	0,08 inch	5,00 Hz
6,30 Hz	0,10 inch	2,5 mm	3,980 m/s ²	0,4057 g	0,200 g	1,96 m/s ²	1,252 mm	0,05 inch	6,30 Hz
8,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	6,418 m/s ²	0,6542 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,777 mm	0,03 inch	8,00 Hz
10,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	10,028 m/s ²	1,0222 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,497 mm	0,02 inch	10,00 Hz
12,50 Hz	0,10 inch	2,5 mm	15,668 m/s ²	1,5971 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,318 mm	0,01 inch	12,50 Hz
16,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	25,670 m/s ²	2,6168 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,194 mm	0,01 inch	16,00 Hz
20,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	40,110 m/s ²	4,0887 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,124 mm	0,00 inch	20,00 Hz
25,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	62,672 m/s ²	6,3886 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,080 mm	0,00 inch	25,00 Hz
31,50 Hz	0,10 inch	2,5 mm	99,498 m/s ²	10,1425 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,050 mm	0,00 inch	31,50 Hz
40,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	160,440 m/s ²	16,3548 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,031 mm	0,00 inch	40,00 Hz
50,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	250,688 m/s ²	25,5543 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,020 mm	0,00 inch	50,00 Hz
63,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	397,992 m/s ²	40,5701 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,013 mm	0,00 inch	63,00 Hz
80,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	641,761 m/s ²	65,4191 g	0,200 g	1,96 m/s ²	0,008 mm	0,00 inch	80,00 Hz

Ilustración 89. Parámetros del experimento sinusoidal realizado con el brazo vibratorio

Debemos tener en cuenta el recorrido que permite el banco de vibración puesto que, dependiendo de las frecuencias, para tener en cuenta ciertas medidas de seguridad, se establecen amplitudes máximas que en el caso de sobrepasarlas se para automáticamente el experimento.

En las frecuencias de hasta 1.60 Hz se fijan los valores de amplitud del movimiento desde 0.3 hasta 0.5 pulgadas, mientras que para frecuencias mayores se establece una aceleración máxima de 0.2 g. Se puede apreciar que para conseguir una misma aceleración a mayor frecuencia debemos reducir la amplitud del movimiento armónico.

Tras configurar esta prueba se exportan los datos procedentes del software controlador del brazo de vibración donde se obtienen los valores de aceleración en dB con referencia a 1g. Estos valores se convierten a unidades naturales en unidad g, partiendo de la siguiente ecuación:

$$a_{dB} = 20 * \log\left(\frac{a_g}{1g}\right) \quad \rightarrow \quad a_g = 10^{\frac{a_{dB}}{20}}$$

A continuación se convierten a unidades del Sistema Internacional, es decir, en m/s^2 , para realizar las ponderaciones en frecuencias y obtener así el valor de la aceleración ponderada en un determinado eje. Además, en este caso el ordenador da los resultados para todo el período del experimento, que son 60 segundos, por lo que no es necesario realizar las adiciones de varios periodos temporales. Finalmente se calcula el valor de la dosis de vibración con referencia a una

hora o $A(1)$, valor que se comparará con los obtenidos en ambos móviles con la aplicación desarrollada.

En las mediciones realizadas con el ordenador se va a trabajar con una frecuencia de muestreo de 25000 Hz, por lo que los resultados son muy fiables y el problema del aliasing queda totalmente descartado. Respecto a los móviles, el terminal Asus Zenfone Max tiene una frecuencia de muestreo de alrededor de 200 Hz, por lo que a frecuencias el problema de aliasing supuestamente no tendría mucho impacto ya que la señal de interés de las vibraciones de cuerpo entero tienen una frecuencia máxima de 80 Hz, por lo que se notaría en frecuencias de alrededor de 100 Hz, aunque es posible que se note también en frecuencias un poco menores, afectando en pequeña medida a los resultados obtenidos. El terminal Samsung Galaxy Core II trabaja con una frecuencia de muestreo de 100 Hz por lo que sí que existe el problema de aliasing a partir de 50 Hz, por lo que a partir de esta frecuencia los resultados obtenidos serán menos fiables que en las frecuencias más bajas.

El experimento realizado realizaba una excitación del brazo vibrante en el eje Y, por lo que son determinantes los resultados calculados en este eje. Por ello se van a comparar en primer lugar los valores de este eje resultantes de los distintos dispositivos a continuación.

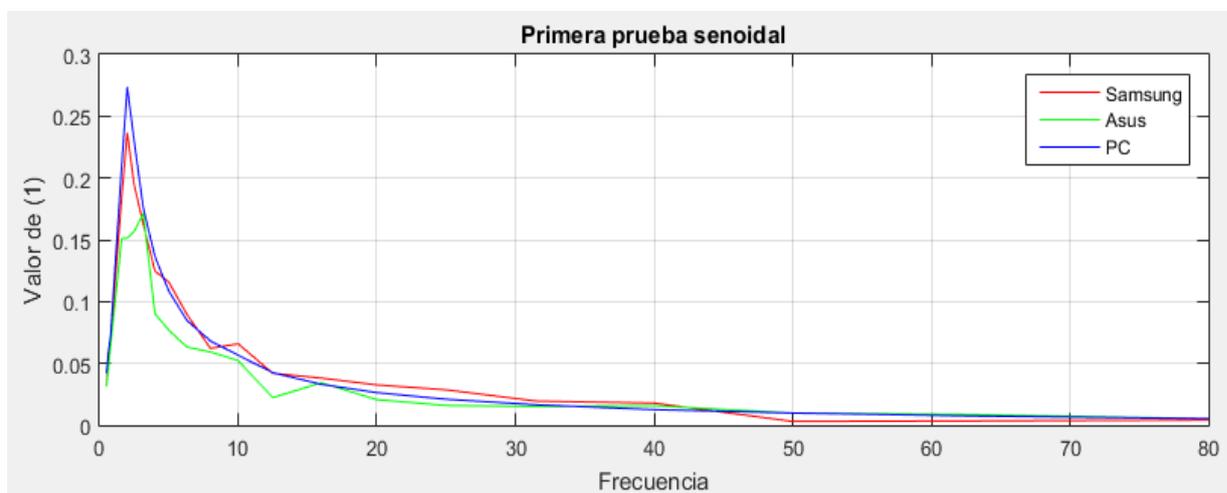


Ilustración 90. Comparación de los valores de aceleración con los acelerómetros y los dos smartphones en el primer experimento sinusoidal

Los valores que se encuentran en color azul corresponden a los valores medidos por los acelerómetros profesionales, los de color verde son los correspondientes a los datos medidos con el terminal Asus Zenfone Max y, por último, los de color rojo son los correspondientes al terminal Samsung Galaxy Core II.

Podemos ver que para frecuencias bajas es el terminal Samsung el que más se aproxima a los resultados de los acelerómetros, pero al aumentar la frecuencia se aprecia que es el terminal Asus el que se acerca más a los valores reales.

Como estos valores son de órdenes de magnitud pequeños para conocer realmente cuáles son los rangos de error que se están cometiendo es necesario calcular el error relativo para dar cuenta de lo válido que pueden ser o no los valores obtenidos.

En la siguiente ilustración se muestra el error relativo de los experimentos en cada uno de los tercios de octava, siendo la gráfica de color verde el error relativo de las mediciones obtenidas en el terminal Asus en comparación con las mediciones obtenidas con los acelerómetros y la gráfica de color rojo el error relativo de las mediciones obtenidas en el terminal Samsung en comparación con los datos obtenidos con los acelerómetros.

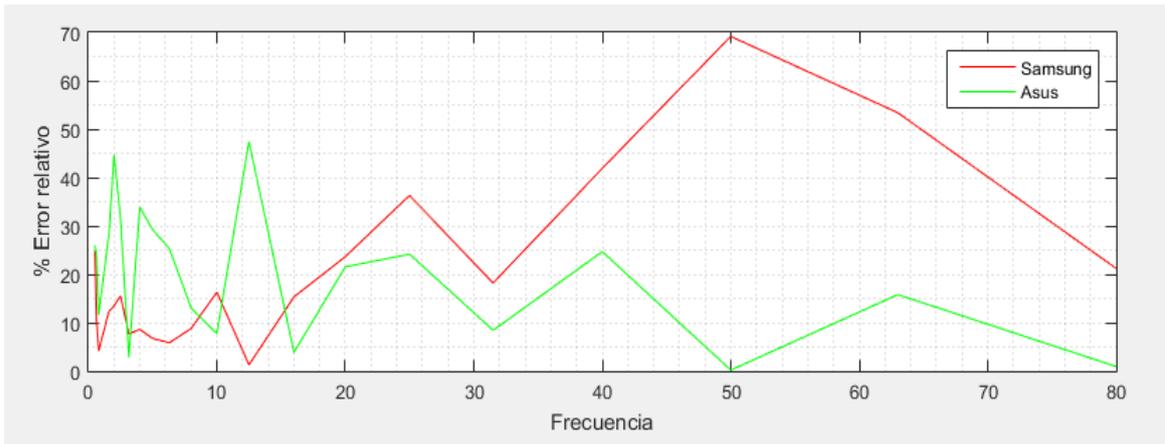


Ilustración 91. Error relativo de los resultados obtenidos en el primer experimento sinusoidal

El error relativo que se obtiene en el terminal Samsung en primer lugar, para las frecuencias bajas de hasta 20 Hz es menor del 20%, pero al pasar esta frecuencia aumentan los errores y a partir de los 40 Hz aumentan más considerablemente los errores por el problema de aliasing.

En el terminal Asus se puede ver que tienen errores mayores para frecuencias bajas, pero al aumentar las frecuencias los errores no aumentan sino que incluso se reducen, por lo que se puede comprobar que en este caso no se hace presente el problema del aliasing.

5.4.2. Segunda prueba sinusoidal

Para verificar las conclusiones obtenidas en el experimento anterior se realiza el mismo experimento una segunda vez. De la misma forma que en el experimento anterior, se realizan mediciones de 60 segundos en las que se van excitando las frecuencias centrales de los diferentes tercios de octava, para ver en qué frecuencias tienen un mayor error los diferentes terminales, teniendo en cuenta la frecuencia de muestreo que tiene cada uno. En este caso, el experimento realizado también realizaba una excitación del brazo vibrante en el eje Y, por lo que se van a comparar los valores de este eje resultantes de los distintos dispositivos y de los acelerómetros profesionales a continuación, obteniendo los siguientes resultados:

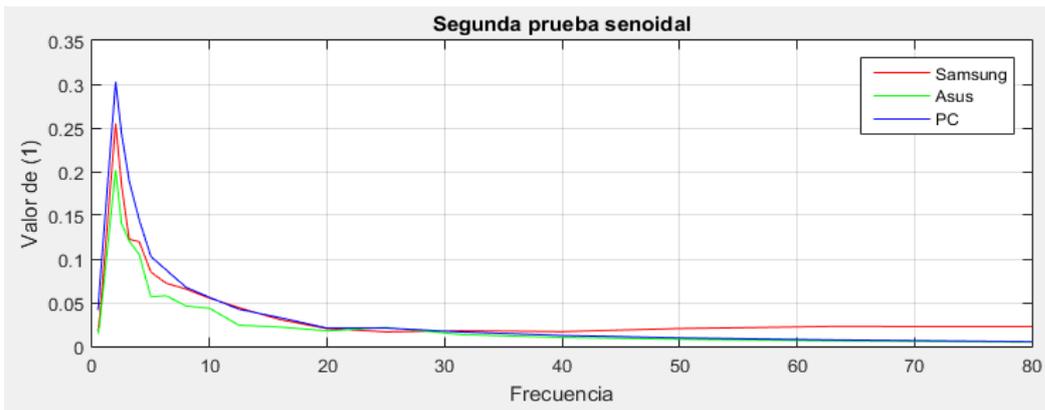


Ilustración 92. Comparación de los valores de aceleración con los acelerómetros y los dos smartphones en el segundo experimento sinusoidal

En esta gráfica se puede apreciar cómo para las frecuencias más bajas, hasta 30 Hz, el terminal Samsung tiene unos resultados más cercanos a los mostrados por los acelerómetros profesionales, mientras que para frecuencias a partir de 30 Hz es el terminal Asus el que tiene unos resultados más cercanos a los ofrecidos por el ordenador a través de los acelerómetros profesionales que miden las vibraciones.

Para poder cuantificar estos errores en la siguiente ilustración se muestra el error relativo de los resultados de ambos *smartphones* con respecto a los de los acelerómetros.

