

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“DESARROLLO DE UN RUGOSÍMETRO ELECTRÓNICO DE
BAJO COSTO BASADO EN LA PLATAFORMA ARDUINO
PARA LA EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

**JAVIER HERNAN CORNEJO TEJADA
ID: 0000-0002-0896-4731**

ASESOR

**MSc. EDWARD SANTA MARÍA DÁVILA
ID: 0000-0001-6789-4983**

Lima- Perú

2025

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos”.

Cornejo Tejada, Javier Hernan

icornejot@uni.pe

993758870

DEDICATORIA

*A las largas noches que me
acompañaron en el desarrollo de esta
investigación.*

Índice

Resumen	3
Abstract.....	4
Prólogo.....	5
Lista de tablas	6
Lista de figuras.....	7
Lista de símbolos y siglas	9
Capítulo I. Introducción.....	10
1.1. Antecedentes referenciales	10
1.2. Organización de la tesis.....	11
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	12
2.1. Rugosidad de pavimentos	12
2.1.1. Perfil de las vías.....	12
2.1.2. Medición de rugosidad.....	13
2.2. Índice de rugosidad internacional.....	14
2.2.1. Clasificación de los instrumentos	15
2.2.2. Modelo de cuarto de carro	20
2.2.3. Metodología de cálculo	21
2.2.4. Solución numérica del modelo.....	23
2.3. Sistemas embebidos.....	25
2.4. Plataforma arduino.....	27
2.4.1. Hardware	28
2.4.2. Software	31
2.5. Acelerómetros	32
2.6. Procesamiento de señales.....	33
2.6.1. Filtro pasa-altos.....	34
2.6.2. Filtro pasa-bajos.....	35
2.6.3. Frecuencias predominantes en un vehículo.....	36

Capítulo III. Generalidades	38
3.1. Planteamiento del problema	38
3.2. Justificación.....	38
3.3. Hipótesis.....	39
3.4. Objetivos	39
3.4.1. Objetivo principal.....	39
3.4.2. Objetivos secundarios.....	39
3.5. Metodología de trabajo	39
Capítulo IV. Diseño del rugosímetro.....	41
4.1. Diseño del hardware	41
4.1.1. Especificaciones técnicas mínimas	41
4.1.2. Descripción de los elementos	43
4.1.3. Calibración de los acelerómetros	46
4.2. Diseño del software.....	48
4.2.1. Descripción del algoritmo.....	49
4.2.2. Visualización de los resultados.....	51
Capítulo V. Aplicación y validación del rugosímetro	53
5.1. Escenario 1 – pavimento en buen estado	53
5.2. Escenario 2 – pavimento con imperfecciones superficiales	56
5.3. Escenario 3 – pavimentos deteriorados	59
5.3.1. Pruebas en auto	60
5.3.2. Pruebas en bicicleta.....	61
5.4. Validación del rugosímetro	63
Conclusiones.....	65
Recomendaciones	67
Referencias bibliográficas	68
Anexos	70

Resumen

Una deficiencia que se tiene actualmente es la carencia de planes de mantenimiento para las vías o red de caminos que se tienen en todo el país. Generalmente, esto es consecuencia de los altos costos que un monitoreo constante en las carreteras ocasionaría, es así que se prefiere la rehabilitación cuando la vía está muy deteriorada en vez de optar por un mantenimiento preventivo que alargue la vida útil de esta.

Teniendo en consideración los altos costos que conlleva el monitoreo de vías en tiempo y dinero, la presente investigación propone la realización de un rugosímetro, que tome en cuenta la respuesta dinámica de un vehículo para el cálculo de la rugosidad de pavimentos, que tenga una precisión aceptable y que tenga un bajo costo para su fácil accesibilidad.

Para tal propósito, el rugosímetro propuesto consiste en dos sensores acelerómetros y un módulo GPS, esto con el fin de simular el modelo físico del cuarto de carro. Además se le agregará al dispositivo un módulo de tarjeta micro SD para el almacenamiento de la información. Todo esto estará conectado a una placa Arduino, por las ventajas en programación, costo y accesibilidad que posee este equipo.

Las mediciones de calibración y validación han demostrado que, en pavimentos flexibles, los errores no sobrepasan el 5%, pudiendo clasificar el dispositivo propuesto como, por lo menos, de Clase II, lo que, considerando el costo del equipo, es más que satisfactorio y cumple con los propósitos establecidos inicialmente.

Palabras clave: monitoreo, carreteras, IRI, rugosímetro, Arduino.

Abstract

There is a shortage of maintenance plans for roads or highways in all over the country. This is a result of the high costs of constant monitoring in this kind of infrastructure. In this way, rehabilitation once the road is much deteriorated is preferred over a preventive maintenance that can extend its lifespan.

Taking the high costs that monitoring roads carry, in both time and money, into account, the present thesis proposes the production of a roughometer, which measures the dynamic response of a vehicle to calculate the pavement roughness with reasonable precision and with low-cost materials to make it affordable for most projects.

For that purpose, the proposed roughometer counts with two accelerometer sensors and a GPS module, this with the aim of simulate the quarter-car physical model in vehicles. In addition, it is added to the device a SD card module to storage information. All these sensors and modules are connected to an Arduino board because of the advantages in programming and cost this board has.

Calibration and validation measurements have demonstrated that deviation in results is less than 5% for flexible pavements. This classify the proposed device, at least, as Class II, which, considering cost, is more than satisfactory and meets the purpose initially established.

Keywords: monitoring, roads, IRI, roughometer, Arduino.

Prólogo

Uno de los retos más significativos en la Ingeniería actual es el trabajo de automatización del Proceso de Auscultación del Estado de la Infraestructura. En la presente investigación se hace una propuesta práctica de una evaluación de la rugosidad de los pavimentos (Índice de Rugosidad Internacional), que mide la regularidad longitudinal de una carretera y que se traduce en el confort de los usuarios.

El mecanismo diseñado y fabricado en la presente investigación, ha sido puesto a prueba como parte del proyecto de Buses Inteligentes (Smart Bus) patrocinado por el Banco Mundial y gestionado por Airbus, en los años 2018 y 2019. Las pruebas se han realizado en buses que se trasladaban en rutas comerciales, en la Costa y atravesando la cordillera hacia la Selva.

Los instrumentos se han calibrado inicialmente con medición topográfica en un campo de prueba en la UNI. En la etapa de aplicación, las mediciones realizadas en las carreteras se han podido contrastar con mediciones de rugosímetros con perfilómetro láser, que tienen la más alta precisión tecnológica, confirmando los bajos niveles de error del sistema propuesto.

Los trabajos de instrumentación y de automatización abren nuevos campos de investigación y desarrollo, que son oportunidades para desarrollar el conocimiento en Ingeniería Civil.

ASESOR

Lista de tablas

Tabla 1. Especificaciones del Arduino UNO.	30
Tabla 2. Especificaciones de Arduino MEGA.....	31
Tabla 3. Resultados de calibración en mesa vibratoria.	47
Tabla 4. Resultados de IRI medido en tramos de Redes Viales.	56
Tabla 5. Resultados de IRI medido en tramos de Línea Amarilla.	58
Tabla 6. Resultados de IRI medido en tramos de Línea Amarilla.	58
Tabla 7. Resultados de la prueba con el auto.....	61
Tabla 8. Valores usados para el cálculo del IRI.	63
Tabla 9. Resultados de la prueba con la bicicleta.....	63
Tabla 10. Resumen de valores obtenidos de IRI.	64

Lista de figuras

Figura N° 1. Perfil Longitudinal y Perfil Transversal.....	13
Figura N° 2. Escala empleada para conocer el estado de una vía según el IRI.	15
Figura N° 3. Perfilómetro Láser. Instrumento de Clase 1.	16
Figura N° 4. Esquema del Rugosímetro Merlin.....	17
Figura N° 5. Midiendo la rugosidad con el MERLIN.....	18
Figura N° 6. Bump Integrator colocado detrás de un vehículo.	19
Figura N° 7. Clasificación de los Instrumentos de Medición del IRI.	20
Figura N° 8. Modelo del Cuarto de Carro.....	21
Figura N° 9. Esquema básico de un sistema embebido.	26
Figura N° 10. Placa similar al primer prototipo de Arduino.....	27
Figura N° 11. Modelos de placas Arduino.....	29
Figura N° 12. Arduino UNO.	29
Figura N° 13. Arduino MEGA.....	31
Figura N° 14. Entorno de desarrollo de Arduino.	32
Figura N° 15. Errores originados por la señal de aceleración sin filtrar.	34
Figura N° 16. Señal luego de aplicar el filtro pasa-alto.....	35
Figura N° 17. Señal luego de aplicar un filtro pasa-bajos.....	35
Figura N° 18. Respuesta dinámica del modelo de cuarto de carro.	36
Figura N° 19. Aceleraciones en modelo cuarto de carro.	42
Figura N° 20. Esquema del rugosímetro propuesto.....	43
Figura N° 21. Sensor acelerómetro MPU6050.....	44
Figura N° 22. Módulo GPS.	45
Figura N° 23. Módulo lector de micro SD.....	45
Figura N° 24. Acelerómetro Kyowa de 2g.....	46
Figura N° 25. Acelerómetro Kyowa de 5g.....	46
Figura N° 26. Disposición de acelerómetros en la mesa de vibración.	46
Figura N° 27. Gráfica de error vs frecuencia.....	47
Figura N° 28. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.....	48
Figura N° 29. Señal de Acelerómetro MPU6050.	48
Figura N° 30. Ejemplo de archivo generado por el rugosímetro.....	49
Figura N° 31. Flujograma de toma de datos del rugosímetro.	50
Figura N° 32. Flujograma de procesamiento de datos.	51
Figura N° 33. Visualización espacial de resultados.	52
Figura N° 34. Esquema de ubicación de sensores en el bus de Tepsa.....	54

Figura N° 35. Mapa de la Red Vial N° 4.....	54
Figura N° 36. Mapa de la Red Vial N°6.....	55
Figura N° 37. Ubicación de sensores acelerómetros en un auto particular.	57
Figura N° 38. Entrada al túnel de la vía.	57
Figura N° 39. Tramo de prueba en la Universidad Nacional de Ingeniería.....	59
Figura N° 40. Perfil longitudinal obtenido con el nivel topográfico.....	60
Figura N° 41. Ubicación de acelerómetros en la bicicleta.	62
Figura N° 42. Modelo usado para el cálculo del IRI con bicicleta.....	62
Figura N° 43. Señal de Acelerómetro Kyowa del CISMID.....	76
Figura N° 44. Señal de Acelerómetro MPU6050.	76
Figura N° 45. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.....	77
Figura N° 46. Señal de Acelerómetro MPU6050.	77
Figura N° 47. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.....	78
Figura N° 48. Señal de Acelerómetro MPU6050.	78
Figura N° 49. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.....	79
Figura N° 50. Señal de Acelerómetro MPU6050.	79
Figura N° 51. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.....	80
Figura N° 52. Señal de Acelerómetro MPU6050.	80

Lista de símbolos y siglas

- ASTM: American Society for Testing and Materials
- IRI: Índice de Rugosidad Internacional (También Índice de Regularidad Internacional)
- MERLIN: Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation
- g: Aceleración de la gravedad
- t: Tiempo
- Ms: Masa Suspendida (Suspensión del vehículo)
- Ks: Constante elástica de la masa suspendida
- Cs: Amortiguamiento de la masa suspendida
- Xs: Respuesta de la masa suspendida
- Mu: Masa No Suspendida (Neumático del vehículo)
- Ku: Constante elástica de la masa no suspendida
- Xu: Respuesta de la masa no suspendida
- Y: Perfil longitudinal

Capítulo I. Introducción

1.1. Antecedentes referenciales

Con el fin de que una infraestructura se preserve en buenas condiciones en el tiempo, se requiere de un monitoreo constante de esta para, así, desarrollar un sistema de mantenimiento adecuado que pueda conservarla. En el Perú, como en muchos países, una de las infraestructuras más valiosas por su aspecto económico y social es su red vial.

Para elaborar un plan de mantenimiento de las vías en el país, uno de los factores que más se usa es el índice de rugosidad internacional (IRI). El IRI es un parámetro que indica las características superficiales que tiene un pavimento y es el resultado de una simulación matemática de la respuesta de un vehículo al circular sobre el perfil longitudinal de una vía (American Society for Testing and Materials Standard E 1448-92, 2004). Valores bajos de este parámetro indican pavimentos en buen estado mientras que valores altos indican pavimentos deteriorados.

Como se mencionó, el cálculo del IRI requiere del perfil longitudinal de la vía, para lo cual, actualmente existen muchos equipos capaces de poder determinarlo. Sin embargo, estos equipos pueden tomar mucho tiempo para obtener el perfil deseado, como en el caso del nivel; o pueden ser muy costosos, como en el caso de los perfilómetros láser.

La presente investigación usa un modelo matemático conocido como “el cuarto de carro”, el cual permite hallar el perfil longitudinal de una vía conociendo las aceleraciones que se dan en la suspensión y en el neumático de un vehículo al recorrer la carretera. Una vez que se cuenta con el perfil de la vía, usando la metodología desarrollada por el Banco Mundial, se hallan finalmente los valores del IRI (American Society for Testing and Materials Standard E1170-97, 2001).

Las aceleraciones que se producen en el vehículo se pueden conocer gracias a una serie de sensores acelerómetros que existen en el mercado y que ya se han ido utilizando en otras investigaciones con buenos resultados (Tomiyama K. , Kawamura, Ohiro, & Tozuka, 2014). Existen, además, numerosas placas que sirven para la lectura y procesamiento de los valores de estos sensores acelerómetros, de las cuales, es la placa Arduino la que se ensayará en este trabajo de investigación.

En la literatura consultada, existen otros métodos similares que hacen uso de acelerómetros para la obtención de parámetros de rugosidad en pavimentos. Por ejemplo, Ramirez (2017) hace uso de una aplicación de celular para la obtención del IRI, sin embargo, llega a desviaciones de hasta 17% cuando se comparan los valores con un equipo de Clase 1. También Zhang et al. (2021) hace uso de los acelerómetros de un celular para la obtención de la rugosidad del pavimento, llegando a una desviación de hasta 8%. No obstante, el buen desempeño de los celulares, es necesario hacer uso de software ya elaborados o desarrollar uno propio, lo cual encarece la toma de datos. Además, la propia instalación del celular no se hace sobre los elementos que están en contacto con el pavimento, sino sobre otros, como el parabrisas, lo cual facilita la adquisición de más ruido en los acelerómetros, pudiendo incrementar el error en los cálculos.

1.2. Organización de la tesis

La presente tesis consiste de cinco capítulos. El Capítulo 1 aborda los antecedentes que llevaron a la realización de la investigación. El Capítulo 2 abarca temas generales propios de una investigación como el planteamiento del problema, la hipótesis y los objetivos, tanto generales como específicos. El marco teórico está extensamente descrito en el Capítulo 3, donde se tocan los temas de rugosidad de pavimentos, métodos de medición y el modelo del cuarto de carro. En el Capítulo 4 se especifica el diseño del equipo rugosímetro de medición propuesto y el Capítulo 5 reseña la calibración y validación de este equipo. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones resultantes de esta investigación.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1. Rugosidad de pavimentos

El concepto de rugosidad en los pavimentos tiene una gran importancia dentro de este tipo de infraestructura ya que está muy relacionado con la condición superficial en la que se encuentran además que indica el nivel de confort que tienen los usuarios que la usan.

La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) define el término de rugosidad en su norma E867 como: “La desviación de la superficie de un pavimento respecto a una superficie plana con dimensiones características que afectan la dinámica del vehículo, la calidad del viaje, las cargas dinámicas, y drenaje, como por ejemplo, el perfil longitudinal, el perfil transversal y la sección longitudinal”.

Esta definición, como apuntan Sayers & Karamihas, es muy general al incluir conceptos como el drenaje y la calidad del viaje, los cuales no necesariamente guardan una estrecha relación. Además, no se especifica la metodología para calcular este valor de rugosidad numéricamente.

Al ser la definición de rugosidad muy general, existen diversos parámetros que indican un valor numérico de esta. Sin embargo, existen diversas investigaciones que correlacionan una con otra, de modo que, solo es suficiente conocer una de ellas para obtener las demás.

Antes de entrar de lleno al cálculo o a la metodología de cálculo de la rugosidad de pavimentos, es conveniente definir primeramente el perfil de una vía, ya que de este se obtiene comúnmente el parámetro de rugosidad.

2.1.1. Perfil de las vías

El perfil en una vía se define simplemente como la intersección de un plano imaginario vertical con la superficie de un pavimento. Este puede ser longitudinal, cuando el plano imaginario está a lo largo de la vía, o transversal, cuando el plano imaginario es perpendicular a la vía.

Además, un pavimento puede tener infinitos perfiles, dependiendo de qué línea imaginaria se siga, tal y como se puede apreciar en la Figura N° 1. Nótese que esto crea un primer problema en la medición de la rugosidad, ya que, dependiendo de qué línea imaginaria (o huella) se tome, se puede tener un valor de rugosidad u otro para un mismo pavimento. Asimismo, se debe considerar el ancho del perfil

que se va a tomar. Esto generalmente está determinado por el tipo de equipo que se va a usar para la medición. Por ejemplo, mediciones con láser pueden cubrir anchos de unos cuantos milímetros, mientras que mediciones con equipos topográficos convencionales, como el nivel y mira, pueden cubrir anchos de unos pocos centímetros (Sayers & Karamihas, *The Little Book of Profiling*, 1998).

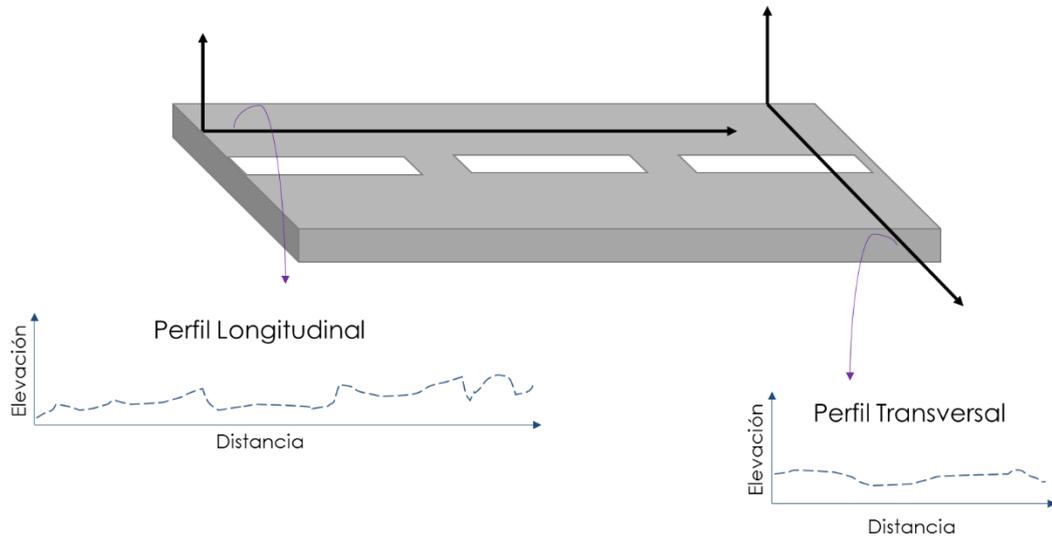


Figura N° 1. Perfil Longitudinal y Perfil Transversal.

Fuente: *Elaboración Propia*.

Este concepto del perfil cobra importancia debido a que está íntimamente relacionado con la calidad del viaje y, por ende, también con el cálculo de la rugosidad de un pavimento (ya se vio que el ASTM incluye calidad del viaje en su definición de rugosidad). Esto se da debido a que un perfil longitudinal con muchas variaciones en su recorrido ocasiona muchas vibraciones en la estructura interna de un vehículo, las cuales son transmitidas al usuario a pesar del sistema de suspensión.

2.1.2. Medición de rugosidad

Para la medición de la rugosidad de un pavimento existen básicamente dos metodologías que brindan el valor de este parámetro. Estas son “La medición por el tipo de respuesta” y “La medición por perfilómetro”.

En la medición por el tipo de respuesta, o medición tipo respuesta, lo que se mide son las vibraciones que se generan en un vehículo al pasar por un cierto perfil longitudinal. Luego, estas vibraciones son filtradas de acuerdo a unos filtros que se mostrarán en la sección de “Procesamiento de Señales”. Finalmente, se

cuantifican las diferentes variaciones que sufre la suspensión del vehículo en su recorrido por el perfil (subidas y bajadas) por unidad de longitud, es así que este valor suele expresarse como m/Km o mm/m.

En la medición por perfilómetro, lo que se registra es el perfil longitudinal de la huella por la que pasa el vehículo en el pavimento. Este perfil luego es usado para simular la respuesta que ocasiona en un auto y así llegar al valor de rugosidad. El método por perfilómetro es, en general, más preciso que el método tipo respuesta, sin embargo, es mucho más caro y requiere dispositivos más sofisticados.

Así, la medición de la rugosidad tiene estos dos enfoques, de los cuales, en la presente tesis, se enfocará por el primero. Esto debido a que el dispositivo a elaborar consistirá en la interpretación de las señales de aceleraciones, es decir, de la respuesta vibratoria de los vehículos al pasar por un pavimento.

Con respecto a los parámetros de rugosidad, ya se mencionó que existen diferentes tipos y que solo basta conocer uno para poder estimar los otros. En esta investigación se hará uso del parámetro más conocido, estudiado y estandarizado, el cual es el Índice de Rugosidad Internacional o IRI por sus siglas.

2.2. Índice de rugosidad internacional

El Índice de Rugosidad Internacional o, IRI, es el parámetro más estandarizado para la medición de la rugosidad de un pavimento. El IRI, al igual que otros parámetros, mide la influencia que tiene el perfil longitudinal en la respuesta de un vehículo al pasar por este. Sin embargo, su principal ventaja y lo que lo diferencia de otros parámetros, es que al ser estandarizado, permite la comparación con otros valores de IRI en otras carreteras de otras localidades o incluso, de otros países (Sayers & Karamihas, *The Little Book of Profiling*, 1998).

Esta ventaja fue investigada y financiada en el año de 1982 por el Banco Mundial para establecer la estandarización del parámetro de IRI. Así, se llegó a la conclusión de que el IRI se puede reproducir en cualquier pavimento y este parámetro guarda mucha relación con el estado en el que se encuentra una carretera, llegándose a obtener un cuadro como la Figura N° 2.

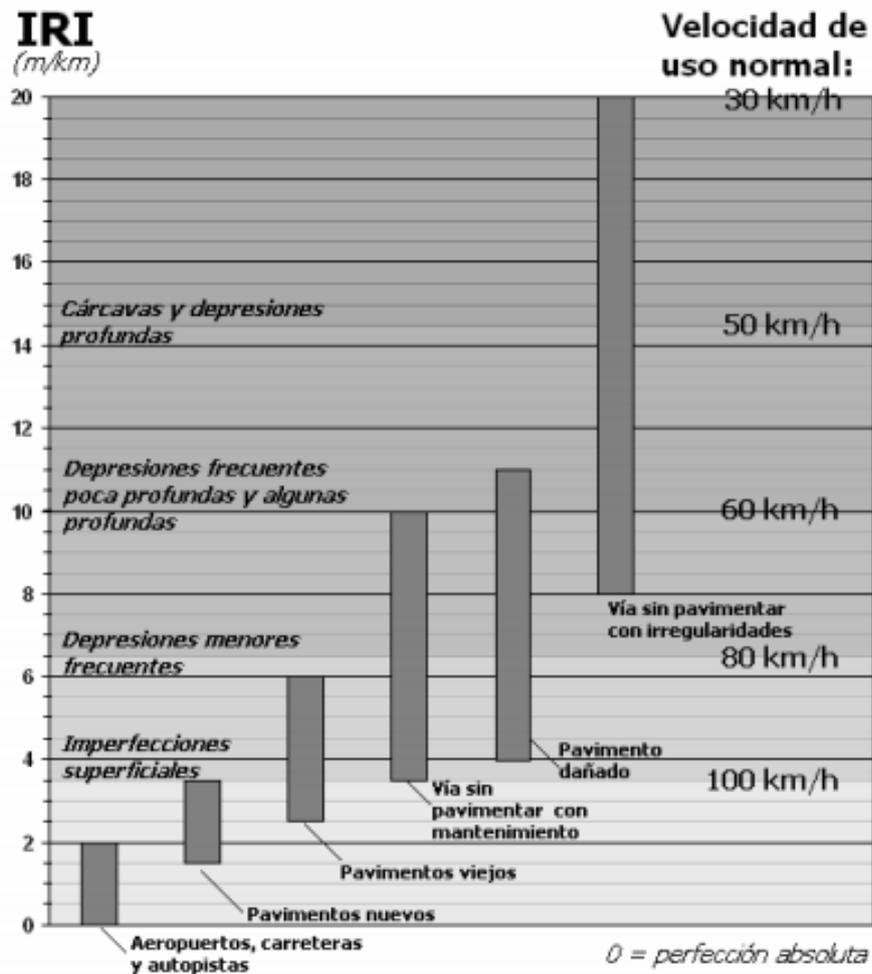


Figura N° 2. Escala empleada para conocer el estado de una vía según el IRI.