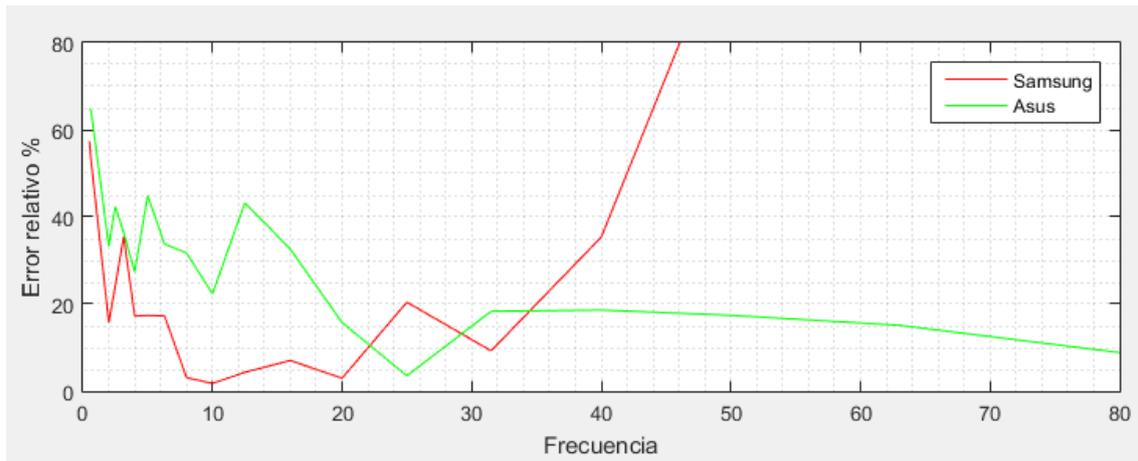


Ilustración 93. Error relativo de los resultados obtenidos en el segundo experimento sinusoidal

En este experimento podemos llegar a unas conclusiones muy parecidas a las del experimento anterior, aunque en este caso, el error mostrado para 0,5 Hz en ambos terminales se muestra mayor para ambos terminales, lo cual puede ser debido a algún tipo de error en la medición o fijación de los dispositivos al brazo vibrador.

Para frecuencias de hasta 30 Hz aproximadamente el terminal Samsung tiene un error que se mantiene menor que el 20% en casi todas las frecuencias exceptuando algún caso en las frecuencias más bajas, cuya causa puede ser el error en el montaje del dispositivo en la medición. En estas frecuencias el terminal Asus mantiene un error relativo de aproximadamente el 40%.

Para frecuencias mayores de 30 Hz es el terminal Asus el que tiene un nivel de error que se mantiene constante por debajo del 20%, mientras que el terminal Samsung tiene un error mucho mayor que hace que sus resultados no sean fiables debido al aliasing explicado anteriormente.

5.4.3. Primera prueba *Random*

Esta prueba consiste en provocar en el brazo vibratorio un movimiento en el que se barren todas las frecuencias dentro del rango de interés, es decir, entre 0.5 y 80 Hz. Para caracterizar este movimiento se pueden establecer como parámetros la amplitud y la aceleración pico como en el experimento anterior y también la densidad espectral de potencia.

Las vibraciones aleatorias se pueden representar en el dominio de la frecuencia mediante la función de densidad de potencia espectral, siendo la unidad más utilizada para medirla g^2/Hz , donde g es la unidad de aceleración explicada anteriormente y donde los Hz se refieren más a un ancho de banda que a una frecuencia única [48].

Sin embargo, la vibración aleatoria es más complicada que la puramente sinusoidal, puesto que si en la vibración sinusoidal la relación entre el valor de pico y el valor R.M.S es de:

$$valor\ pico = \sqrt{2} \cdot RMS$$

en las vibraciones aleatoria esta relación no es tan simple ya que el valor de pico estacionario es aproximadamente de 3 o 4 veces el valor de R.M.S.

La potencia espectral puede ser calculada para cualquier tipo de señal de vibración, pero en la vibración aleatoria se hace especialmente necesario, puesto que hace que sea más fácil caracterizar el movimiento con este parámetro.

En este experimento el movimiento vibratorio aleatorio va a venir dado por el siguiente perfil del establecido mediante el software Random Vibration Control, descrito en el apartado 3.6.2 de esta memoria.

random 1										
	AMPLITUD		Acc. pico		g ² /Hz		Acc. pico	AMPLITUD		g ² /Hz
0,50 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,025 m/s ²	0,003 g	0,0000131	0,200 g	1,96 m/s ²	198,792 mm	7,83 inch	0,0800000
0,63 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,040 m/s ²	0,004 g	0,0000261	0,200 g	1,96 m/s ²	125,216 mm	4,93 inch	0,0634921
0,80 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,064 m/s ²	0,007 g	0,0000535	0,200 g	1,96 m/s ²	77,653 mm	3,06 inch	0,0500000
1,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,100 m/s ²	0,010 g	0,0001045	0,200 g	1,96 m/s ²	49,698 mm	1,96 inch	0,0400000
1,25 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,157 m/s ²	0,016 g	0,0002041	0,200 g	1,96 m/s ²	31,807 mm	1,25 inch	0,0320000
1,60 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,257 m/s ²	0,026 g	0,0004280	0,200 g	1,96 m/s ²	19,413 mm	0,76 inch	0,0250000
2,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,401 m/s ²	0,041 g	0,0008359	0,200 g	1,96 m/s ²	12,425 mm	0,49 inch	0,0200000
2,50 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,627 m/s ²	0,064 g	0,0016326	0,200 g	1,96 m/s ²	7,952 mm	0,31 inch	0,0160000
3,15 Hz	0,10 inch	2,5 mm	0,995 m/s ²	0,101 g	0,0032657	0,200 g	1,96 m/s ²	5,009 mm	0,20 inch	0,0126984
4,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	1,604 m/s ²	0,164 g	0,0066870	0,200 g	1,96 m/s ²	3,106 mm	0,12 inch	0,0100000
5,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	2,507 m/s ²	0,250 g	0,0130605	0,200 g	1,96 m/s ²	1,988 mm	0,08 inch	0,0080000
6,30 Hz	0,10 inch	2,5 mm	3,980 m/s ²	0,406 g	0,0261259	0,200 g	1,96 m/s ²	1,252 mm	0,05 inch	0,0063492
8,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	6,418 m/s ²	0,654 g	0,0534957	0,200 g	1,96 m/s ²	0,777 mm	0,03 inch	0,0050000
10,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	10,028 m/s ²	1,022 g	0,1044838	0,200 g	1,96 m/s ²	0,497 mm	0,02 inch	0,0040000
12,50 Hz	0,10 inch	2,5 mm	15,668 m/s ²	1,597 g	0,2040699	0,200 g	1,96 m/s ²	0,318 mm	0,01 inch	0,0032000
16,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	25,670 m/s ²	2,617 g	0,4279656	0,200 g	1,96 m/s ²	0,194 mm	0,01 inch	0,0025000
20,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	40,110 m/s ²	4,089 g	0,8358703	0,200 g	1,96 m/s ²	0,124 mm	0,00 inch	0,0020000
25,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	62,672 m/s ²	6,389 g	1,6325591	0,200 g	1,96 m/s ²	0,080 mm	0,00 inch	0,0016000
31,50 Hz	0,10 inch	2,5 mm	99,498 m/s ²	10,143 g	3,2675731	0,200 g	1,96 m/s ²	0,050 mm	0,00 inch	0,0012698
40,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	160,440 m/s ²	16,355 g	6,6869622	0,200 g	1,96 m/s ²	0,031 mm	0,00 inch	0,0010000
50,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	250,688 m/s ²	25,554 g	13,0604730	0,200 g	1,96 m/s ²	0,020 mm	0,00 inch	0,0008000
63,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	397,992 m/s ²	40,570 g	26,1258567	0,200 g	1,96 m/s ²	0,013 mm	0,00 inch	0,0006349
80,00 Hz	0,10 inch	2,5 mm	641,761 m/s ²	65,419 g	53,4956973	0,200 g	1,96 m/s ²	0,008 mm	0,00 inch	0,0005000

Ilustración 94. Perfil del experimento de vibración aleatoria. Primera parte

random 2										
	AMPLITUD		Acc. pico		g ² /Hz		Acc. pico	AMPLITUD		g ² /Hz
0,50 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,005 m/s ²	0,001 g	0,0000005	0,040 g	0,39 m/s ²	39,758 mm	1,57 inch	0,0032000
0,63 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,008 m/s ²	0,001 g	0,0000010	0,040 g	0,39 m/s ²	25,043 mm	0,99 inch	0,0025397
0,80 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,013 m/s ²	0,001 g	0,0000021	0,040 g	0,39 m/s ²	15,531 mm	0,61 inch	0,0020000
1,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,020 m/s ²	0,002 g	0,0000042	0,040 g	0,39 m/s ²	9,940 mm	0,39 inch	0,0016000
1,25 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,031 m/s ²	0,003 g	0,0000082	0,040 g	0,39 m/s ²	6,361 mm	0,25 inch	0,0012800
1,60 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,051 m/s ²	0,005 g	0,0000171	0,040 g	0,39 m/s ²	3,883 mm	0,15 inch	0,0010000
2,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,080 m/s ²	0,008 g	0,0000334	0,040 g	0,39 m/s ²	2,485 mm	0,10 inch	0,0008000
2,50 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,125 m/s ²	0,013 g	0,0000653	0,040 g	0,39 m/s ²	1,590 mm	0,06 inch	0,0006400
3,15 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,199 m/s ²	0,020 g	0,0001306	0,040 g	0,39 m/s ²	1,002 mm	0,04 inch	0,0005079
4,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,321 m/s ²	0,033 g	0,0002675	0,040 g	0,39 m/s ²	0,631 mm	0,02 inch	0,0004000
5,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,501 m/s ²	0,051 g	0,0005224	0,040 g	0,39 m/s ²	0,398 mm	0,02 inch	0,0003200
6,30 Hz	0,02 inch	0,5 mm	0,796 m/s ²	0,081 g	0,0010450	0,040 g	0,39 m/s ²	0,250 mm	0,01 inch	0,0002540
8,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	1,284 m/s ²	0,131 g	0,0021398	0,040 g	0,39 m/s ²	0,155 mm	0,01 inch	0,0002000
10,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	2,006 m/s ²	0,204 g	0,0041794	0,040 g	0,39 m/s ²	0,099 mm	0,00 inch	0,0001600
12,50 Hz	0,02 inch	0,5 mm	3,134 m/s ²	0,319 g	0,0081628	0,040 g	0,39 m/s ²	0,064 mm	0,00 inch	0,0001280
16,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	5,134 m/s ²	0,523 g	0,0171186	0,040 g	0,39 m/s ²	0,039 mm	0,00 inch	0,0001000
20,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	8,022 m/s ²	0,818 g	0,0334348	0,040 g	0,39 m/s ²	0,025 mm	0,00 inch	0,0000800
25,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	12,534 m/s ²	1,278 g	0,0653024	0,040 g	0,39 m/s ²	0,016 mm	0,00 inch	0,0000640
31,50 Hz	0,02 inch	0,5 mm	19,900 m/s ²	2,029 g	0,1306293	0,040 g	0,39 m/s ²	0,010 mm	0,00 inch	0,0000508
40,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	32,088 m/s ²	3,271 g	0,2674785	0,040 g	0,39 m/s ²	0,006 mm	0,00 inch	0,0000400
50,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	50,138 m/s ²	5,111 g	0,5224189	0,040 g	0,39 m/s ²	0,004 mm	0,00 inch	0,0000320
63,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	79,598 m/s ²	8,114 g	1,0450343	0,040 g	0,39 m/s ²	0,003 mm	0,00 inch	0,0000254
80,00 Hz	0,02 inch	0,5 mm	128,352 m/s ²	13,084 g	2,1398279	0,040 g	0,39 m/s ²	0,002 mm	0,00 inch	0,0000200

Ilustración 95. Perfil del experimento de vibración aleatoria. Segunda parte

Como se puede observar en este caso, que para cada frecuencia hay varias amplitudes y aceleraciones pico, esto se debe a que al ser un movimiento aleatorio se barren todas las frecuencias, pero variando también los parámetros del experimento para cada una de esas frecuencias, sin mantenerlos fijo como ocurría en el movimiento sinusoidal.

Tras realizar el experimento, se exportan los datos de la misma forma que en el experimento del movimiento sinusoidal. En este caso, al ser el movimiento aleatorio, no se hace un experimento por cada frecuencia, sino que se ha optado por hacer experimentos para diferentes duraciones de la medición, 10, 20, 30 y 60 segundos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

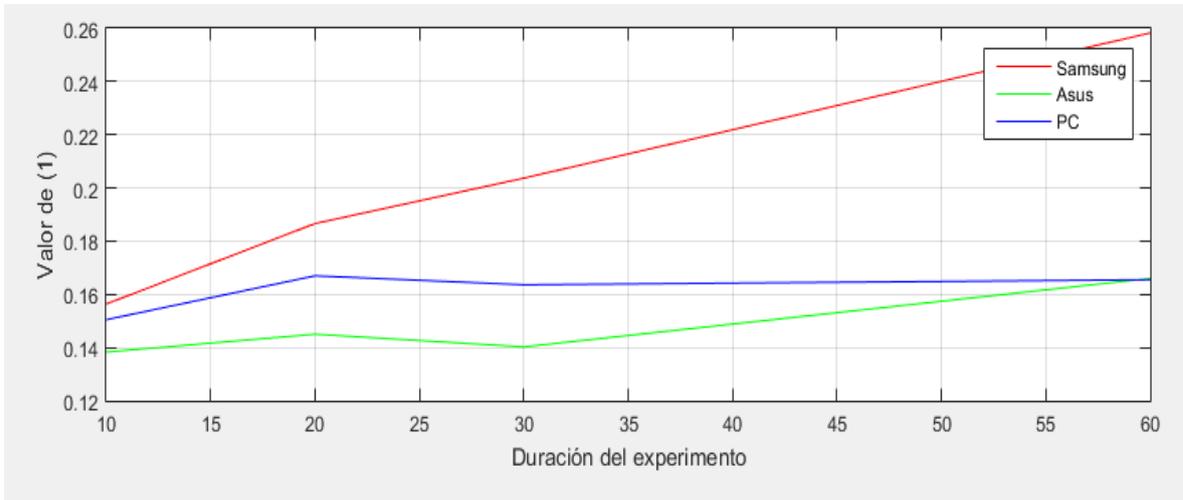


Ilustración 96. Comparación de los valores de aceleración con los acelerómetros y los dos smartphones en el experimento de vibración aleatoria

Podemos ver que el terminal Asus funciona de forma muy correcta en este experimento para las diferentes duraciones del mismo sin acumular grandes cantidades de error, al no desviarse excesivamente de los resultados dados por los acelerómetros profesionales.

Sin embargo, el terminal Samsung para duraciones pequeñas los resultados sí que son próximos a los de los acelerómetros, pero al ir aumentando la duración del experimento los errores se van acumulando y los resultados distan bastante de los esperados. Para poder analizar mejor estos resultados se van a calcular los errores relativos correspondientes a estos experimentos:

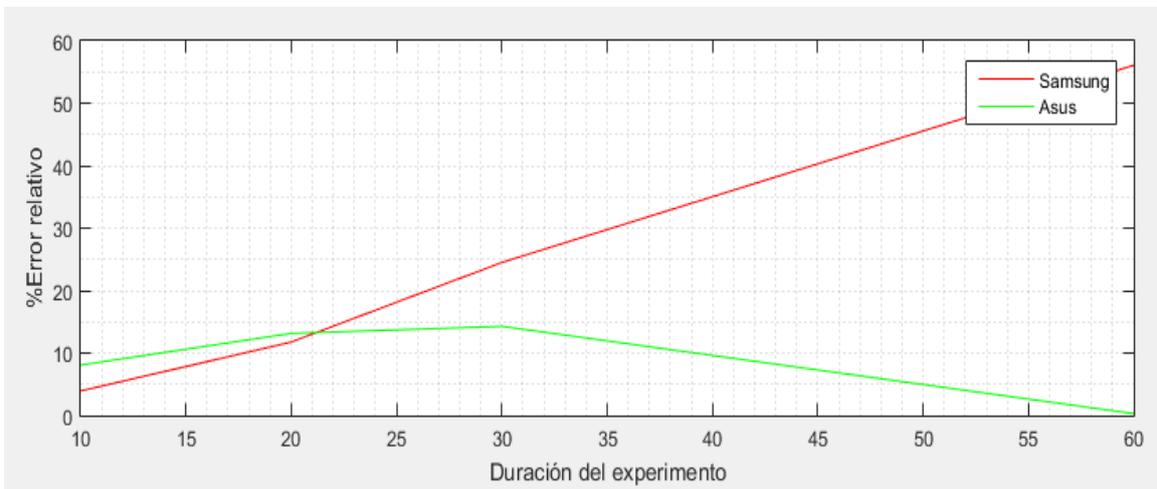


Ilustración 97. Error relativo de los resultados obtenidos en el experimento de vibración aleatoria

Tal y como se muestra en la gráfica anterior el error relativo que se obtiene con el terminal Samsung, en experimentos de hasta 20 segundos, comete un error relativo de hasta el 10%, lo que hace que sea una aproximación correcta. Para el experimento de 30 segundos el error aumenta

considerablemente con un error relativo del 24%, pero es en el experimento de 60 segundos donde el error aumenta considerablemente dando unos resultados que ya no se aproximan a los reales.

Debemos recordar que las mediciones de este terminal para frecuencias de más de 40 Hz, no eran fiables porque aparecía el problema del aliasing. Esta puede ser la razón de que al aumentar la duración este error se vaya acumulando y aumentando así el error relativo obtenido.

El terminal Asus, por el contrario, mantiene unos errores bastante bajos para todas las duraciones de tal forma que los errores obtenidos son los siguientes:

- Para una duración de 10 segundos hay un error relativo de 8.07%
- Para una duración de 20 segundos hay un error relativo de 13.14%
- Para una duración de 30 segundos hay un error relativo de 14.27%
- Para una duración de 60 segundos hay un error relativo de 0.29%

Para este terminal en el experimento anterior se veía que el error se mantenía alrededor del 30% para todas las frecuencias (siendo algo mayor en frecuencias bajas y algo menor en frecuencias altas), por ello no hay un error que se vaya acumulando, haciendo que el error sea relativamente bajo.

5.5. Comparación de pruebas *Random* acotadas

Tras hacer el experimento anterior, en el que se barrían las frecuencias entre 1 Hz y 80 Hz, consideramos necesario conocer cómo era la respuesta de los terminales móviles al hacer barridos de frecuencia de diferentes rangos.

Tal y como se puede demostrar durante la primera prueba sinusoidal graficada en la [Ilustración 91. Error relativo de los resultados obtenidos en el primer experimento sinusoidal] el *smartphone* Samsung Galaxy Core II tiene un error relativo más bajo para las frecuencias menores de 30 Hz, mientras que para estas frecuencias más bajas el *smartphone* Asus Zenfone Max tiene peores resultados obteniendo un error relativo más alto.

Teniendo este hecho en cuenta se van a analizar y comparar los resultados de tres experimentos *Random* que barren estos rangos de frecuencias:

- Entre 1 Hz y 20 Hz
- Entre 1 Hz y 40 Hz
- Entre 1 Hz y 80 Hz

5.5.1. *Random* con frecuencias entre 1 Hz y 20 Hz

En primer lugar podemos decir que, según los resultados obtenidos en los experimentos sinusoidales anteriores, en una prueba en la que sólo se recorren las frecuencias entre 1 y 20 Hz, es el terminal Samsung el que debería obtener mejores resultados. En este caso no se vería afectado por el problema del aliasing, puesto que estas frecuencias están lo suficientemente alejadas de la frecuencia de Nyquist.

En este experimento se han realizado mediciones de varias duraciones: 10, 20 y 30 segundos y 1, 2 y 5 minutos en el que se calculaba los valores de la dosis de vibraciones como $A(1)$. Los resultados obtenidos en esta prueba son los siguientes:

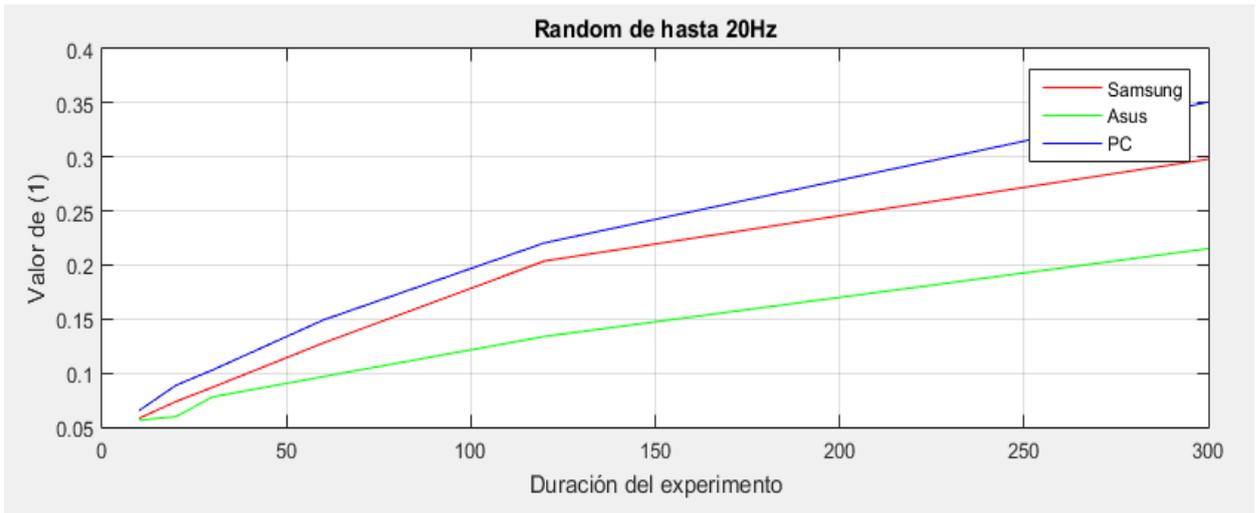


Ilustración 98. Comparación de los valores de aceleración en el experimento Random de entre 1Hz y 20 Hz

Se puede observar que el terminal Samsung obtiene unos resultados más cercanos a los resultantes en los acelerómetros profesionales que los del terminal Asus. Ann así, para conocer qué rango de error estamos considerando en estas frecuencias vamos a analizar el error relativo de estos resultados. La gráfica obtenida es la siguiente:

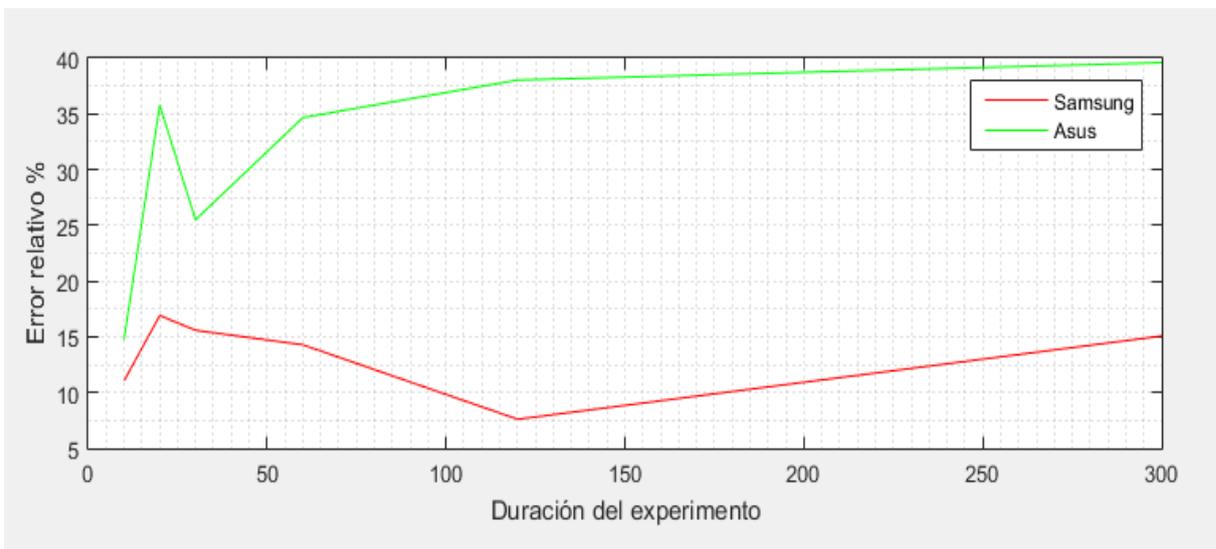


Ilustración 99. Error relativo de los resultados obtenidos en el experimento de vibración aleatoria de entre 1 Hz y 20 Hz

En el experimento sinusoidal, el terminal Asus tienen un máximo de un error relativo del 40% que se dan en las frecuencias más bajas. En este caso vemos que el error relativo de este terminal se mantiene en ese nivel sin llegar al 40% del error.

Sin embargo, el terminal Samsung tiene un mejor comportamiento dentro de las frecuencias más bajas. El resultado del experimento sinusoidal en error relativo tal y como se muestra en [Ilustración 91. Error relativo de los resultados obtenidos en el primer experimento sinusoidal], llega hasta un 15% aproximadamente, de igual manera que en este gráfico.

La conclusión que se ha obtenido de este experimento es que, para frecuencias bajas, los resultados más precisos son los del terminal Samsung, ya que no se ven afectados por el problema del aliasing y se obtienen un error menor a los del dispositivo Asus.

5.5.2. *Random* con frecuencias entre 1 Hz y 40 Hz

En el experimento anterior, al barrer frecuencias de hasta 20 Hz, el problema del aliasing no existía, pero para ver hasta qué frecuencia los resultados del terminal Samsung son fiables. Por esta razón se hace un *random* con frecuencias entre 1 Hz y 40 Hz, de forma que, en este caso, la frecuencia máxima que se excitará será mucho más cercana a la frecuencia de Nyquist, aunque no llegará hasta ella.

Los resultados que se pueden predecir es que este terminal va a seguir teniendo resultados mejores a los del terminal Asus, puesto que el Samsung tiene mejor precisión para frecuencias de hasta 30 Hz, aunque tendrán un error relativo mayor que en el experimento anterior al estar llegando a frecuencias más cercanas a la frecuencia de Nyquist.

En este experimento, se utiliza los mismos parámetros que en el experimento anterior. Los resultados obtenidos en esta prueba son los siguientes:



Ilustración 100. Comparación de los valores de aceleración en el experimento *Random* de entre 1Hz y 40 Hz

En esta gráfica se puede ver que los resultados del terminal Samsung para duraciones pequeñas, el error sigue siendo reducido, pero al aumentar la duración de las mediciones, el resultado se hace más impredecible, puesto que sí que se ve afectado, aunque excesivamente, por el problema del *aliasing*.

El terminal Asus, siempre mantiene una proporcionalidad mayor con respecto a los resultados de los acelerómetros profesionales, de tal forma que siempre va a dar resultados menores que los obtenidos por los acelerómetros y que cuando estos valores aumentan, los resultados del *smartphone* Asus, también aumentan.