Fuente: Badilla Vargas, 2009

2.2.1. Clasificación de los instrumentos

Existen diversas formas de realizar la medición de rugosidad en pavimentos, en especial del parámetro IRI. Cada una de ellas conlleva ventajas y desventajas que van a depender del proyecto y el costo disponible para tales mediciones.

En la guía original del Banco Mundial se distinguen 4 clasificaciones para los tipos de mediciones de la rugosidad en pavimentos:

Clase 1: Dentro de esta clase están los métodos más precisos de medición de la rugosidad de pavimentos. Según la guía del Banco Mundial, para que un método se encuentre dentro de esta clase, el perfil longitudinal de la huella por donde pasa el vehículo debe ser medido. También, la distancia entre punto y punto de medición no debe ser mayor a 250 mm. Adicionalmente, los métodos que están

considerados en esta clase tienen tal precisión que esta ya no puede ser mejorada.

Dentro de esta clase se encuentran las mediciones con nivel y mira, las cuales pueden ser económicamente viables en proyectos muy pequeños, no obstante, en proyectos de gran envergadura, son costosas por el uso intensivo de la mano de obra y por el tiempo que se requiere para el procesamiento de los datos. Adicionalmente, en mediciones grandes, se corre el riesgo de mayores tasas de errores en el tratamiento de información, debido al error humano. Además del nivel y mira, se encuentran también dentro de la Clase 1 las mediciones con perfilómetro láser. El perfilómetro láser es un equipo que cuenta con un medidor láser de distancia (transductor) y un sensor acelerómetro, estos instalados dentro de un vehículo.



Figura N° 3. Perfilómetro Láser. Instrumento de Clase 1.

Fuente: HOBINNOVA

Las ventajas del perfilómetro láser son evidentes. Al estar instalados dentro de un auto, la medición de la rugosidad simplemente toma el tiempo que se demore el vehículo en recorrer la vía, además del tiempo que tome el procesamiento de la data, la cual es casi inmediata con los algoritmos de hoy en día. Sin embargo, su principal desventaja radica en el costo. Un equipo con estas características tiene un precio que va desde los \$60,000 hasta los \$200,000, y la necesidad de un vehículo dedicado exclusivamente para tal fin.

También, el ASTM E1364-95 especifica que, para que un instrumento se clasifique dentro de la Clase 1, los valores que resulten de mediciones repetitivas de un mismo perfil estén dentro del 2% del valor promedio de estos datos.

Clase 2: De acuerdo a los lineamientos del Banco Mundial, un dispositivo de medición de la rugosidad se clasifica dentro de la Clase 2 si es necesario calibrarlo primero con un levantamiento del perfil longitudinal y, además, no llega a tener la precisión de un instrumento de Clase 1. Luego de esta primera calibración, los valores brindados por el dispositivo deberían ser estables en el tiempo y reproducibles en cualquier vía.

Es necesario mencionar también que, de acuerdo al ASTM E1364-95, un instrumento también se clasifica dentro de la Clase 2 si los valores resultantes de mediciones repetitivas de un mismo perfil están dentro del 5% del promedio de estos datos.

Dentro de esta categoría se encuentran los instrumentos como el rugosímetro tipo MERLIN o el perfilógrafo California, siendo el primero uno de los más usados en nuestro país.

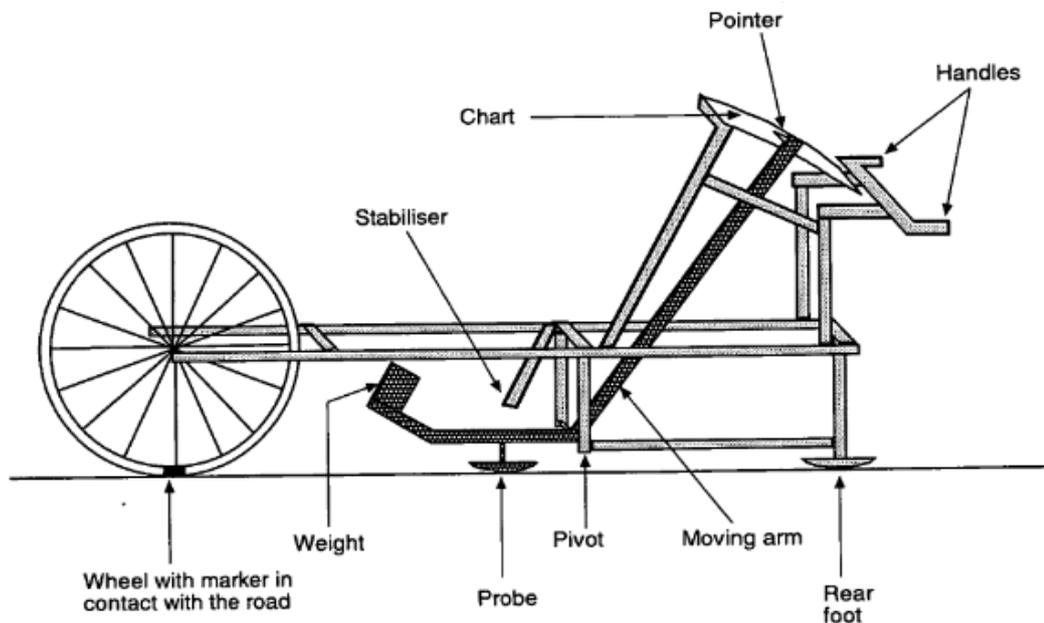


Figura N° 4. Esquema del Rugosímetro Merlin.

Fuente: TRL Report 229

El rugosímetro tipo MERLIN (por las siglas del inglés Machine for Evaluating Roughness using Low-cost INstrumentation) es un instrumento similar a una carretilla que mide las elevaciones y depresiones que hay en cada cierto tramo de una vía. El cálculo estadístico de estos datos conlleva a una relación directa con la rugosidad del pavimento, específicamente con el IRI.

Una de las ventajas que otorga el uso del MERLIN es que es un instrumento económico y otorga una mayor rapidez en la toma de datos que haciendo uso del nivel y mira. El costo aproximado de este equipo ronda los \$200, lo que lo hace ideal para países en vías de desarrollo como el nuestro.



Figura N° 5. Midiendo la rugosidad con el MERLIN.

Se observa la facilidad del trabajo. Fuente: Elaboración Propia

Clase 3: En esta clase se ubican los instrumentos que no necesariamente requieren de la medición del perfil longitudinal de la vía. Estos equipos obtienen los valores de rugosidad por correlación directa de datos medidos con instrumentos de Clase 1 o Clase 2.

Dentro de esta categoría se encuentran la mayoría de instrumentos denominados de tipo respuesta, los cuales miden la vibración vertical que se genera dentro de

un vehículo cuando este recorre una vía. Luego estas señales vibratorias se analizan para encontrar una ecuación de correlación con los valores de rugosidad previamente medidos con equipos de mayor precisión, siguiendo la lógica que a mayor rugosidad corresponde una mayor vibración interna del vehículo.

Un ejemplo de instrumento de Clase 3 es el equipo Bump Integrator.



Figura N° 6. Bump Integrator colocado detrás de un vehículo.

Fuente: Tomado de velcity.com

Clase 4: Siguiendo los lineamientos del Banco Mundial, dentro de esta categoría se encuentran dispositivos no calibrados o equipos que no reproducen con precisión los valores de rugosidad de una vía ni son estables en el tiempo.

También se puede considerar dentro de esta clase a la inspección visual que se le puede hacer a la condición superficial de un pavimento. Esto tiene como principal ventaja un costo muy menor frente al uso de otros instrumentos, sin embargo, no es eficiente además que no garantiza un nivel mínimo de precisión.

En la Figura N° 7, basada en (Tomiyama K. , Kawamura, Nakajima, Ishida, & Jomoto, 2012) se grafica la precisión y conveniencia (a nivel económico y de tiempo) de cada una de las clases de instrumento usado en la medición del IRI ya descritas previamente. Se observa que si se busca aumentar la precisión, la conveniencia en costo y tiempo de realizar la medición disminuye. Una inspección visual es muy rápida y poco costosa pero es poco fiable; mientras que una

medición con instrumentos de Clase 1 como el nivel topográfico es muy precisa, el tiempo que toma realizarla es muy largo.

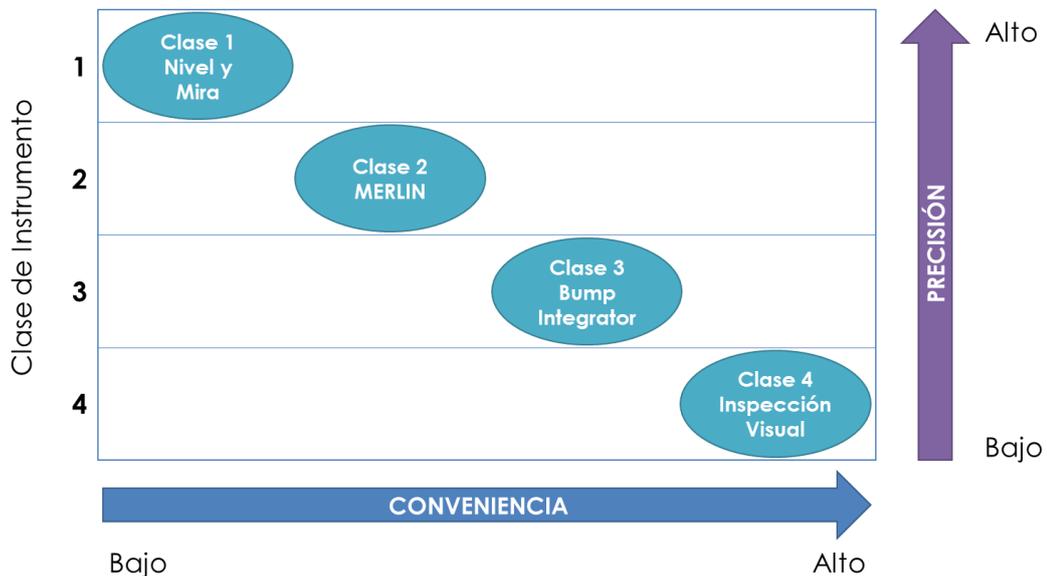


Figura N° 7. Clasificación de los Instrumentos de Medición del IRI.

Fuente: Elaboración Propia

El dispositivo a elaborar para la medición de la rugosidad de pavimentos busca tener la conveniencia de un dispositivo de Clase 3 y tener la precisión de por lo menos un instrumento de Clase 2.

2.2.2. Modelo de cuarto de carro

Antes de entrar de lleno a la forma del cómputo del IRI, es necesario conocer previamente el modelo denominado de “Cuarto de Carro”, que forma parte del cálculo de este parámetro.

El ASTM E1926 define al IRI como “un índice calculado a partir de la medición de un perfil longitudinal usando la simulación del cuarto de carro a una velocidad simulada de 80 Km/h”. Ya se mencionó en el punto 2.1.1 lo que es un perfil longitudinal o un perfil de la vía; por lo que hace falta comprender el modelo de cuarto de carro para realizar un cálculo correcto del IRI.

El modelo de cuarto de carro es, como su nombre lo dice, la simulación de la cuarta parte de un auto teniendo en cuenta solo dos masas (suspendida y no suspendida) y la suspensión y amortiguamiento de estas. El modelo se grafica en la Figura N° 8.

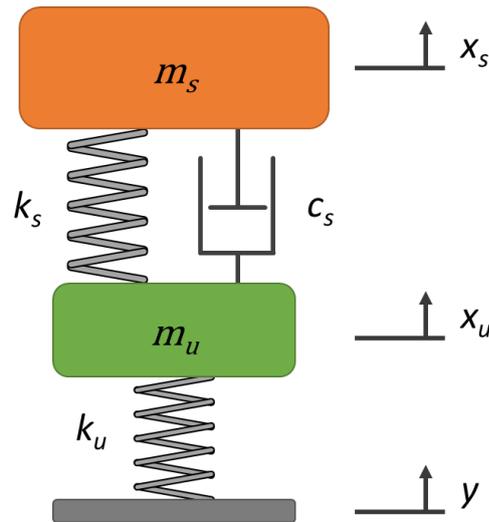


Figura N° 8. Modelo del Cuarto de Carro.

Fuente: Elaboración Propia

Donde:

M_s :	Masa Suspendida (Suspensión del vehículo)
K_s :	Constante elástica de la masa suspendida
C_s :	Amortiguamiento de la masa suspendida
X_s :	Respuesta de la masa suspendida
M_u :	Masa No Suspendida (Neumático del vehículo)
K_u :	Constante elástica de la masa no suspendida
X_u :	Respuesta de la masa no suspendida
Y :	Perfil longitudinal

Se debe notar que en el caso de la masa no suspendida no se considera un parámetro de amortiguamiento ya que este es de un valor muy pequeño comparado con el de la masa suspendida, razón por la cual se puede despreciar para no cargar de muchas variables los cálculos.

2.2.3. Metodología de cálculo

Para encontrar las ecuaciones que gobiernan el movimiento del modelo de cuarto de carro se usará la mecánica de Lagrange en su formulación para pequeñas vibraciones. Con este fin, es necesario primero calcular la energía cinética, la energía potencial y la función de disipación del sistema ya graficado en la Figura N° 8.

$$T = \frac{1}{2} \cdot m_s \dot{x}_s^2 + \frac{1}{2} \cdot m_u \dot{x}_u^2$$

$$V = \frac{1}{2} k_s (x_s - x_u)^2 + \frac{1}{2} k_u (x_u - y)^2$$

$$D = \frac{1}{2} c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u)^2$$

Donde T, V y D son la energía cinética, la energía potencial y la función de disipación del modelo del cuarto de carro.

Aplicando las ecuaciones de la mecánica de Lagrange se obtiene que:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right) - \frac{\partial K}{\partial x_s} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_s} + \frac{\partial V}{\partial x_s} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_u} \right) - \frac{\partial K}{\partial x_u} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_u} + \frac{\partial V}{\partial x_u} = 0$$

Al calcular las derivadas y desarrollando se encuentran las ecuaciones del movimiento de este sistema:

$$m_s \ddot{x}_s = -k_s (x_s - x_u) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u)$$

$$m_u \ddot{x}_u = k_s (x_s - x_u) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - k_u (x_u - y)$$

Gracias a estas ecuaciones se observa que, cualquier cambio en la elevación del perfil (parámetro “y”) genera una respuesta dinámica en la masa suspendida y masa no suspendida. Esta respuesta está condicionada por los parámetros propios del vehículo (k_u, k_s, c_s), es decir, cada vehículo vibrará con mayor o menor intensidad frente a un mismo perfil longitudinal. Con el fin de uniformizar la respuesta de un auto, el Banco Mundial, en sus lineamientos, propone los siguientes valores de parámetros normalizados por la masa suspendida m_s :

$$k_2 = \frac{k_s}{m_s} = 63.3 ; k_1 = \frac{k_u}{m_s} = 653 ; c = \frac{c_s}{m_s} = 6 ; \mu = \frac{m_u}{m_s} = 0.15$$

Estos valores son conocidos como los parámetros del Golden Car o Auto de Oro.

De esta forma, las ecuaciones del sistema de cuarto de carro calculados anteriormente se pueden simplificar y ordenar en forma matricial quedando como:

$$\dot{x} = Ax + By$$

Donde:

$$x = [x_s, \dot{x}_s, x_u, \dot{x}_u]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1 + k_2}{\mu} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix}$$

$$B = [0, 0, 0, k_1/\mu]^T$$

Luego de resolver este sistema de ecuaciones diferenciales se obtiene la simulación del movimiento de las masas suspendida y no suspendida. El IRI es la acumulación, en valor absoluto, de la diferencia del movimiento de estas dos masas normalizadas por la longitud del perfil. Así, el cálculo del IRI se expresa como:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^t |\dot{x}_s - \dot{x}_u| dt$$

2.2.4. Solución numérica del modelo

A pesar de que se pueden obtener soluciones analíticas del modelo del cuarto de carro, se requiere de una solución numérica de este debido a que la toma de datos se realiza de manera discreta. Dependiendo de la frecuencia de los sensores, se pueden tener desde 100 hasta 500, o incluso más de 1000 datos por segundo. Esta segmentación de la toma de mediciones obliga a la obtención de una solución numérica que tome un intervalo de tiempo constante en sus cálculos.

Sea la ecuación:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + By$$

O también:

$$\frac{dx}{dt} - Ax = F(t); \text{ donde } F(t) = By$$

Multiplicando ambos miembros por e^{-At} :

$$e^{-At} \frac{dx}{dt} - e^{-At} Ax = e^{-At} \cdot F(t)$$

$$\frac{d(e^{-At} \cdot x)}{dt} = e^{-At} \cdot F(t)$$

Integrando desde el estado inicial hasta un tiempo "t":

$$\int_0^t \frac{d(e^{-At} \cdot x)}{dt} = \int_0^t e^{-At} \cdot F(\tau) d\tau$$

$$e^{-At} \cdot x(t) - e^{-At} \cdot x(0) = \int_0^t e^{-At} \cdot F(\tau) d\tau$$

Finalmente:

$$x(t) = e^{At} \cdot x(0) + e^{At} \int_0^t e^{-A\tau} \cdot F(\tau) d\tau$$

Hasta este punto, la solución hallada es analítica. Para la obtención de la solución discreta, el Banco Mundial hace uso de la siguiente metodología, tomada de Melis, 1993. Primero considera incrementos de tiempo constantes, así, para un tiempo $t = n\Delta t$, se tiene:

$$x(t) = x_n = e^{An\Delta t} \cdot x(0) + e^{An\Delta t} \int_0^{n\Delta t} e^{-A\tau} \cdot F(\tau) d\tau$$

La solución iterativa se halla calculando la diferencia:

$$x_{n+1} - e^{A\Delta t} x_n$$

Que desarrollando queda como:

$$x_{n+1} - e^{A\Delta t} x_n = e^{A(n+1)\Delta t} \cdot x(0) + e^{A(n+1)\Delta t} \int_0^{(n+1)\Delta t} e^{-A\tau} \cdot F(\tau) d\tau - e^{A\Delta t} \cdot (e^{An\Delta t} \cdot x(0) + e^{An\Delta t} \int_0^{n\Delta t} e^{-A\tau} \cdot F(\tau) d\tau)$$

Simplificando:

$$x_{n+1} - e^{A\Delta t} x_n = e^{A(n+1)\Delta t} \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} e^{-A\tau} \cdot F(\tau) d\tau$$

La relación de recursividad queda como:

$$x_{n+1} = e^{A\Delta t} x_n + e^{A(n+1)\Delta t} \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} e^{-A\tau} \cdot F(\tau) d\tau$$

Ahora el problema consiste en calcular la integral del segundo término de esta relación de recursividad.

Asumiendo que el vector $F(\tau)$ es constante en el intervalo de tiempo Δt , puede salir de la integral quedando:

$$x_{n+1} = e^{A\Delta t}x_n + F(t) \cdot e^{A(n+1)\Delta t} \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} e^{-A\tau} d\tau$$

Desarrollando la integral:

$$x_{n+1} = e^{A\Delta t}x_n + F(t) \cdot e^{A(n+1)\Delta t}(-A^{-1}e^{-A(n+1)\Delta t} + A^{-1}e^{-An\Delta t})$$

Simplificando:

$$x_{n+1} = e^{A\Delta t}x_n + A^{-1} \cdot (e^{A\Delta t} - 1) \cdot F(t)$$

Donde:

$$F(t) = By$$

$$\Delta t = \frac{\Delta}{V} \quad (\Delta \text{ es la distancia entre dos puntos del perfil longitudinal})$$

La exponencial de una matriz puede calcularse haciendo uso del desarrollo en serie:

$$e^{A\Delta t} = I + \frac{(A\Delta t)}{1!} + \frac{(A\Delta t)^2}{2!} + \frac{(A\Delta t)^3}{3!} + \dots$$

2.3. Sistemas embebidos

La presente investigación tiene como objetivo principal obtener el valor del IRI de las carreteras por medio de la recolección de datos de acelerómetros y GPS. Para este fin se propone el uso de un sistema embebido en un vehículo que recolecte la información que será procesada posteriormente.

Ya se definió al parámetro de rugosidad IRI y la manera en cómo calcularlo. A continuación se definirá lo que es un sistema embebido y las formas actuales que existen para la elaboración de uno.

Un sistema embebido se puede definir como “un sistema cuya función principal no es computacional, sino que es controlada por una computadora embebida dentro de él” (Wilmschurst, 2010). De esta definición se puede concluir que un sistema embebido no es uno que ejecute múltiples funciones, como una computadora, sino que está restringido a unas cuantas ya predefinidas dentro de su propio computador.

Entre los principales elementos que componen a un sistema embebido se encuentran la placa base. Esta es la que recibe las instrucciones de qué funciones realizará el sistema embebido. Contiene toda la electrónica necesaria para tal fin, como microcontroladores, resistencias, puertos, entre otros. También consta de la fuente de alimentación, que puede ir desde unas simples pilas o baterías hasta fuentes alimentadoras de mayor voltaje. Además de estos elementos, un sistema embebido puede contener sensores y/o actuadores. Los sensores son dispositivos, generalmente de dimensiones pequeñas (menores a 5 cm), que se comunican con el mundo exterior y miden diferentes parámetros de él. Estas mediciones las transforman en una señal eléctrica que puede ser interpretada por la placa base. A diferencia del sensor, un actuador es un dispositivo mecánico cuya finalidad es realizar un movimiento o provocar una fuerza sobre otro. Entre estos tenemos a los motores, los servos, las válvulas, etc.

Un esquema que grafica de forma resumida los elementos que integran un sistema embebido se observa en la Figura N° 9.

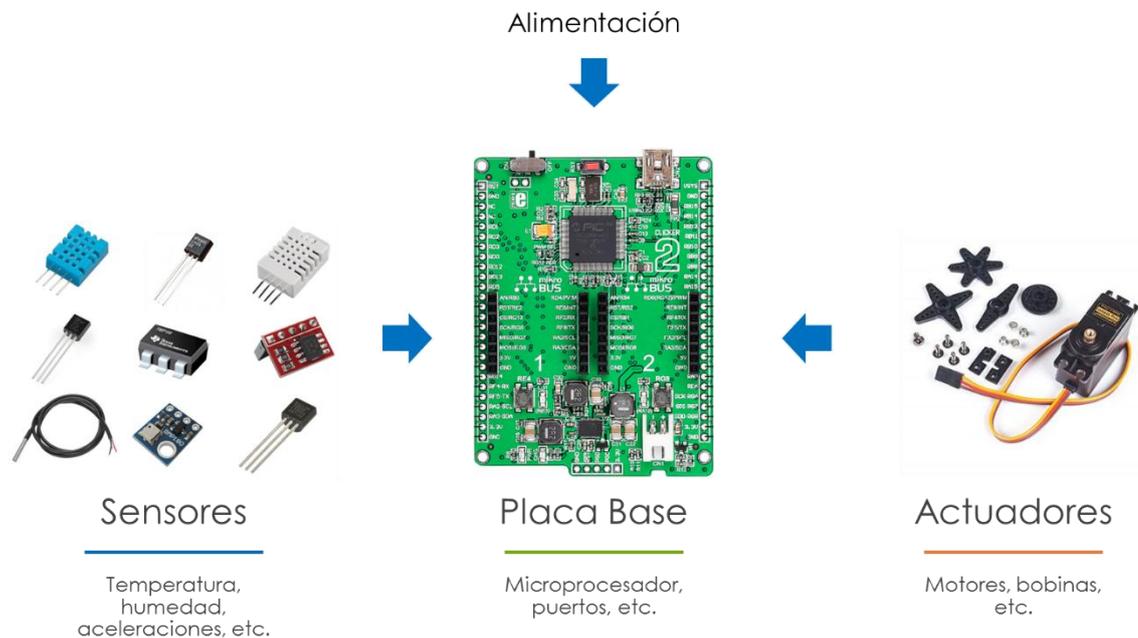


Figura N° 9. Esquema básico de un sistema embebido.