Respecto al error relativo de este experimento obtenemos los siguientes resultados:

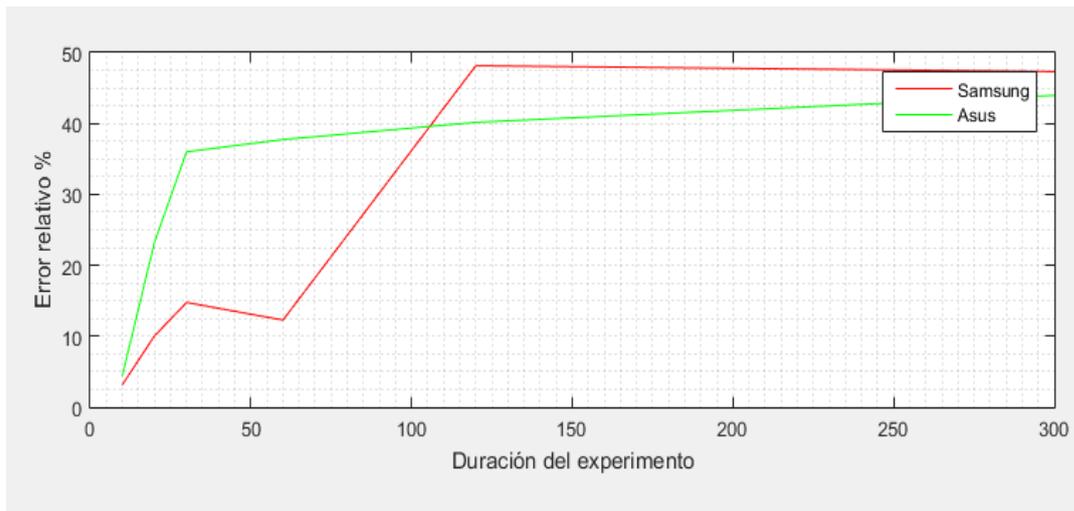


Ilustración 101. Error relativo de los resultados obtenidos en el experimento de vibración aleatoria de entre 1 Hz y 40 Hz

Podemos ver que, al barrer este rango de frecuencias, el terminal Samsung para mediciones de duración cortas de hasta 60 segundos obtienen buenos resultados sin acumular un porcentaje de error alto, pero para mediciones más largas este error aumenta hasta llegar al 50 %.

Por el contrario, el terminal Asus, al estar barriendo frecuencias bajas, en los que su precisión es menor, se obtienen resultados peores, con hasta un 40% de error a partir de las mediciones de 30 segundos que se mantienen casi constantemente en este nivel de error.

En este experimento obtenemos como conclusión que para mediciones de duración mayor que pasa por un rango de frecuencias de hasta un 40% el terminal Samsung se ve afectado por el problema del *aliasing* aumentando su error relativo y haciendo más impredecible su comportamiento.

Sin embargo, el terminal Asus tiene un error relativo mayor, pero su comportamiento es más estable puesto que mantiene este nivel para mediciones de 30, 60, 120 y 300 segundos.

5.5.3. Random con frecuencias entre 1Hz y 80 Hz

A continuación vamos a barrer el espectro casi completo de interés para vibraciones de cuerpo entero, desde 1Hz hasta 80 Hz. En este caso el terminal Samsung que cuenta con una frecuencia de muestreo media de aproximadamente 100 Hz, el aliasing le afectará bastante, mientras que al terminal Asus no le debería afectar al tener frecuencia de muestreo media de 205 Hz.

Los resultados que se pueden predecir es que en este caso al barrer también aquellas frecuencias en las que el terminal Asus es bastante precisos sus resultados deberán ser bastante buenos, mientras que los resultados del terminal Samsung serán más impredecibles y su error relativo debería ser mayor.

Los resultados obtenidos en esta prueba son los siguientes:



Ilustración 102. Comparación de los valores de aceleración en el experimento Random de entre 1Hz y 80 Hz

En esta gráfica es mucho más evidente que en las anteriores que los valores del terminal Samsung se disparan al incluir frecuencias de entre 30 Hz y 80 Hz, por lo que sus resultados no son muy fiables. Sin embargo, el terminal Asus se observa que muestra valores mucho más cercanos a los que mostraba en los experimentos anteriores.

A continuación vamos a calcular el error relativo de este experimento, para poder analizar y cuantificar ese error en cada una de ellas. Los resultados son los siguientes:

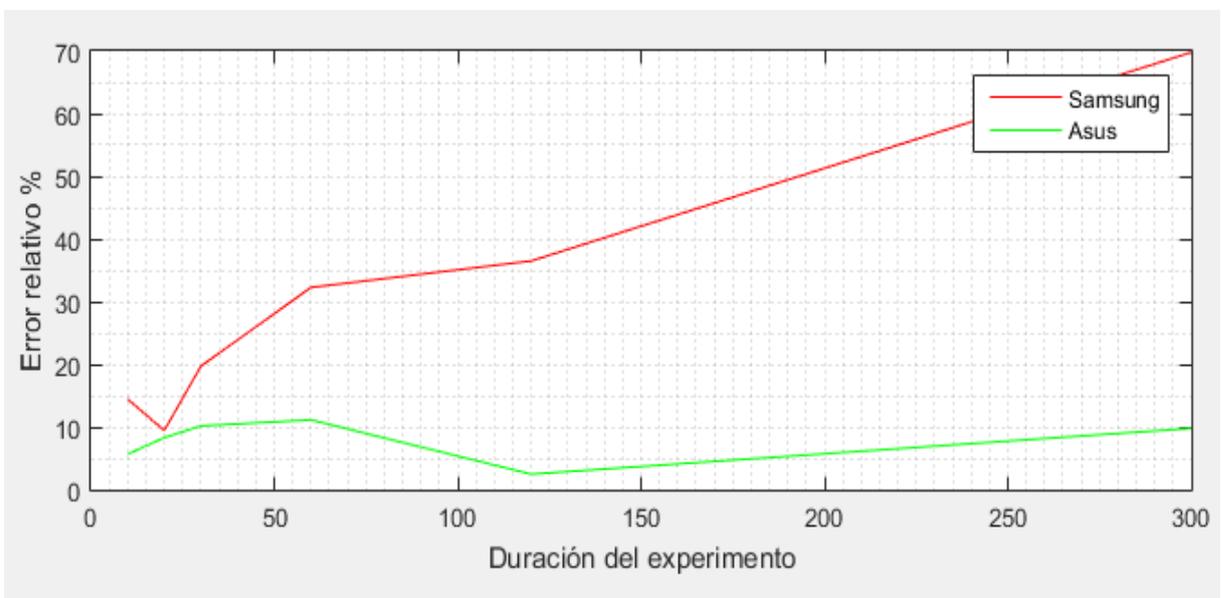


Ilustración 103. Error relativo de los resultados obtenidos en el experimento de vibración aleatoria de entre 1 Hz y 80 Hz

Podemos observar que el error relativo del terminal Samsung es mucho mayor y aumenta con el tiempo, mientras que el terminal Asus tiene un error relativo máximo de un 11%, obteniendo siempre resultados estables al mantenerse el error siempre en este rango.

5.5.4. Comparación de la prueba Random en el terminal Samsung

En esta sección se van a recoger los errores relativos de los tres experimentos anteriores que han barrido diferentes rangos de frecuencias para poder compararlos entre sí de forma más clara.

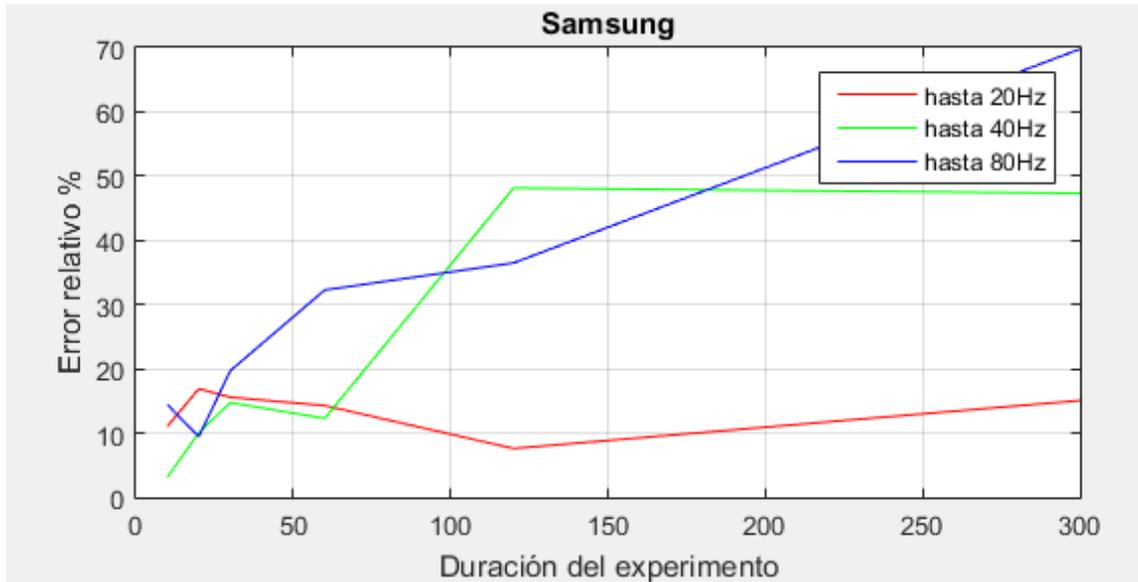


Ilustración 104. Comparación del error relativo del terminal Samsung en los barridos de frecuencia acotados

Se puede apreciar que cuando se barren espectros de frecuencias bajas de hasta 20 Hz el error es muy reducido, mientras que al ir aumentando el rango de frecuencias llegando hasta 40 Hz y 80 Hz, aumenta el error paulatinamente haciendo que los resultados no resulten fiables. Esto se debe a que la frecuencia de muestreo media del terminal Samsung es de 100 Hz aproximadamente por lo que para frecuencias más altas el efecto del aliasing aumenta el error, aunque muestra una mayor precisión que el terminal Asus para las mediciones de frecuencias bajas

5.5.5. Comparación de la prueba Random en el terminal Asus

Los resultados de esta comparación para el *smartphone* de Asus es la siguiente:

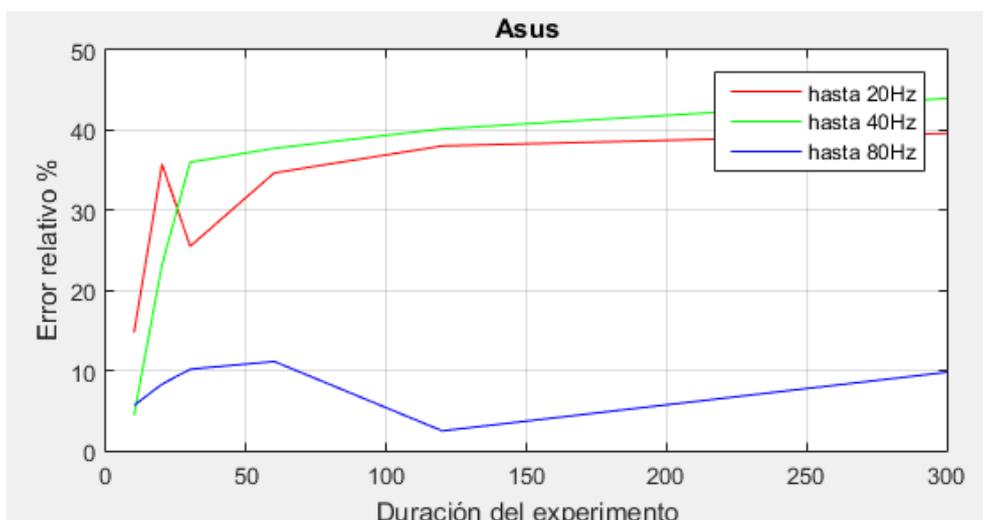


Ilustración 105. Comparación del error relativo del terminal Asus en los barridos de frecuencia acotados

En este caso se observa que para frecuencias bajas el error se mantiene alrededor del 40%, mientras que para frecuencias más altas, en las que el dispositivo tiene una mayor precisión, el error se reduce manteniéndose menor que el 12%.

5.6. Pruebas relacionadas con el número de muestras

Para ver cuál es el número de muestras que nos permite tener un menor error relativo se han hechos algunas pruebas en las que se han cambiado el número de muestras que se toman en cada período antes de tratar los datos de aceleración para convertirlos en el valor de la dosis de vibración final.