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa, el componente principal dentro de un sistema embebido es la placa base. La elaboración de esta placa pasa por diferentes etapas en las que se evalúa la arquitectura que tendrá, los componentes que manejará y las funciones que realizará. Por ello, es necesario un conocimiento profundo de diferentes

conceptos de electrónica. Sin embargo, actualmente en el mercado existen diferentes placas pre-desarrolladas, es decir, cuya arquitectura ya ha sido realizada y solo es necesario la definición de las funciones que esta desarrollará mediante códigos de programación.

Entre estas placas se tienen las placas Arduino, las placas Raspberry y las placas BeagleBoard. Cada una de ellas tiene sus propias ventajas y desventajas las cuales dependen del tipo de proyecto a realizar. Para la presente tesis, se escogió una placa Arduino por las ventajas que ofrece, las cuales serán detalladas en extenso en el siguiente ítem.

2.4. Plataforma arduino

Como ya se mencionó, Arduino es una placa pre-desarrollada basada en hardware y software de código abierto. Fue desarrollada inicialmente en el año 2005 por Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino y David Mellis, quienes decidieron crear un dispositivo que fuese fácil de programar con el fin de acercar las nuevas herramientas electrónicas a personas que no tengan mayores conocimientos de estas.

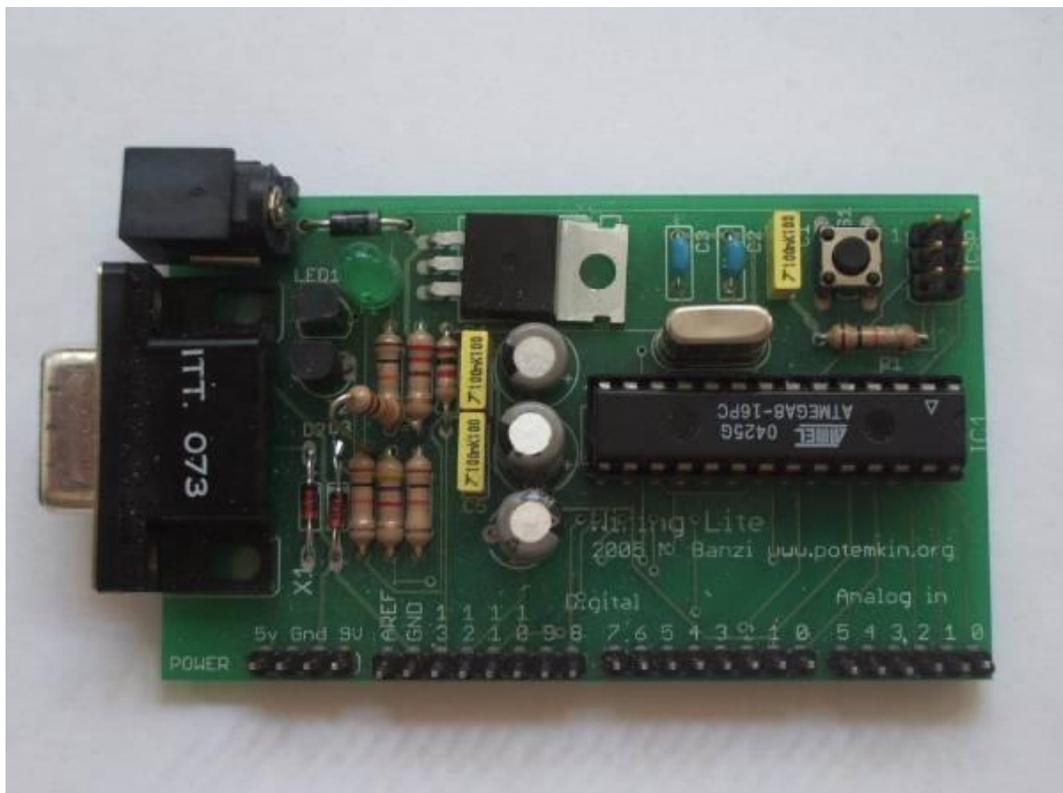


Figura N° 10. Placa similar al primer prototipo de Arduino.

Fuente: <https://arduinohistory.github.io/>

Este dispositivo que tenían en mente debía, además, contar con puertos de conexión sencilla con diversos aparatos como sensores y motores. También debía tener un bajo costo para que fuese accesible a estudiantes y desarrolladores. Como resultado se llegó a un dispositivo como el de la Figura N° 10 al que denominaron Arduino (el nombre es en honor a un bar en Ivrea, Italia).

Entre las ventajas que ofrece la placa Arduino están:

- Bajo costo: Las placas Arduino tienen un costo relativamente bajo en comparación con otras placas pre-desarrolladas. Una placa de Arduino puede costar desde los \$3 en una versión genérica, mientras que una placa Raspberry se cotiza alrededor de \$60.
- Entorno amigable: El entorno para programar la placa Arduino es fácil de trabajar incluso para personas que no tienen conocimientos básicos de programación.
- Dimensiones pequeñas: Las placas de Arduino tienen dimensiones de unos pocos centímetros (la más grande tiene 10 cm x 8 cm mientras que la más pequeña llega hasta los 3 cm x 1.5 cm). Esto las hace portables para la mayoría de proyectos.
- Código abierto: El entorno de Arduino es de código abierto. Esto tiene como ventaja que existen miles de librerías gratuitas en la red que pueden ser usadas por cualquier usuario.

2.4.1. Hardware

El hardware, o la parte física que compone a las placas Arduino, van a depender del tipo de placa que se use. Las diferentes placas Arduino difieren en tamaño, diseño y características de procesamiento. En la Figura N° 11 se observa un grupo de placas Arduino que son las más usadas actualmente y la elección de cada una de ellas va a depender del tipo de proyecto que se tenga.

Así, se tienen placas que sirven para sistemas embebidos usados por ejemplo en hogares, para la medición de humedad y temperatura, o incluso para el control automatizado de riego de plantas. También se tienen placas para la creación de dispositivos denominados “wearables”, como la placa LillyPad, la cual ha sido creada para poder adaptarse a la tela de cualquier prenda de vestir y así poder ejecutar cualquier función que se le haya programado mientras el individuo está realizando sus actividades.

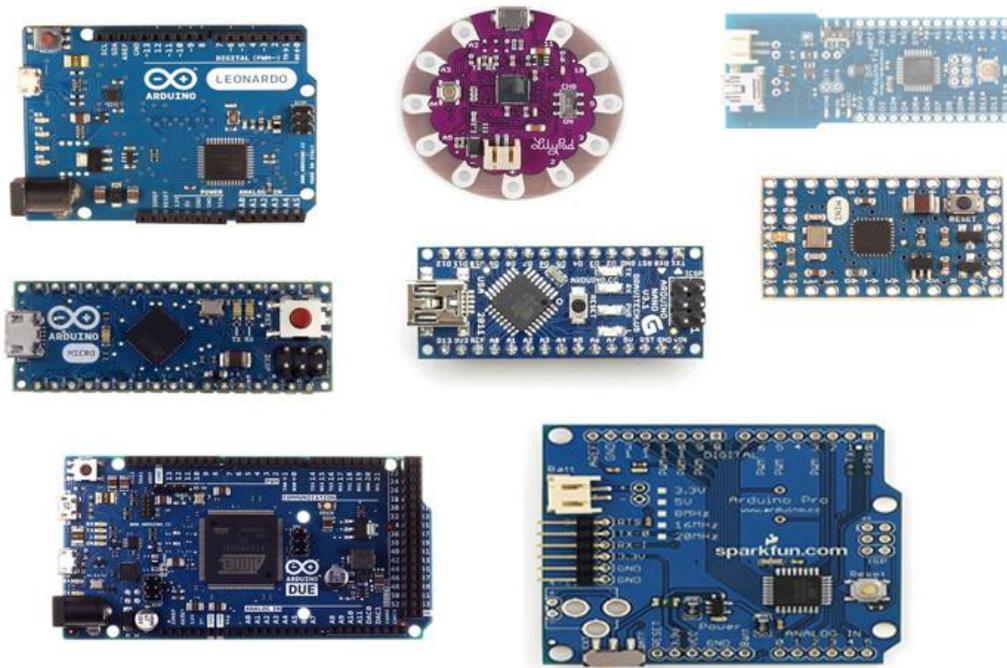


Figura N° 11. Modelos de placas Arduino.

Fuente: <https://www.fingerpointengg.com>

Sin embargo, se describirán las dos placas más usadas en la mayoría de proyectos.

Arduino UNO



Figura N° 12. Arduino UNO.

Fuente: arduino.cc

Como ya se mencionó, existen diversas placas Arduino, cada una con sus características propias, y siguen saliendo al mercado muchas más. La elección de la placa dependerá del proyecto que se busca realizar. Sin embargo, existe una placa que puede ser considerada como la principal, ya que es ideal para iniciar en proyectos electrónicos básicos y se adecúa perfectamente a la mayoría de proyectos. Esta placa es la denominada Arduino UNO.

La versión más actual de esta placa es el Arduino UNO R3, la cual fue lanzada en el 2011. Esta versión R3 del Arduino UNO es muy manejable y sencilla de usar. Esto la hace ideal para principiantes en proyectos de electrónica. La presentación actual de esta placa se muestra en la Figura N° 12. La Tabla 1 resume las especificaciones generales de esta placa.

Tabla 1. Especificaciones del Arduino UNO.

Fuente: arduino.cc

Especificación	
Microcontrolador:	ATmega328
Voltaje de alimentación (recomendado):	7V-12V
Pines Digitales:	14
Pines Analógicos:	6
Memoria Flash:	32 Kb
Puertos Seriales:	1 (Pines 0 y 1)

Arduino MEGA

El Arduino MEGA es una placa más grande que el Arduino UNO, tanto en dimensiones físicas como en capacidad interna. Sirve para proyectos mayores que requieren de una importante cantidad de sensores o más capacidad de procesamiento de datos. La placa de Arduino MEGA tiene 54 pines digitales y 16 pines analógicos.



Figura N° 13. Arduino MEGA.

Fuente: arduino.cc

La placa de Arduino MEGA se muestra en la Figura N° 13. Las especificaciones de esta placa son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de Arduino MEGA.

Fuente: arduino.cc

Especificación	
Microcontrolador:	ATmega2560
Voltaje de alimentación (recomendado):	7V-12V
Pines Digitales:	54
Pines Analógicos:	16
Memoria Flash:	256 Kb
Puertos Seriales:	3 (Pines 0 y1, 16 y 17, 18 y 19)

2.4.2. Software

El software necesario para programar en Arduino se encuentra disponible gratuitamente en su página web (<https://www.arduino.cc>). Luego de instalar el entorno de desarrollo (IDE por sus siglas en inglés) se abre una pantalla como la mostrada en la Figura N° 14.

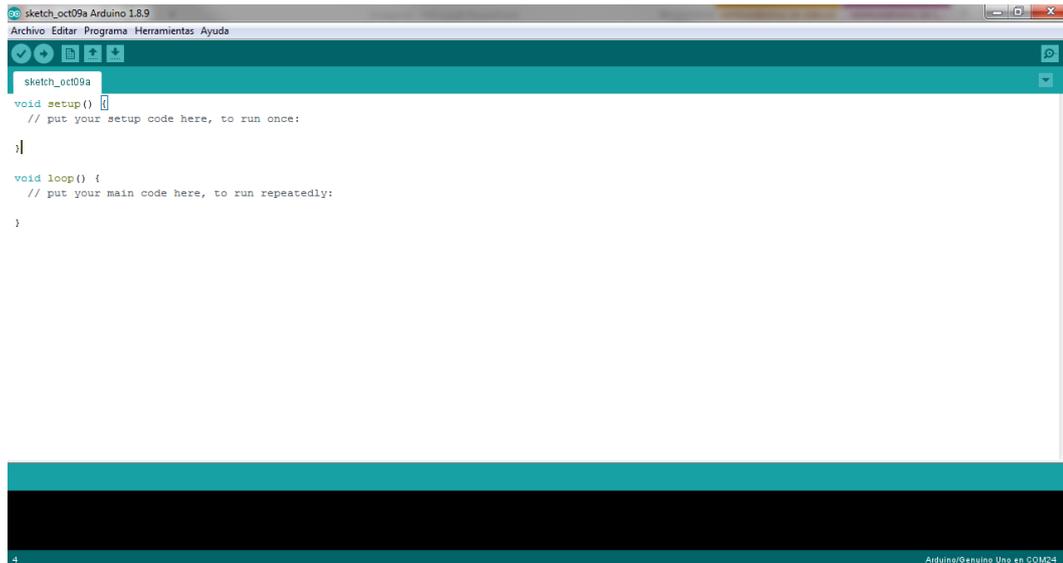


Figura N° 14. Entorno de desarrollo de Arduino.

Fuente: Elaboración Propia

Es dentro de este entorno donde se dan las instrucciones a la placa de Arduino mediante código de programación en lenguaje C. Este código tiene dos partes diferenciadas, que siempre están presentes en todo programa que se suba a la placa de Arduino.

La primera de ellas es la denominada "setup". Es en esta parte donde se incluye el código que deberá ser ejecutado solo una vez cuando se enciende la placa de Arduino. Se suele incluir la inicialización de variables o sensores en esta parte del código.

La segunda parte del código se denomina "loop". En esta se incluyen las instrucciones que se repetirán indefinidamente en la placa de Arduino siempre que esta se encuentre encendida.

La transferencia de estas instrucciones a la placa de Arduino se hace mediante la conexión de un cable USB del computador hacia la placa. Así, el programa que se haya cargado a la placa Arduino permanecerá inclusive una vez esta se haya apagado.

2.5. Acelerómetros

El acelerómetro es un dispositivo que mide las vibraciones o aceleraciones que produce el movimiento de cierto elemento o estructura. Existen diversos tipos de acelerómetros de acuerdo a las necesidades que se tengan, las cuales en general se resumen en los siguientes parámetros:

- a) Frecuencia: Este es uno de los principales parámetros a considerar para la elección del acelerómetro. Va desde 0 hasta un límite que depende de la frecuencia de muestreo del sensor.
- b) Rango: Es el valor máximo de aceleración que registrará el acelerómetro. Existen acelerómetros de rangos muy bajos (menores a “2 g”) así como acelerómetros de rangos muy altos (mayores a “20 g” llegando a los “5,000 g”) los cuales son usados para el análisis de impactos.

De acuerdo a (Doebelin, 2004), los acelerómetros pueden ser clasificados como sigue:

- a) Tecnología clásica
 - a. Respuesta DC
 - i. Potenciómetros
 - ii. Galgas extensométricas acopladas
 - iii. Galgas extensométricas no acopladas
 - iv. Capacitivos
 - b. Respuesta No-DC
 - i. Piezoeléctricos
- b) Tecnología MEMS
 - a. Respuesta DC
 - i. Piezoeléctricos
 - ii. Capacitivos

2.6. Procesamiento de señales

Como se vio en el punto 2.2, para poder hallar la elevación del perfil “Y”, se necesitan de las aceleraciones, velocidades y desplazamientos de las masas suspendida y no suspendida. Con el fin de hallar estos valores, se hace necesario la colocación de sensores acelerómetros en estas masas, para así, una vez obtenidas las aceleraciones se pueden hallar los demás parámetros (velocidad y desplazamiento) realizando integraciones de la señal. Sin embargo, los sensores acelerómetros son muy susceptibles a interferencias que alteran los valores medidos. Estas interferencias se suelen denominar “ruido”, y es este el que se debe suprimir para no tener errores en los cálculos.

Así, si se tiene una señal de aceleración con una desviación en sus valores:

$$a(t) = \ddot{x}(t) + e(t)$$

Al integrar esta expresión para el cálculo de la velocidad, se tiene:

$$v(t) = \dot{x}(t) + \int e(t)dt$$

Si se toma al ruido $e(t)$ como una constante, se tiene que la segunda expresión de la velocidad calculada es una función lineal. Este comportamiento se observa en la Figura N° 15, donde se tiene una señal de aceleración sin filtrar y, al calcular la velocidad por integración directa, se observa cómo esta decrece linealmente producto del ruido presente.

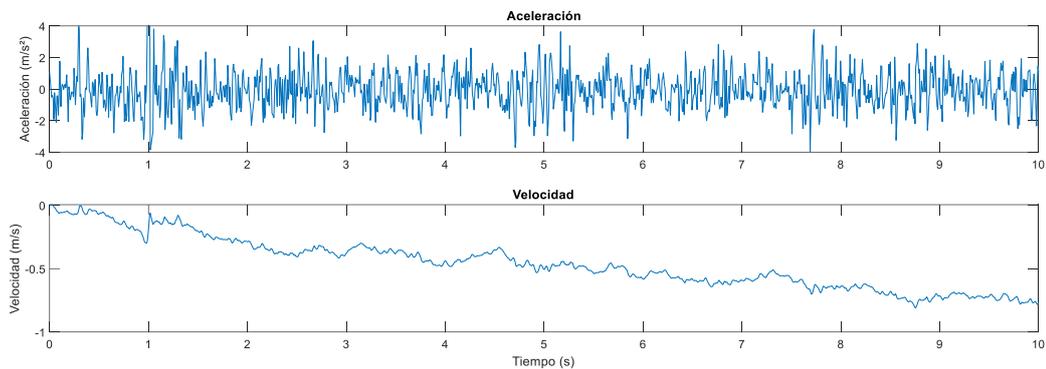


Figura N° 15. Errores originados por la señal de aceleración sin filtrar.

Fuente: Elaboración Propia.

La forma de eliminar o disminuir la influencia del ruido en las señales es haciendo uso de los filtros. Los filtros son operaciones matemáticas que modifican una señal de entrada, en este caso la señal de los acelerómetros, y la convierten en una señal con otras características. En esta investigación, se busca que el filtro o filtros usados atenúen, sino eliminen, el ruido existente en la señal. Existen una diversa cantidad de filtros para el procesamiento de las señales, no obstante, en la presente investigación se hicieron uso de dos: filtro pasa-altos y filtro pasa-bajos.

2.6.1. Filtro pasa-altos

Un filtro pasa altos elimina o atenúa los elementos que se encuentran debajo de una frecuencia dada (llamada frecuencia de corte) y permite las señales situadas por encima de esta frecuencia.

Este tipo de filtros se suele usar para excluir los elementos de baja frecuencia, con lo que la señal original se queda con los elementos de alta frecuencia (MathWorks, 2019).

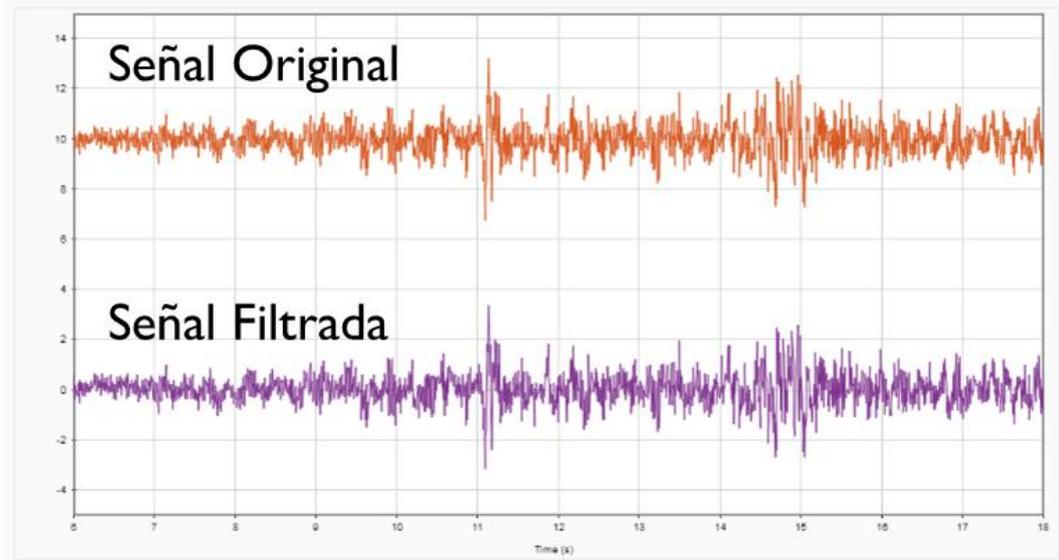


Figura N° 16. Señal luego de aplicar el filtro pasa-alto.

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura N° 16 se muestra una señal de aceleración en su forma original y en su forma filtrada por un filtro pasa-altos. Se observa que el filtro pasa-altos elimina el offset que pudiese tener la señal, así como también un valor constante que se esté añadiendo a la señal original. En el caso de los acelerómetros, estos están afectados por la gravedad, por lo que el filtro pasa-altos suprime este valor de los cálculos.

2.6.2. Filtro pasa-bajos

A diferencia del filtro pasa altos, el filtro pasa bajos elimina o atenúa los elementos que se encuentran por encima de la frecuencia de corte y permite las señales situadas debajo de esta frecuencia.

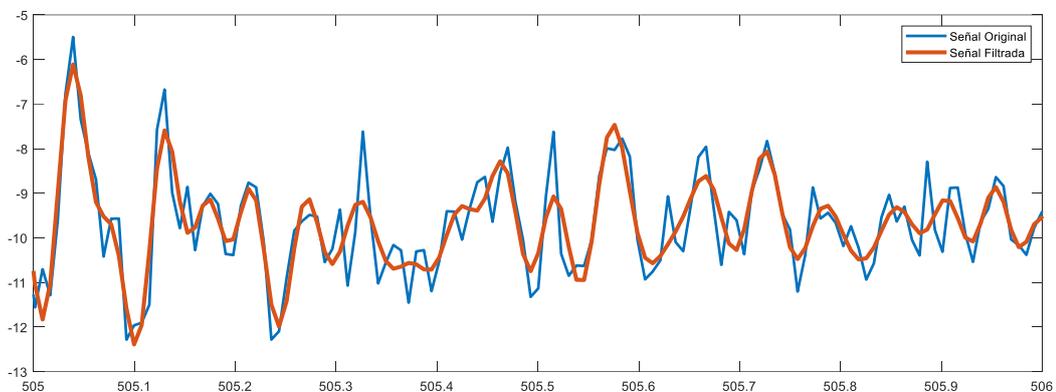


Figura N° 17. Señal luego de aplicar un filtro pasa-bajos.

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se eliminan las señales de alta frecuencia, la señal original queda con un efecto de suavizado, lo que permite concluir que este filtro facilita la observación de tendencias en la señal. Este tipo de filtros se usan para limpiar las señales de ruido, el cual suele tener una frecuencia alta (MathWorks, 2019).

2.6.3. Frecuencias predominantes en un vehículo

Siguiendo con Sayers (1990), los vehículos responden dinámicamente de forma semejante al modelo del cuarto de carro, ya mencionado en el punto 2.2.2. Se vio que este modelo cuenta con amortiguadores y sistemas de suspensión, de tal forma que aíslan a las masas presentes de las vibraciones originadas por el pavimento por el que transita el vehículo.

Si se grafica la transmisión dinámica del pavimento hacia la masa suspendida, se obtiene una gráfica como la Figura N° 18.

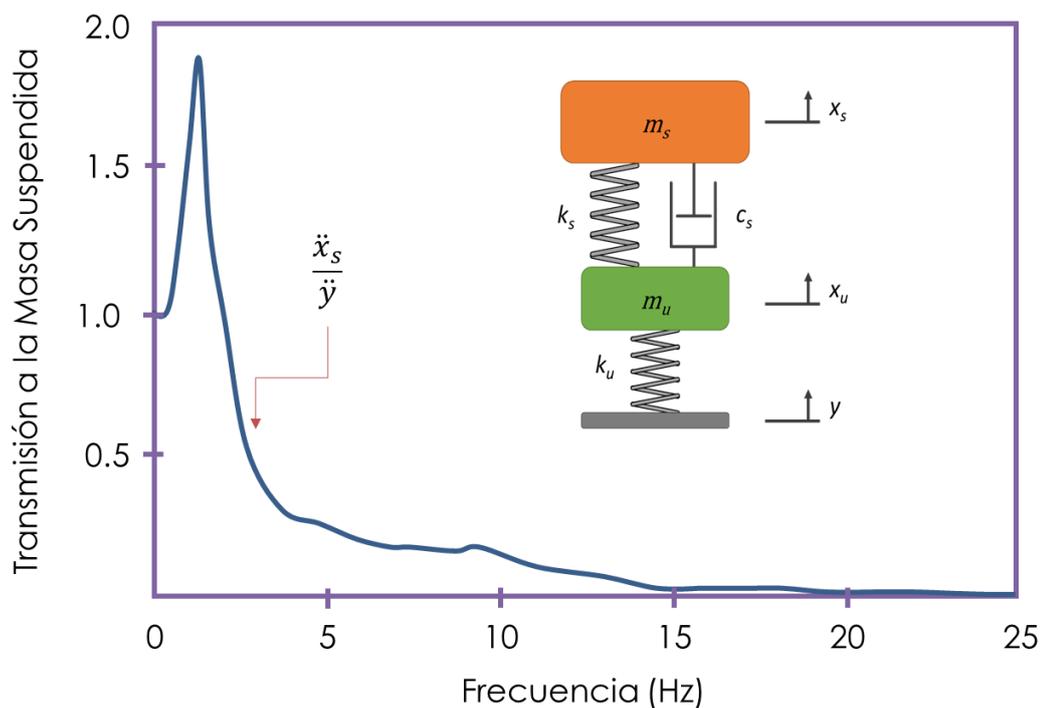


Figura N° 18. Respuesta dinámica del modelo de cuarto de carro.