Se han hecho las pruebas para varios números de muestras como son 512, 1024, 2048, 4096, 8192 y 16384 muestras. Los resultados del error relativo del valor de A(1) con respecto a los valores dados por los *smartphones* así como la media del error relativo entre ambos dispositivos son los siguientes:

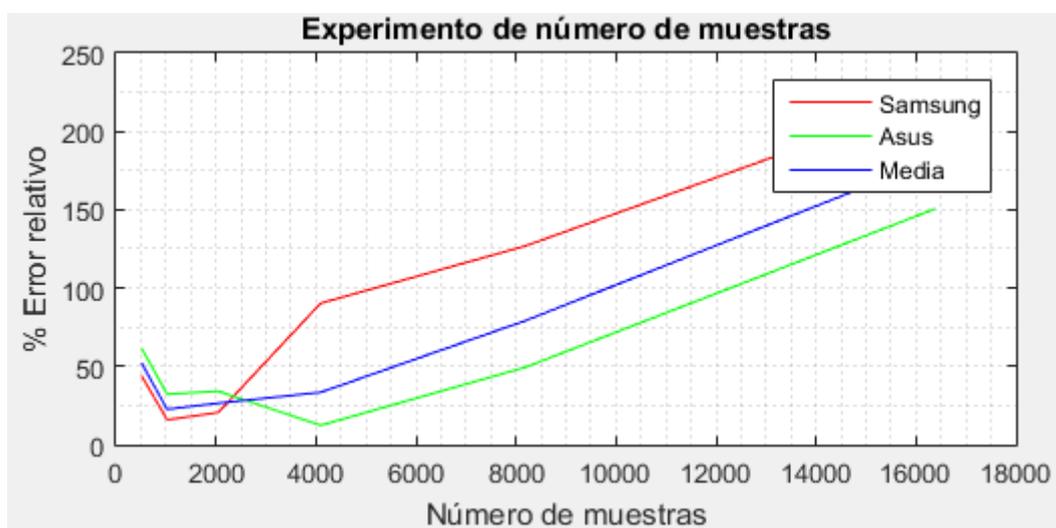


Ilustración 106. Comparación de los valores relativos de los dos terminales para los distintos número de muestras

La gráfica anterior muestra que para ambos dispositivos el número de muestras que da un error relativo más bajo es 1024, que es el que se va a utilizar en la aplicación. Este resultado se debe a que por un lado si tomamos un número de muestras reducido como es el caso de 512 muestras, el tiempo de toma de datos, se reducirá y el tiempo de cálculo también, pero en menor medida, de forma que el error relativo debido al tiempo de cálculo aumentará, haciendo que los resultados sean peores que con 1024 muestras.

Para un tamaño de 2048 muestras, el error relativo es muy próximo al experimento de 1024 muestras, pero ligeramente mayor. Cuando tomamos un número de muestras mayor, el error va aumentando considerablemente, esto se debe a que con tamaños de muestras muy altos el cálculo de la FFT se hace más complejo haciendo que el tiempo en que este cálculo se realiza aumente en gran medida, disparando el error relativo.

También debemos considerar que al almacenar en memoria muestras tan largas, el dispositivo se ralentiza reduciendo mucho su frecuencia de muestreo y provocando que, en aquellas frecuencias en las que el aliasing no debería afectar, al reducir la frecuencia de muestreo, el aliasing suponga un problema y aumente el error relativo.

Al tomar 1024 muestras se consigue un equilibrio que llega a reducir lo máximo posible estos errores, por lo que será el número de muestras utilizado en la aplicación desarrollada.

Capítulo 6. Resultados de campo

En el siguiente capítulo se van a describir los experimentos que se realizaron sobre el tractor New Holland TM 190. En primer lugar se va a explicar la instalación de los equipos de medida sobre el vehículo, para a continuación explicar los resultados de las mediciones sobre los distintos terrenos, carretera, camino, terreno de rastrojos y terreno arado. Finalmente se explicarán las conclusiones que resultan de analizar las mediciones obtenidas, apoyándonos en las conclusiones que se obtuvieron en los experimentos realizados sobre la mesa de vibraciones.

6.1. Instalación de equipos de medida

En primer lugar debemos instalar los acelerómetros profesionales así como su sistema de adquisición, descritos anteriormente en el capítulo de Materiales [3.4.2]

El sistema de adquisición de datos de National Instrument se va a ajustar a una rejilla instalada en la cabina del tractor para que permanezca totalmente fijo, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Ilustración 107. Instalación del sistema de adquisición de datos sobre el tractor

Este sistema va a tener tres canales de entrada y dos canales de salida. Los tres canales de entrada son las conexiones correspondientes a los tres acelerómetros profesionales que toman las medidas en los ejes X, Y y Z. Estos cables se identifican mediante etiquetas de colores para identificar cada uno de estos ejes y evitar así confusiones.

Los canales de salida corresponden, por una parte, con la conexión de alimentación que se conecta a la toma de electricidad que ofrece la cabina del tractor (cable rojo) y, por otra parte, la salida de los datos medidos por los acelerómetros, mediante un cable USB que se conecta al ordenador. A través de este cable USB, y del software específico de National Instruments, importamos los valores de los acelerómetros al ordenador.

El ordenador que registra los datos se situará en la propia cabina del tractor a un lado del asiento del conductor, fijado sobre una balda, de forma que nos permitirá iniciar y detener los registros de datos de los acelerómetros.

Los acelerómetros se van a instalar sobre el respaldo del asiento del conductor adheridos a él. Los *smartphones* se colocarán de la misma forma, tal y como se puede ver a continuación en la siguiente figura:

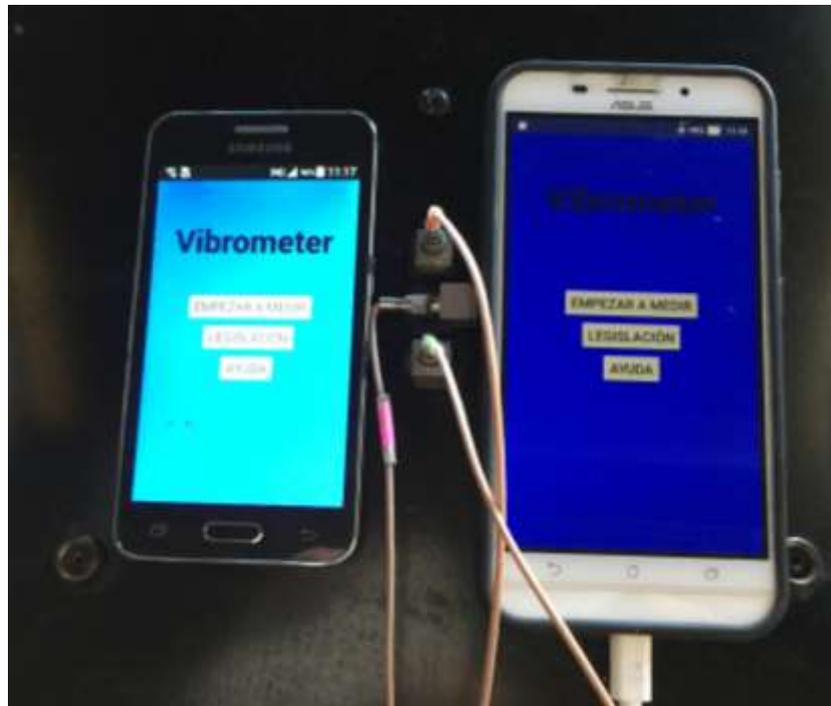


Ilustración 108. Ampliación de la colocación de los smartphones y de los acelerómetros



Ilustración 109. Colocación de los equipos de medida en la cabina del tractor

Una vez tenemos los equipos instalados se hacen algunas pruebas de calibración antes de trasladarnos a los distintos terrenos sobre los cuales se van a realizar los diferentes experimentos y pruebas de medición.

Antes de explicar las mediciones realizadas sobre los distintos terrenos vamos a recordar las conclusiones obtenidas anteriormente. El terminal Samsung tiene una frecuencia de muestreo media de 100 Hz aproximadamente, por lo que, si las vibraciones a las que se expone el dispositivo pertenecen a altas frecuencias, los resultados tienen un mayor error (debido al aliasing), mientras que si en estas vibraciones predominan las frecuencias bajas, sus resultados son incluso más precisos que en el terminal Asus.

El terminal Asus, al tener una frecuencia de muestreo media de aproximadamente 200 Hz, no se encuentra afectado por el problema del aliasing y sus resultados son fiables para todo el rango de frecuencias de interés para las vibraciones de cuerpo entero, pero sus resultados para las frecuencias más bajas no son tan precisos como los obtenidos con el terminal Samsung.

En primer lugar se mostrarán los resultados obtenidos en los diferentes terrenos para finalmente explicar las conclusiones que se pueden obtener a partir de estos resultados.

6.2. Mediciones sobre carretera

Estas primeras mediciones se realizaron sobre una carretera secundaria en el municipio de *Aguilar de Bureba* en la provincia de Burgos, mostrada en la siguiente figura:



Ilustración 110. Carretera, primer terreno donde se realizan las pruebas de campo

Estas pruebas se realizarán a una velocidad aproximadamente constante de 15 km/h y con una duraciones de 60 segundos, 30 segundos, 120 segundos y 300 segundos.

Los resultados para el eje Y son los siguientes:

Duración	60 seg	60 seg	120 seg	120 seg	30 seg	30 seg	300 seg	300 seg
Error relativo terminal Samsung	28.8%	18.3%	14.15%	12.5%	6.4%	34.8%	5.88%	9.36%
Error relativo terminal Asus	30.4%	36.5%	33.6%	32.5%	18.9%	2%	29.2%	34%

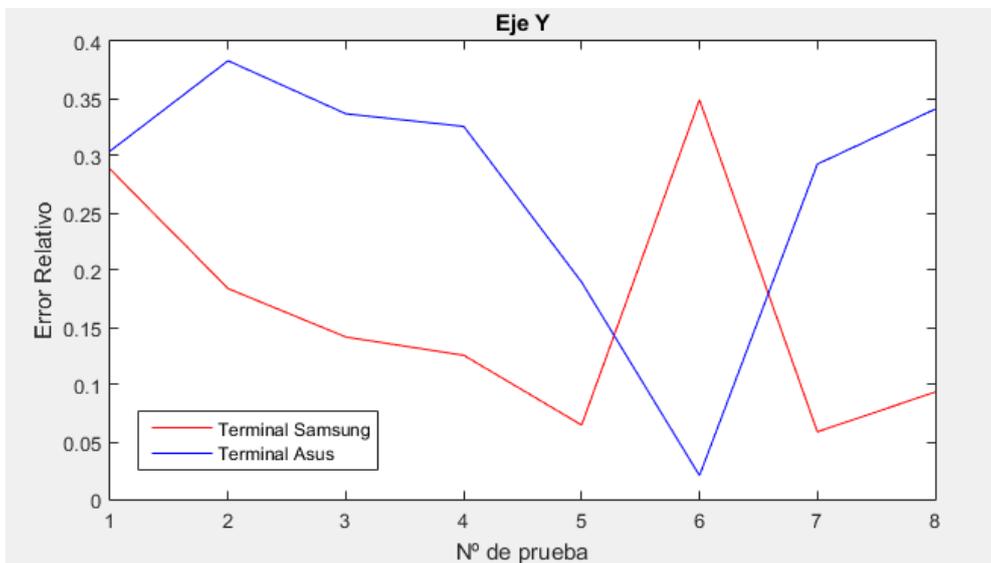


Ilustración 111. Error relativo en las pruebas por carretera en el eje Y

Los resultados para el eje X son los siguientes:

Duración	60 seg	60 seg	120 seg	120 seg	30 seg	30 seg	300 seg	300 seg
Error relativo terminal Samsung	9.2%	13.7%	21.1%	23.25%	10.8%	7.1%	25.6%	11.5%
Error relativo terminal Asus	7.5%	1.1%	3.91%	3.03%	1.18%	13.8%	0.3%	3.03%

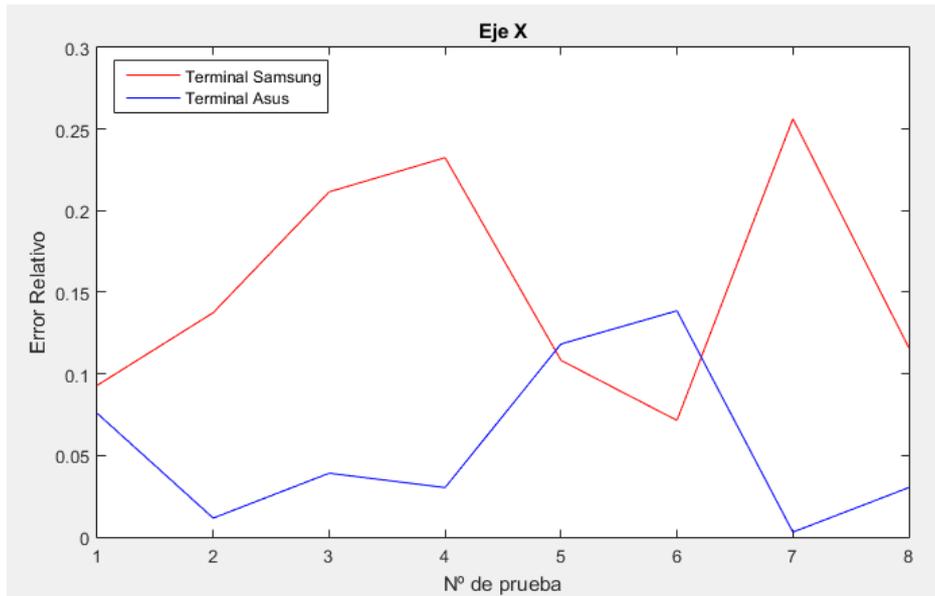


Ilustración 112. Error relativo en las pruebas por carretera en el eje X

Los resultados para el eje Z son:

Duración	60 seg	60 seg	120 seg	120 seg	30 seg	30 seg	300 seg	300 seg
Error relativo terminal Samsung	205%	228%	211%	143%	288%	176%	190%	217%
Error relativo terminal Asus	220%	275%	257%	74%	250%	179%	225%	215%

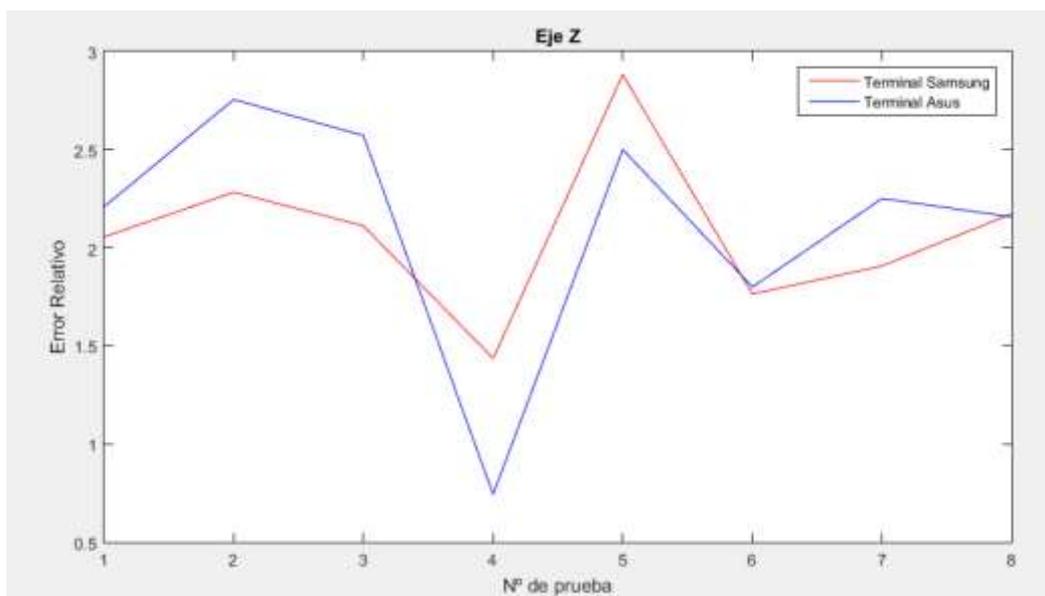


Ilustración 113. Error relativo en las pruebas por carretera en el eje Z

6.3. Mediciones sobre camino

Las mediciones que se describen a continuación se realizaron en el mismo municipio que las anteriores sobre un camino que de tierra, tal y como se muestra en la siguiente ilustración:



Ilustración 114. Camino, segundo terreno donde se realizan las pruebas de campo

En este caso se realizaron mediciones de 60 segundos a 15 km/h y 10 km/h respectivamente.

Los resultados para el eje Y son los siguientes:

Velocidad	15 km/h	15 km/h	10 km/h	10 km/h
Error relativo terminal Samsung	16.6%	7.2%	24%	28.1%
Error relativo terminal Asus	37.46%	10.28%	36.5%	31.03%

Los resultados para el eje X son los siguientes:

Velocidad	15 km/h	15 km/h	10 km/h	10 km/h
Error relativo terminal Samsung	16.9%	25.5%	28.7%	25.9%
Error relativo terminal Asus	5.6%	21.26%	24.52%	32.9%

Los resultados para el eje Z son los siguientes:

Velocidad	15 km/h	15 km/h	10 km/h	10 km/h
Error relativo terminal Samsung	135%	10%	150%	215%
Error relativo terminal Asus	77%	78%	106%	160%

6.4. Mediciones sobre terreno con rastrojos

Las siguientes mediciones se realizaron sobre un terreno con rastrojos adjunto al camino donde se realizaron las mediciones anteriores, en el mismo municipio. Este terreno se puede ver en la siguiente ilustración.

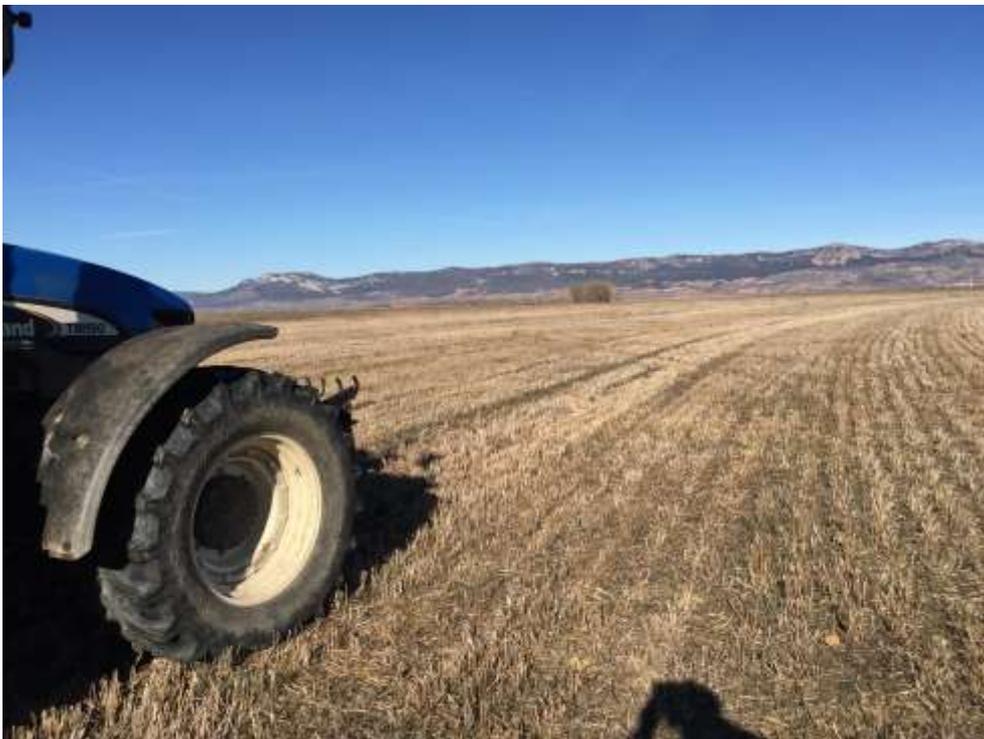


Ilustración 115. Rastrojos, tercer terreno donde se realizan las pruebas de campo

En este experimento se realizarán mediciones de 60 segundos, a 10 km/h y 7,5 km/h, y de 30 segundos, 120 segundos y 300 segundos, a 10 km/h

Los resultados obtenidos en el eje Y son los siguientes:

Duración	60 seg	60 seg	30 seg	30 seg	120 seg	120 seg	300 seg	300 seg	60 seg	60 seg
Error relativo terminal Samsung	29.8%	21.2%	27.4%	19.1%	32.4%	22.2%	29%	29.6%	7.2%	18.4%
Error relativo terminal Asus	5.4%	38.4%	37%	32.1%	46.6%	38.6%	44%	47.2%	32%	38.9%

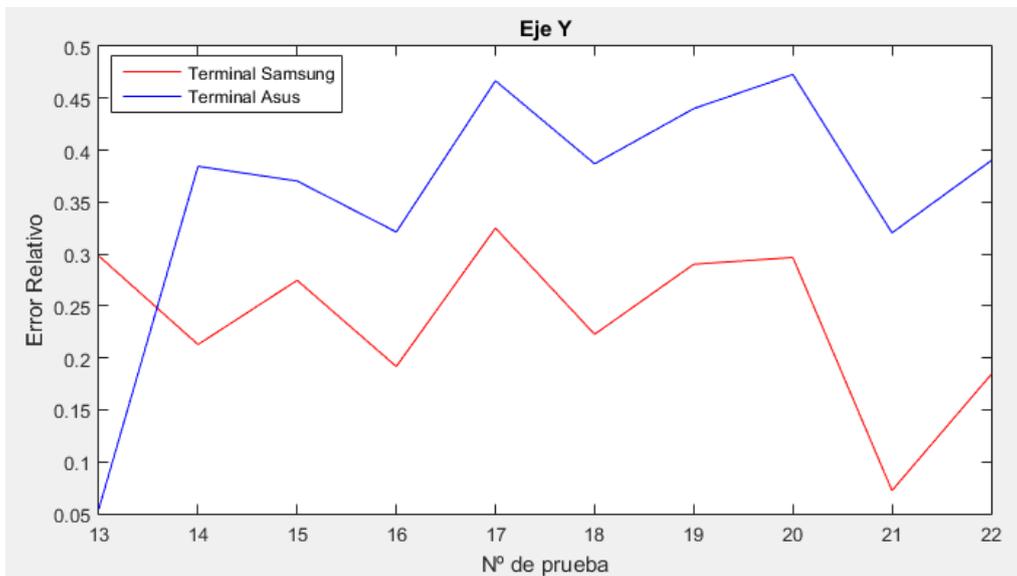


Ilustración 116. Error relativo en las pruebas sobre rastrojo en el eje Y

Los resultados obtenidos en el eje X son los siguientes:

Duración	60 seg	60 seg	30 seg	30 seg	120 seg	120 seg	300 seg	300 seg	60 seg	60 seg
Velocidad	10 km/h	7.5 km/h	7.5 km/h							
Error relativo terminal Samsung	8.4%	8.4%	29.8%	20.4%	16.1%	10.9%	14.3%	11.6%	15.2%	9.6%
Error relativo terminal Asus	21%	21.2%	4.4%	1.7%	13.3%	12.6%	10.3%	12.1%	28.3%	33.5%

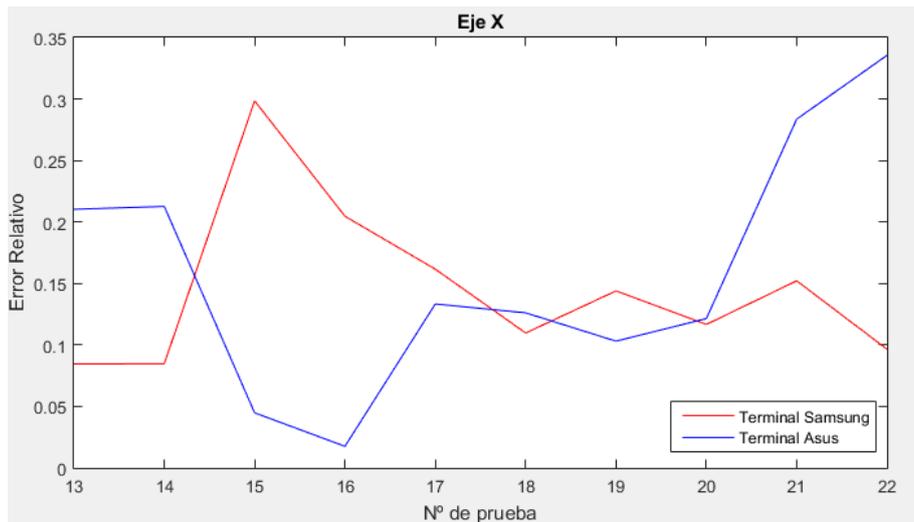


Ilustración 117. Error relativo en las pruebas sobre rastrojo en el eje X

Los resultados obtenidos en el eje Z son los siguientes:

Duración	60 seg	60 seg	30 seg	30 seg	120 seg	120 seg	300 seg	300 seg	60 seg	60 seg
Velocidad	10 km/h	7.5 km/h	7.5 km/h							
Error relativo terminal Samsung	141%	165%	202%	241%	179%	135%	163%	163%	94%	94%
Error relativo terminal Asus	38%	116%	132%	166%	120%	91%	103%	106%	63%	64%

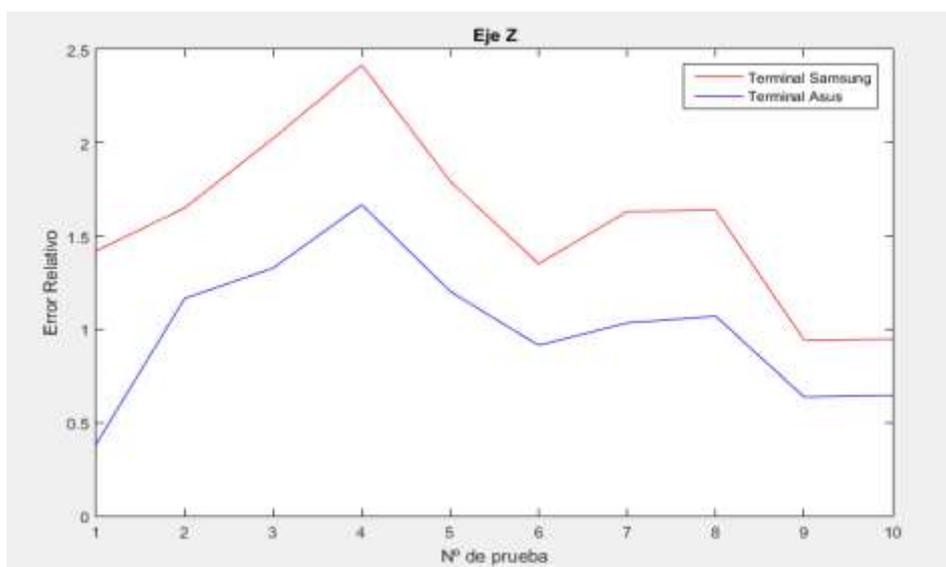


Ilustración 118. Error relativo en las pruebas sobre rastrojo en el eje Z

6.5. Mediciones sobre terreno arado

Estas últimas mediciones se realizaron sobre un terreno arado, mostrado en la siguiente ilustración:



Ilustración 119. Terreno arado, cuarto terreno donde se realizan las pruebas de campo

Sobre este terreno se realizarán dos mediciones de 60 segundos a 10 km/h.