Fuente: Adaptado de Sayers (1990).

Se observa que a frecuencias pequeñas, el vehículo se mueve verticalmente casi como el pavimento, habiendo un incremento, o resonancia, a la frecuencia de 1 Hz, donde el movimiento se amplifica hasta en un 100%.

A frecuencias más altas, la suspensión aísla la masa del vehículo de los movimientos del pavimento, habiendo una reducción significativa para frecuencias mayores a 25 Hz.

De esta forma, para el análisis y procesamiento de las señales, se usarán los filtros ya descritos en los puntos 2.6.1 y 2.6.2 para aislar las frecuencias entre 0 y 25 Hz, las cuales son las predominantes en la dinámica existente entre el pavimento y la masa del vehículo.

Capítulo III. Generalidades

3.1. Planteamiento del problema

Una buena parte de la red vial nacional se encuentra falta de mantenimiento. Esto principalmente por los costos que ello conlleva y la consecuente desidia de las autoridades de darle prioridad a este tema. Como resultado, las carreteras en el país se deterioran rápidamente y se realizan costosos gastos para su rehabilitación o mejoramiento cuando resulta más conveniente invertir en el monitoreo constante para posteriormente desarrollar un plan de mantenimiento que mantenga la vía en buenas condiciones de servicio (Ministerio de Economía y Finanzas, 2008).

Para poder dar mantenimiento a las vías del país, es primero necesario conocer el estado en que se encuentran. Esto se logra a través de perfilómetros y/o rugosímetros, que, hoy en día, no son accesibles para poder realizar evaluaciones continuas en las vías; razón por la cual se programan muy pocas mediciones al año o cada cierta cantidad de años en el país (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2006). Es por esto, que se plantea la elaboración de un instrumento de bajo costo, que sea fácil de instalar y que permita la evaluación continua de las carreteras nacionales.

3.2. Justificación

El Perú es un país cuyas vías no se encuentran, en general, en buenas condiciones de mantenimiento. Del total de la red vial nacional (RVN), el 35% se encuentra en mal estado, y, si se toma solo a las vías no pavimentadas, este porcentaje se incrementa a 87% (Provías Nacional, 2017). Una de las mayores causas de este problema es la falta de un monitoreo constante de las carreteras, labor que no se realiza debido al alto costo que este conlleva.

Los equipos que son usados en la actualidad para obtener el estado de una vía tienen un alto grado de precisión, no obstante, son aún muy costosos; o, cuando tienen un menor precio, estos equipos poseen un bajo rendimiento, lo cual eleva su precio en vías de gran longitud.

Bajo lo anteriormente señalado, se propone el desarrollo de un equipo que calcule de forma automatizada el IRI a lo largo de una carretera con bajo costo y con una precisión de al menos 5%, lo cual ayuda a generar un plan de mantenimiento predictivo y eficiente.

3.3. Hipótesis

Haciendo uso de los sensores acelerómetros y GPS articulados en una plataforma Arduino es posible componer un dispositivo capaz de calcular el índice de rugosidad internacional (IRI) del pavimento con un grado de precisión de Clase 2, según los lineamientos del Banco Mundial, y a un costo conveniente para su fácil accesibilidad.

3.4. Objetivos

3.4.1. Objetivo principal

Desarrollar un dispositivo que, integrando sensores acelerómetros y un módulo GPS dentro de una placa Arduino, permita obtener el índice de rugosidad internacional (IRI) a lo largo de una carretera.

3.4.2. Objetivos secundarios

- Definir las características de los sensores acelerómetros como rango, precisión y frecuencia.
- Determinar el modelo que integre la información brindada por los sensores acelerómetros y el módulo GPS para poder obtener el IRI.
- Validar el dispositivo propuesto a lo largo de una vía y compararlo con otros equipos de medición.

3.5. Metodología de trabajo

En el presente trabajo de investigación, la metodología de trabajo a seguir consiste en los siguientes pasos que llevarán a la validación del instrumento basado en la plataforma Arduino. Para la elaboración del dispositivo, será necesario primero contar con el modelo de acelerómetro a usar de entre todos los sensores de este tipo que existen en el mercado. Asimismo, será necesario también seleccionar la placa de Arduino que sea más conveniente a usar, pues existen varios modelos de ellas que difieren en rendimiento y capacidad de memoria.

Una vez obtenido el tipo de sensor y la placa Arduino a usar, se deberá elegir el filtro más adecuado para procesar los registros de los acelerómetros, ya que la información que estos proporcionan presenta un ruido que altera las mediciones. El ruido consiste en señales de alta frecuencia y tienen un carácter aleatorio. Lo presentan todos los sensores, por lo que la elección del filtro se hace muy necesaria antes de empezar a procesar los valores medidos.

Ya seleccionado el filtro, lo que sigue es la elaboración del algoritmo que convierta las aceleraciones obtenidas en el perfil longitudinal de la vía por medio de las ecuaciones mecánicas del modelo matemático del cuarto de carro. Uno de los objetivos del proyecto es validar el instrumento propuesto y que tenga una clasificación de Clase 2, es decir, que los resultados que este brinde no dependan de los valores de IRI obtenido por otros métodos. Para esto, el algoritmo se realizará de tal forma que no sea necesaria una correlación directa con otras medidas de IRI. Solo se usarán estas para evaluar el nivel de precisión que tenga el equipo.

Luego de obtenido el perfil, lo que sigue es obtener el IRI según los lineamientos del Banco Mundial y de la norma ASTM Standard E1170-97.

Con el fin de validar el instrumento se realizarán mediciones de IRI con el equipo propuesto considerando tres escenarios. Estos escenarios son: Pavimento en buen estado, pavimento con imperfecciones superficiales y pavimentos en buen estado. Con la información de aceleraciones obtenidas se ejecutará el algoritmo propuesto y se compararán los valores de rugosidad con los medidos con instrumentos de Clase 1, como pueden ser el Perfilómetro Láser o el Nivel topográfico.

Capítulo IV. Diseño del rugosímetro

4.1. Diseño del hardware

El rugosímetro que se espera implementar debe contar con las características necesarias para poder simular el comportamiento del modelo físico del cuarto de carro. Esto se logra con la ubicación de dos sensores acelerómetros, uno en la masa suspendida y otro en la masa no suspendida. Estos acelerómetros se encargarán de registrar las vibraciones verticales que sufren estas masas al pasar por una carretera. La medida de la distancia recorrida o la geolocalización de los datos se hará gracias a un GPS integrado al sistema. Esto permitirá conocer la posición, fecha y hora en la que se está tomando los registros de los acelerómetros. También el dispositivo debe tener un módulo de adquisición de datos para, de esta manera, se registre toda la información que se requiera de un pavimento o una carretera a analizar.

4.1.1. Especificaciones técnicas mínimas

El dispositivo propuesto deberá contener como mínimo dos acelerómetros, un GPS y un módulo de adquisición de datos, como ya se mencionó en el punto anterior.

Una de las formas más económicas y efectivas de recolectar datos es por medio de un módulo SD. Este guarda la información en una tarjeta micro SD de acuerdo al formato y tipo de archivo especificado en la placa Arduino. Existen diversos modelos y capacidades de tarjetas micro SD, las cuales se usan dependiendo de las especificaciones del proyecto, siendo necesaria solo una tarjeta de una capacidad de 16 GB si se requiere guardar información de unos cuantos días o una tarjeta de hasta 64 GB si se desea registrar información de varias semanas o, incluso meses. Para la presente investigación se hará uso de una tarjeta de 16 GB de capacidad.

Es en la elección de los sensores acelerómetros donde se debe tener mayor cuidado pues, como se mencionó, existen diversos tipos que varían en sus dimensiones y rangos, tanto de frecuencia (los hay de bajas frecuencias como de muy altas frecuencias, superando los 5,000 Hz) como de amplitud (hay acelerómetros muy sensibles de menos de 0.5 g hasta de alta amplitud superando los 50,000 g para el estudio de impactos).

Con el fin de conocer el rango de aceleraciones a los que debe trabajar el sensor acelerómetro, se presenta la Figura N° 19, en la cual se observan las amplificaciones de aceleraciones que sufren el neumático (masa no suspendida) y la suspensión del vehículo (masa suspendida) en el modelo de cuarto de carro.

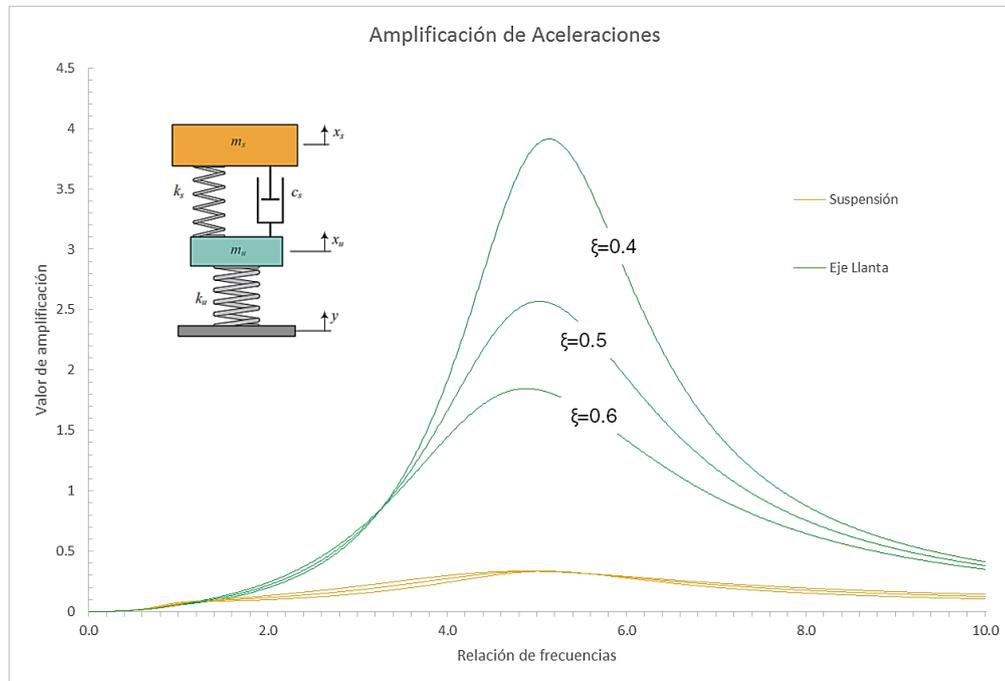


Figura N° 19. Aceleraciones en modelo cuarto de carro.

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, la suspensión de un vehículo no sufre mayor amplificación, como si lo hace el eje de la llanta. Sin embargo, esta amplificación no es mayor a "5g" para valores promedio de amortiguamiento en vehículos mayores.

Por esto, el acelerómetro a seleccionar quedaría cubierto a los requerimientos del proyecto con un rango máximo de "5g". En caso de obtenerse aceleraciones mayores a este valor, esto sería un indicador de que el terreno muestreado se encuentra muy deteriorado, y la precisión en el cálculo del IRI en estos casos no es trascendental.

Con respecto a las frecuencias que se originan debido a la superficie sobre los vehículos, (Sayers & Karamihas, 1998) indican que analizando estos en su nivel más básico, los vehículos son dinámicamente similares al modelo de cuarto de carro. Además, la suspensión del vehículo junto a las características del neumático ayuda a aislar el sistema de las altas frecuencias provocadas por las

irregularidades de la vía. Como tope máximo de frecuencias de respuesta en el vehículo se tiene un valor de 25 Hz, como ya se vio en el punto 2.6.3. Frecuencias mayores son absorbidas por la suspensión del sistema.

Una vez obtenidas las frecuencias que se desean captar o medir con el sensor acelerómetro, se tiene que definir la frecuencia de muestreo de este. Para el muestreo, se tiene que tener cuidado de seguir el teorema de Nyquist, el cual especifica que el número de datos obtenidos por segundo debe ser al menos el doble de la frecuencia más alta presente en la señal a medir (Dyer, 2001). Siguiendo este teorema, el sensor acelerómetro debe ser capaz de trabajar a una frecuencia de por lo menos 50 Hz.