Los resultados sobre el eje Y son:

Duración	60 segundos	60 segundos
Velocidad	10 km/h	10 km/h
Error relativo terminal Samsung	27.3%	9.5%
Error relativo terminal Asus	42.2%	18.3%

Los resultados sobre el eje X son:

Duración	60 segundos	60 segundos
Velocidad	10 km/h	10 km/h
Error relativo terminal Samsung	8.1%	25.8%
Error relativo terminal Asus	31.3%	1.9%

Los resultados sobre el eje Z son:

Duración	60 segundos	60 segundos
Velocidad	10 km/h	10 km/h
Error relativo terminal Samsung	63.5%	96.8%
Error relativo terminal Asus	29.8%	57.1%

6.6. Conclusiones

Tal y como podemos ver en los resultados mostrados anteriormente, como regla general, para el eje Y, los errores relativos obtenidos en los experimentos anteriores son menores para el terminal Samsung que para el terminal Asus, mientras que para el eje X, los errores relativos obtenidos son menores para el terminal Asus que para el terminal Samsung.

En los anteriores experimentos destaca, en gran medida, los altos valores de error relativo del eje Z. Este error ha podido ser debido a la mala instalación de los dispositivos, que hizo que los valores del eje Z de los experimentos no puedan ser fiables, puesto que los dispositivos estaban fijados al asiento de tal forma que no detectaban las vibraciones correctamente.

Al analizar los resultados obtenidos por los acelerómetros profesionales podemos concluir que en estos experimentos, las aceleraciones registradas para el eje X, tienen un mayor peso sobre las frecuencias más altas (desde 31.5 Hz hasta 80 Hz) que el eje Y. Por lo que según las conclusiones de los experimentos sobre mesa de vibraciones, esto significaría que, en el eje X, el terminal Asus debería tener un error menor que el terminal Samsung ya que no se encuentra afectado por el fenómeno del aliasing. En el eje Y, sin embargo, como estas frecuencias son casi insignificantes, el problema del aliasing no afectaría a los resultados. Teniendo en cuenta que la frecuencia predominante es de alrededor de 16 Hz, rango en el cual el terminal Samsung es más preciso, en el eje Y, debería tener menos error el terminal Samsung. Estos resultados son los obtenidos tal y como se puede ver en las gráficas mostradas anteriormente.

Conclusiones

Esta memoria comienza con un estudio de todas aquellas tecnologías relacionadas con el desarrollo y evaluación de esta aplicación. En él, en primer lugar, se ha repasado el concepto de vibraciones, ya que, conocer qué son y cómo podemos medirlas, ha sido un aspecto clave para el desarrollo de esta aplicación. A continuación se han revisado los distintos sistemas de suspensión con los que cuentan los tractores que permiten reducir la dosis de vibraciones a las que se exponen las personas que lo conducen. En este aspecto, se ha podido concluir que existe una línea de investigación para desarrollar estos sistemas, por parte de las empresas del sector, que están altamente interesadas en mejorar las condiciones y la comodidad en las que operan los trabajadores de este campo. También se ha hecho un repaso de los efectos que la exposición a las vibraciones pueden tener sobre las personas expuestas, así como las medidas de prevención y la legislación existente en la actualidad. Los organismos competentes han dictado estas leyes para proteger la salud y el bienestar de los trabajadores durante sus horas de trabajo. Los parámetros considerados en estos textos legislativos, son aquellos que se podrán calcular con la aplicación desarrollada, evaluando si los resultados obtenidos son lo suficientemente fiables, mediante su comparación con aquellos obtenidos con acelerómetros profesionales.

Se ha finalizado esta primera parte de la memoria con una explicación sobre Android, el sistema operativo que soporta la aplicación y sus características técnicas. Esto ha sido necesario para argumentar porque se ha elegido este sistema para el desarrollo de la aplicación siendo las razones principales la gran cantidad de usuarios que utiliza Android, su código abierto y la variedad de dispositivos que son capaces de soportarlo. Además se ha realizado una revisión de las distintas aplicaciones desarrolladas para *smartphones* que son capaces de medir vibraciones y dar diferentes parámetros de medida sobre ellas. Con esto se ha podido demostrar que existen varias aplicaciones de este tipo pero ninguna de ellas utiliza estas mediciones para calcular el valor de la dosis diaria normalizada a ocho horas, parámetro que utiliza la legislación para valorar si estas vibraciones sobrepasan los límites establecidos.

En el siguiente capítulo de este trabajo, se ha abordado todo lo relacionado con el desarrollo de la aplicación, explicando tanto su fundamentación teórica como su implementación sobre el código de desarrollo de la aplicación. Para que la aplicación pueda funcionar y ser instalada correctamente sobre un dispositivo, éste debe cumplir una serie de requisitos técnicos que se especifican al principio de este capítulo. El desarrollo de la aplicación se ha estructurado en dos partes principales, en primer lugar, la adquisición de los datos y en segundo lugar, el tratamiento de los mismos.

Para adquirir los datos de aceleración a la que se expone el dispositivo, se han utilizado los sensores que éste incorpora, en concreto, el acelerómetro. Cada dispositivo, dependiendo de su marca y sus especificaciones técnicas, integra en su hardware un acelerómetro capacitivo distinto. Estos sensores van evolucionando de la misma forma que lo hacen los nuevos dispositivos inteligentes, haciéndose cada vez más sensibles y aumentando su frecuencia de muestreo. En este punto, se llegó a la conclusión de que una especificación técnica determinante, tanto para el buen funcionamiento de la aplicación, como para la fiabilidad y estabilidad de los datos, es la frecuencia de muestreo de cada dispositivo. Esto se explica mediante la teoría de muestreo de Nyquist, que afirma que una señal puede ser reconstruida si se utiliza una frecuencia de muestreo cuyo valor debe ser igual, o mayor, al doble de la frecuencia máxima del rango de interés de la señal. El rango de frecuencias de interés que estamos considerando es de entre 0.5 Hz y 80 Hz, propio de las vibraciones de cuerpo entero, de tal forma que para que no se produjera el fenómeno del aliasing, que tiene lugar cuando la frecuencia de muestreo es menor que el doble de la frecuencia máxima de la señal, la frecuencia de muestreo que deberían tener los dispositivos sobre los que se utilizará la aplicación sería de un mínimo de 160 Hz. Esta característica está disponible en el hardware integrado en los dispositivos más nuevos, sacados al mercado en los últimos dos años aproximadamente. Por todo ello, se ha estudiado cuál es la frecuencia de muestreo mínima que

debe tener un dispositivo para que sus resultados sean fiables y estables, aunque éstos se encuentren afectados por el aliasing, ya que el peso de los valores de las octavas de frecuencia más altas es menor que el peso que tienen otras octavas de frecuencia, por lo que, el error que podría llegar a suponer podría ser bajo y afectar en pequeña medida a los resultados finales.

Una vez se han tomado los datos de aceleración la aplicación trata estos datos de aceleración en el dominio temporal para llegar al valor final de dosis de vibración normalizado. Para llegar a este resultado, se ha seguido un proceso de cálculo que comienza con el paso de los valores de aceleración en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante la FFT (*Fast Fourier Transform*), un algoritmo que calcula la transformada de Fourier, reduciendo la carga computacional del cálculo. A continuación se agrupan los valores por tercios de frecuencia para lo cual, al estar manejando valores discretos, la integración de los valores en frecuencia se realiza utilizando la fórmula de la suma de Riemann. El siguiente paso en el tratamiento de los datos ha sido la ponderación en frecuencia, definida en la norma UNE-ISO 2631-1 sobre la evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero. Finalmente tras hacer la adición de los diferentes períodos de muestreo con los resultados obtenidos en cada uno de ellos, se obtiene el valor de la dosis de vibración normalizada. Durante este proceso se ha podido demostrar la capacidad de los dispositivos Android para la realización de procesos matemáticos mediante el uso de las clases propias del API proporcionado por Java y de algoritmos propios como el utilizado en el cálculo de la FFT.

Seguidamente se ha realizado un repaso de los materiales, tanto hardware como software, usados en este estudio con la finalidad de determinar la viabilidad de su utilización para la evaluación de los resultados obtenidos. Por una parte, se han descrito las características técnicas de los tres *smartphones* donde se realizan las diferentes pruebas de la aplicación desarrollada. Ambos terminales Samsung fueron lanzados al mercado años antes que el terminal Asus, lo que se refleja en su frecuencia de muestreo, ya que, en los terminales Samsung tienen un valor de 100 Hz aproximadamente, mientras que, en el terminal Asus, tiene un valor de 205 Hz aproximadamente. Esta elección no fue trivial, puesto que esta diferencia nos ha permitido evaluar la aplicación sobre dispositivos con distintas características técnicas. Por otra parte, se han explicado los materiales utilizados en las pruebas en la mesa de vibraciones y en las pruebas de campo, así como sus limitaciones.

Se ha demostrado que, aunque no todos los dispositivos son adecuados para la medida de las vibraciones, el banco *squeak & rattle* nos ha permitido realizar pruebas en el rango de frecuencias de interés con la fiabilidad suficiente para la evaluación de la aplicación, aunque presenta limitaciones en las excitaciones de las frecuencias más bajas. Este banco está formado por un excitador y varios acelerómetros profesionales que nos han permitido realizar tareas tanto de realimentación y control de las vibraciones generadas como de medición, exportando los datos a través del hardware de adquisición de datos de *National Instruments*. Los datos exportados por los acelerómetros profesionales de medida, tras pasar por los sistemas de adquisición de datos, son interpretados por el software Signal Express, de forma que nos han permitido obtener los valores reales de medida de las vibraciones. Además se han utilizado otros software para el control del banco *squeak & rattle*, la herramienta matemática MATLAB y Android Studio, el entorno de desarrollo integrado (IDE) que nos permite desarrollar aplicaciones para Android. Finalmente se ha descrito el tractor que se ha utilizado durante las pruebas de campo de la aplicación, puesto que sus características, van a condicionar los resultados obtenidos en estos experimentos.

Para buscar posibles fuentes de error se han realizado experimentos específicos en los que se determina el posible error de algunas partes concretas del proceso de cálculo. Se han realizado pruebas en las que se ha comprobado que el algoritmo de la FFT funciona de forma correcta obteniendo unos errores casi imperceptibles, de forma que no se ha considerado como una fuente de error. También se ha realizado mediciones del tiempo de cálculo, ya que cada período de muestreo va seguido de un tiempo de cálculo en el que no se van a tomar medidas de aceleración; en este caso, esta diferencia sí que va a suponer una fuente de error, cuyo alcance depende de la velocidad de cálculo del dispositivo. En el dispositivo Samsung Galaxy Core II se ha obtenido

que el tiempo de cálculo supone un error relativo de hasta el 6.2% si el dispositivo está corriendo a la vez otras aplicaciones y del 5.5% si solo está corriendo esta aplicación. En el Asus Zenfone el error causado por el tiempo de cálculo ha resultado ser del 2.02% si solo está utilizando esta aplicación y del 2.16% si está utilizando otras aplicaciones a la vez. Esto se debe a que los resultados están influenciados por los procesadores de los *smartphones*, ya que la frecuencia de muestreo depende del *hardware* y de la gestión del *software* que realizan las aplicaciones.

Finalmente también se han hecho experimentos en los que se ha variado el número de muestras que toma el dispositivo, ya que si este número es muy reducido el tiempo de cálculo supondrá un mayor error, pero si el número de muestras es muy alto el cálculo de la FFT se hace más complejo haciendo que el tiempo en que este cálculo se realiza aumente, disparando el error relativo; además debemos considerar que al almacenar en memoria muestras muy largas, el dispositivo se ralentiza reduciendo mucho su frecuencia de muestreo y provocando que, en aquellas frecuencias en las que el aliasing no debería afectar, al reducir la frecuencia de muestreo, el aliasing suponga un error mayor. Por todo ello, se ha determinado que el número de muestras que reduce al máximo el error será 1024 muestras, que es el número de muestras utilizados en las siguientes pruebas.

A continuación se han descrito las pruebas realizadas sobre la aplicación, primero en una mesa de vibraciones generadas de forma controlada y mediante *software* específico, y también sobre un tractor, que es la situación real a la que está destinada la aplicación.

En las pruebas sobre mesa de vibraciones se han realizado, por un lado, pruebas sinusoidales en las que se excita una frecuencia de forma predominante sobre el resto, y por otro lado, pruebas *random*, en los que se van barrer el rango de frecuencia de interés completo o de forma acotada.

En ellas se ha obtenido que el terminal Samsung Galaxy Core II tiene una frecuencia de muestreo medio de 100 Hz aproximadamente, por lo que si las vibraciones a las que el dispositivo está expuesto pertenecen a altas frecuencias, a partir de los 31.5 Hz, los resultados tienen un mayor error y no son lo suficientemente fiables; pero si en las vibraciones predominan las bajas frecuencias obtendremos un error relativo estable aproximadamente del 25%

Sin embargo, el terminal Asus, al tener una frecuencia de muestreo media de aproximadamente 200 Hz, el problema del aliasing no le afecta y sus resultados son fiables para todo el rango de frecuencias de interés para las vibraciones de cuerpo entero, es decir de 0.5 Hz a 80 Hz, aunque para frecuencias de hasta 31.5 Hz el error es ligeramente mayor que el obtenido en el dispositivo Samsung, mientras que para las frecuencias más altas el error relativo obtenido es de un máximo del 20%.

Estas conclusiones se han corroborado en las pruebas de campo, de tal forma que en aquellos experimentos donde el tractor ha experimentado vibraciones a frecuencias más bajas es el terminal Samsung el que tienen un menor error relativo, pero si en las pruebas el tractor ha experimentado vibraciones de frecuencias más altas, es el terminal Asus el que presenta un menor error relativo.

Para finalizar esta memoria se ha realizado un manual de usuario de la aplicación mostrando las opciones y posibilidades que ofrece esta aplicación, explicando las

Según la norma UNE-ISO 2631-1, las vibraciones dentro del rango de frecuencias de entre 0.5 Hz y 80 Hz tienen efectos sobre la salud y el bienestar de las personas que están expuestas a ellas. Para calcular qué alcance tienen estas alteraciones y si están dentro de los límites establecidos por la legislación vigente, es necesario tomar los valores de aceleración, hacer los cálculos descritos en este proyecto y obtener con ello unos resultados fiables.

Con el desarrollo de esta aplicación, se ha demostrado que la baja frecuencia de muestreo de los *smartphones* en relación con la frecuencia de muestreo de los acelerómetros profesionales, hace que esta aplicación móvil que evalúa las vibraciones y obtiene el valor de dosis de vibración normalizado, tenga sus limitaciones y un error relativo asociado debido a las fuentes de error comentadas anteriormente.

Con el tiempo los *smartphones*, están incorporando mejores acelerómetros que muestrean cada vez más rápido, por lo que la fiabilidad de esta aplicación podrá aumentar conforme mejoren las características de los acelerómetros integrados en estos dispositivos. No obstante esta aplicación permite realizar una medición que obtiene resultados orientativos de la dosis de vibración recibida, aunque no podemos afirmar que actualmente los *smartphones* existentes en el mercados puedan ser sustituidos por acelerómetros profesionales.

Líneas futuras

La finalidad principal de este proyecto era el desarrollo de una aplicación que calculase el valor de dosis de vibración normalizado y la evaluación de esta aplicación para conocer su fiabilidad, y sus posibles errores. A partir de ello, se pueden abrir varias líneas de investigación en este mismo ámbito.

Si los acelerómetros de los *smartphones* que se sacarán al mercado en los próximos años, mejoraran en la misma medida en la que evoluciona la tecnología, nos permitiría mejorar la fiabilidad de este tipo de aplicaciones, ya que se encuentran limitadas por las características técnicas del *hardware*. A pesar de ello, sería necesario realizar un seguimiento de los resultados que se obtienen con esta aplicación instalada en varios dispositivos con características mejoradas para comprobar que, efectivamente, se acercan más a los resultados reales si se aumenta su frecuencia de muestreo.

En los experimentos realizados en este proyecto, se han utilizado acelerómetros profesionales para extraer datos de medición de vibraciones y a partir de ellos se han utilizado herramientas matemáticas para obtener los mismos parámetros que los que ofrece la aplicación. Otra línea de investigación podría ir encaminada a comparar los resultados finales de la aplicación con los resultados ofrecidos por dosímetros tales como *Brüel & Kjaer's Human Vibration Analyzer Type 4447* o *Grammer Vibrometer*. Estos dispositivos nos dan los resultados finales ya calculados de forma que no hay que extraer los datos para luego procesarlos con herramientas matemáticas, sino que, de esta forma, sería mucho más simple la comparación de resultados y se evitarían posibles errores de cálculo.

En esta aplicación se ha establecido como método de evaluación principal el cálculo del valor de dosis de vibración normalizada, pero se podrían añadir otros parámetros de medición para no subestimar otros efectos de las vibraciones que pueden tener efectos nocivos para la salud, tales como el factor cresta elevado, choques esporádicos o vibraciones transitorias. Para este medir el alcance de estos efectos existen otros métodos adicionales que se podrían añadir a las mediciones que hace la aplicación, como son el cálculo del valor eficaz móvil de la aceleración ponderada o el valor de dosis de vibración a la cuarta potencia. De esta forma la aplicación podría añadir más funcionalidades y ofrecer unos resultados más completos a sus usuarios.

La medición y evaluación de las vibraciones a las que se exponen los trabajadores es un campo en el que es necesario seguir investigando, puesto que el control y la reducción de estas vibraciones nos permitirá proteger la salud de estos trabajadores y aumentar su bienestar, finalidad que interesa tanto a los propios trabajadores como a las empresas del sector.

Bibliografía

- [1] Thompson, W. (1988). *Theory of Vibrations with Applications*. Prentice Hall International .
- [2] M^a Victoria Carbonell Padrino, E. M. . *Vibraciones mecánicas. Asignatura: Física Aplicada a la Ingeniería*. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/fisica-aplicada-a-la-ingenieria/contenidos/tema-4/VIBRACIONESMECANICAS.pdf>
- [3] Griffin, M. J. (1998). Vibraciones. En *Enciclopedia de la Salud y Seguridad en el Trabajo* (pág. Capítulo 50).
- [4] Romeu, J. (2012). *Acelerómetros y sensores de vibración. Mecánica II*. Obtenido de Universidad Politécnica de Cataluña: http://projecte-hermes.upc.edu/Enginyeria_Aeroespacial/3A/Mec%C3%A0nica%20II/Laboratori/Acelerometros%20y%20sensores%20de%20vibracion.pdf
- [5] *Accelerometer Basics, Sparkfun Electronics Tutorial*. Obtenido de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/accelerometer-basics>
- [6] Scarlett, A., Price, J., & Semple, D. (2005). Whole-body vibration on agricultural vehicles:. *Health & Safety Executive*, 3-10.
- [7] *Study of Tractor suspension system*. . Obtenido de UG Courses - Agricultural Engineering: <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=2288>
- [8] *Vibraciones en el tractor*. (23 de Septiembre de 2013). Obtenido de Blog de maquinaria de la revista Agricultura: <http://www.masquemaquina.com/2013/09/vibraciones-en-el-tractor.html>
- [9] Cvetanovic, B., & Zlatkovic, D. (2013). Evaluation of whole-body vibration risk in agricultural tractor drivers. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*.
- [10] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. . *Vibraciones: vigilancia de la salud en trabajadores expuestos. Notas técnicas de prevención*.
- [11] Körning, J., & Parmentier, F. (2010). *Psychological effects of combined noise and whole-body vibration: A review and avenues for future research*. *Research Gate*.
- [12] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2011). *VII Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo*.
- [13] Banco de experiencias ergonómicas en la construcción. . *Guía de verificación ergonómica de vibraciones*.
- [14] REAL DECRETO 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la 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. . *BOE núm.265, 5 de noviembre de 2005*.
- [15] *DIRECTIVA 2002/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (vibraciones)*.
- [16] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Ministerio de Trabajo e Inmigración. (2009). *Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas*.

- [17] Báez, M., Borrego, Á., & Cordero, J. *Introducción a Android*. Universidad Complutense de Madrid: E.M.E. Editorial.
- [18] Forni, A. A., & van der Meulen, R. (19 de Agosto de 2016). *Artículo "Gartner Says Five of Top 10 Worldwide Mobile Phone Vendors Increased Sales in Second Quarter of 2016"*. Obtenido de Gartner: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3415117>
- [19] Universidad Politécnica de Valencia. . *Fundamentos de Android*. Obtenido de Diploma de Especialización en desarrollo de aplicaciones para Android. : <http://www.androidcurso.com/index.php/99>
- [20] Android Open Source Project. (2016). *Sensors Overview*. Obtenido de https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview.html
- [21] Android Open Source Project. (2016). *Sensor Types*. Obtenido de Android Open Source Project: https://source.android.com/devices/sensors/sensor-types.html#sensor_axis_definition
- [22] Miao, W. (2013). *Desarrollo de aplicaciones de sensores en teléfonos y tabletas Android* basados en el procesador Intel® Atom™*. Obtenido de <https://software.intel.com/es-es/android/articles/developing-sensor-applications-on-intel-atom-processor-based-android-phones-and-tablets>
- [23] Aja Fernández, S. (2013). *Apuntes Tema 5 Muestreo. Sistemas Lineales*. Obtenido de Universidad de Valladolid: <http://www.lpi.tel.uva.es/lineales/apuntes/tema5.pdf>
- [24] Android Open Source Project. (2016). *Hal Interface. Sampling Period*. Obtenido de https://source.android.com/devices/sensors/hal-interface.html#sampling_period_ns
- [25] Roberts, S. . *The Discrete Fourier Transform. Machine Learning*. Obtenido de University of Oxford: <http://www.robots.ox.ac.uk/~sjrob/Teaching/SP/17.pdf>
- [26] Universidad Distrital F.José de Caldas. (2000). *Fast Fourier Transform*. Obtenido de Departamento de Electrónica: <ftp://ftp.udistrital.edu.co/Documentacion/Electronica/Dsp/capitulo6.PDF>
- [27] Sedgewick, R., & Wayne, K. (2011). *Data Analysis. Introduction to Programming in Java*. Obtenido de University of Princeton: <http://introc.cs.princeton.edu/java/97data/>
- [28] UNE-ISO 2631-1 . (Julio de 2008). *Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero*.
- [29] Centro Nacional de Verificación de Maquinaria. (2011). *Vibraciones de cuerpo entero. Aplicación de la norma ISO 2631-1-2008*.
- [30] ComputerHoy. (2013). *Samsung Galaxy Core I8260*. Obtenido de Características Técnicas: <http://computerhoy.com/fichas/samsung-galaxy-core-i8260>
- [31] Samsung. (2014). *Samsung Galaxy Core II*. Obtenido de Características Técnicas: <http://www.samsung.com/es/consumer/mobile-devices/smartphones/others/SM-G355HZWNPHE>
- [32] ComputerHoy. (2016). *Asus Zenfone Max*. Obtenido de Características Técnicas: <http://computerhoy.com/fichas/asus-zenfone-max>
- [33] Trapp, M., & Chen , F. (2008). *Automotive Buzz, Squeak and Rattle, Mechanisms, Analysis, Evaluation and Prevention*. Butterworth-Heinemann.

- [34] MB Dynamics. . *S&R Energizers - Operating Background Noise fulfills requirements of Noise Rating Curve NR18*. Obtenido de http://www.mbdynamics.eu/products/Quiet%20Shaker_MB%20Energizer%20Series.html
- [35] PCB Piezotronics. *Datasheet Model PCB 333B40*. Obtenido de *Installation and Operation Manual*: http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/Products/Manuals/333B40.pdf
- [36] Brüel & Kjaer. . *DataSheet Accelerometer Types 4507 and 4508* . Obtenido de <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4507>
- [37] National Instruments. *¿Qué es Adquisición de Datos?* Obtenido de <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- [38] National Instruments. . *Chasis CompactDAQ*. Obtenido de <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207533>
- [39] National Instruments. . *Cómo Escoger el Hardware DAQ Adecuado para su Sistema de Medidas*. Obtenido de *¿Necesito acondicionamiento de señales?:* <http://www.ni.com/white-paper/13655/es/>
- [40] Brüel & Kjaer. . *Sine Vibration Control Description*. Obtenido de <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-exciters/vibration-controllers/vibration-control-software/sine-vibration-control>
- [41] Brüel & Kjaer. . *Random Vibration Control Description*. Obtenido de <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-exciters/vibration-controllers/vibration-control-software/random-vibration-control>
- [42] National Instruments. (Junio de 2013). *SignalExpress*. Obtenido de *Getting Started with SignalExpress*: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373873h.pdf>
- [43] National Instruments. . *The NI TDMS File Format*. Obtenido de *Overview of the TDMS File Structure*: <http://www.ni.com/white-paper/3727/en/>
- [44] Jet Brains. (2016). *IntelliJ IDEA. Features*. Obtenido de <https://www.jetbrains.com/idea/features/>
- [45] Android Open Source Project. (2016). *Conociendo Android Studio* . Obtenido de https://developer.android.com/studio/intro/index.html?hl=es-419#herramientas_de_depuracion_y_perfil
- [46] Mathworks. (2016). *MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico* . Obtenido de <https://es.mathworks.com/products/matlab/>
- [47] Mathworks. (2016). *MATLAB Documentation*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/help/matlab/>
- [48] Irvine, T. (15 de Marzo de 2007). *Power Spectral Density Units [G² / Hz]*. Obtenido de *Random Vibration & Power Spectral Density Page*: <http://vibrationdata.com/tutorials2/psd.pdf>
- [49] Android Open Source Project. (2016). *Permisos del Sistema*. Obtenido de <https://developer.android.com/guide/topics/security/permissions.html?hl=e>