4.1.2. Descripción de los elementos

Ya obtenidos los elementos necesarios y las especificaciones mínimas de los mismos, se puede esquematizar el diseño del rugosímetro como se muestra en la Figura N° 20.

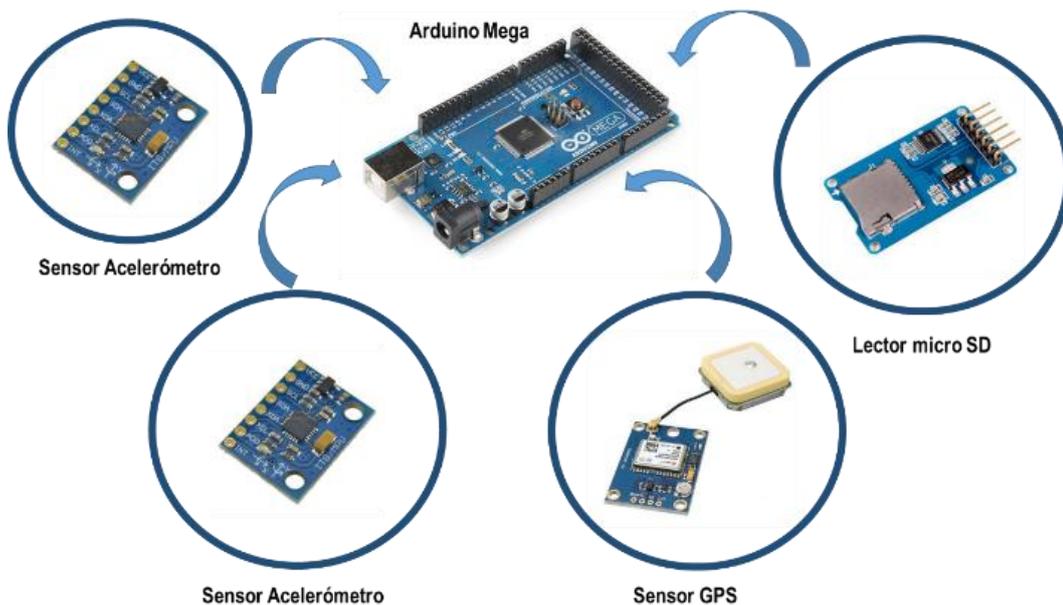


Figura N° 20. Esquema del rugosímetro propuesto.

Fuente: Elaboración Propia

Sensor Acelerómetro

El acelerómetro a usar en la presente investigación es uno de clasificación MEMS y de código MPU6050. El sensor MPU6050 es un dispositivo capaz de medir aceleraciones (acelerómetro) y velocidades de giro (giroscopio) en los tres ejes espaciales (ejes x, y, z).

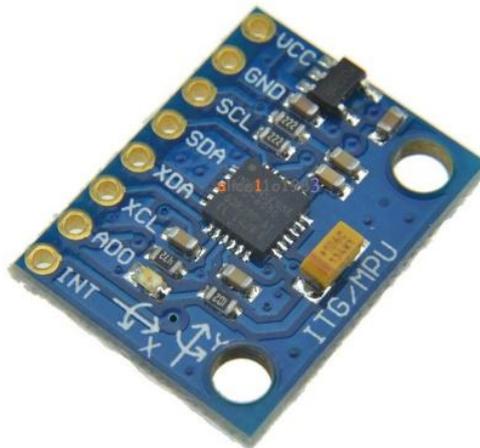


Figura N° 21. Sensor acelerómetro MPU6050.

Fuente: <https://naylampmechatronics.com>

El MPU6050 es un sensor digital con un voltaje de alimentación de entre 3.3V a 5V y bajo consumo de corriente, llegando a 3.5 mA activando todas las funciones de este.

Con respecto a los valores que se obtienen de este sensor, las aceleraciones tienen un rango programable (se puede modificar desde el código de programación) de “ $\pm 2g$ ”, “ $\pm 4g$ ”, “ $8g$ ” y “ $16g$ ”, donde “g” es la aceleración de la gravedad. El giroscopio, que mide las velocidades de giro, tiene un rango programable de “ $\pm 250^\circ/s$ ”, “ $\pm 500^\circ/s$ ”, “ $\pm 1000^\circ/s$ ” y “ $\pm 2000^\circ/s$ ”.

La frecuencia de toma de datos, cuando se leen simultáneamente valores del acelerómetro y/o giroscopio puede llegar a los 500 Hz aproximadamente.

GPS

El GPS a usar en el rugosímetro es del modelo NEO-6, que pertenece a la empresa U-Blox, teniendo como una de sus ventajas poder ser fácilmente conectado a una placa Arduino.

Estos módulos de GPS tienen pequeñas dimensiones (3 cm x 3 cm) y poco gasto de corriente (37 mA usando la mayoría de funciones). La precisión en sus mediciones puede llegar incluso a ser menor a los 5 metros, dependiendo del número de satélites existentes en el momento de la medición.



Figura N° 22. Módulo GPS.

Fuente: <https://naylampmechatronics.com>

Lector SD

El lector SD es un módulo que permite el registro o almacenamiento de datos en una tarjeta SD o micro SD. Entre sus ventajas están su pequeño tamaño y la opción de no perder datos incluso si se interrumpe la alimentación del dispositivo.

Es compatible con tarjetas SD de hasta 64 GB, lo cual lo hace conveniente para la mayoría de proyectos de sistemas embebidos con el propósito de recolectar datos.



Figura N° 23. Módulo lector de micro SD.

Fuente: <https://naylampmechatronics.com>

4.1.3. Calibración de los acelerómetros

Con el fin de calibrar los sensores acelerómetros a usar en el rugosímetro y detectar la precisión de sus resultados, se procedió a probarlos en una mesa de vibración, la cual brinda un movimiento a una amplitud y frecuencia dada.

El ensayo fue llevado a cabo en el laboratorio de estructuras del CISMID (Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres). Se colocaron 2 acelerómetros propios de la institución como referencia para las mediciones. Estos son de la marca “Kyowa” y tienen un rango de “2g” y “5g”.

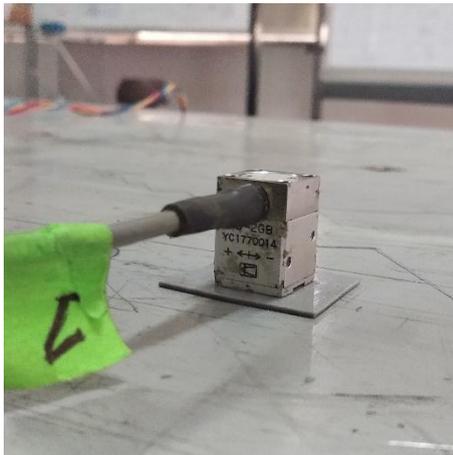


Figura N° 24. Acelerómetro Kyowa de 2g.
Fuente: Elaboración Propia

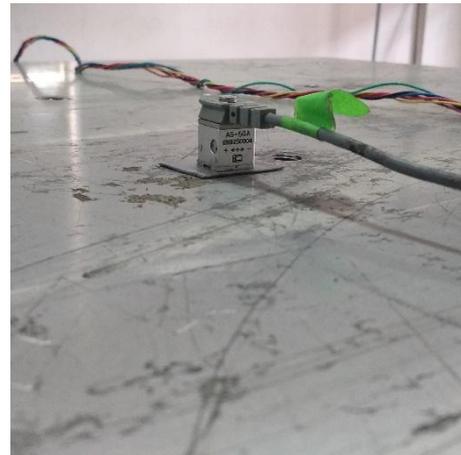


Figura N° 25. Acelerómetro Kyowa de 5g.
Fuente: Elaboración Propia

Los sensores se colocaron sobre una mesa de vibración, la cual tiene dimensiones de 1.2 m de largo por 1.0 m de ancho con una amplitud máxima de 1cm y una frecuencia de vibración de hasta 50 Hz.

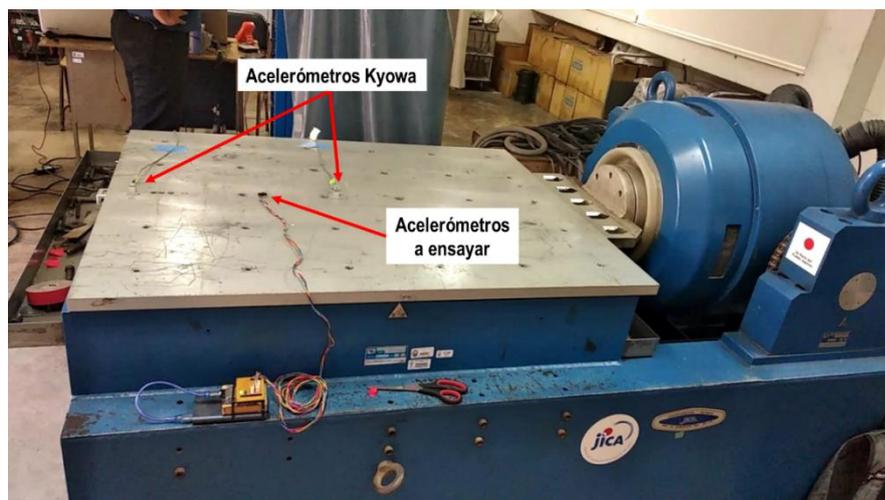


Figura N° 26. Disposición de acelerómetros en la mesa de vibración.

Fuente: Elaboración Propia

Se realizaron un total de 5 ensayos a diferentes frecuencias, cada uno por espacio de 30 segundos. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3. Resultados de calibración en mesa vibratoria.

Fuente: Elaboración Propia

Ensayo	Frecuencia Mesa (Hz)	Acelerómetro Kyowa		Acelerómetro MPU6050		% Error Frec. Mesa	% Error Frec. Acel.
		Amplitud (g)	Frec. (Hz)	Amplitud (g)	Frec. (Hz)		
1	2.00	0.110	2.06	0.105	2.08	3.90%	0.78%
2	5.00	0.237	5.06	0.238	5.07	1.34%	0.06%
3	7.60	0.544	7.57	0.535	7.56	0.53%	0.16%
4	10.00	0.963	10.06	0.970	10.07	0.70%	0.10%
5	15.00	1.68	14.97	1.66	15.02	0.13%	0.33%

Se observa que el error relativo disminuye conforme aumenta la frecuencia de la señal; sin embargo, se mantiene en un porcentaje bajo.

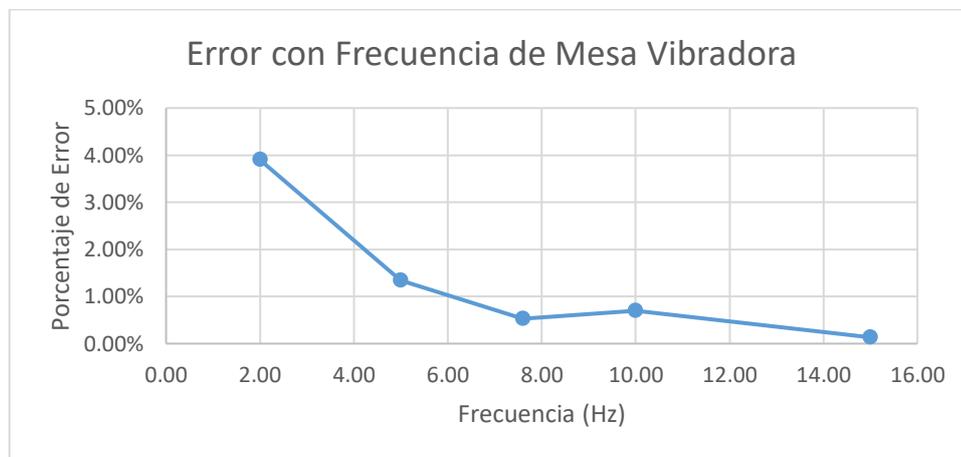


Figura N° 27. Gráfica de error vs frecuencia.

Fuente: Elaboración Propia

Si se comparan las señales de los acelerómetros ya calibrados del instituto CISMID y de los acelerómetros a usar en el rugosímetro (MPU6050) se observa que son muy similares, como se aprecia en la Figura N° 28 y la Figura N° 29, donde se comparan las señales propias y su espectro de frecuencias. Mayores resultados de esta calibración son adjuntadas en el Anexo 3.

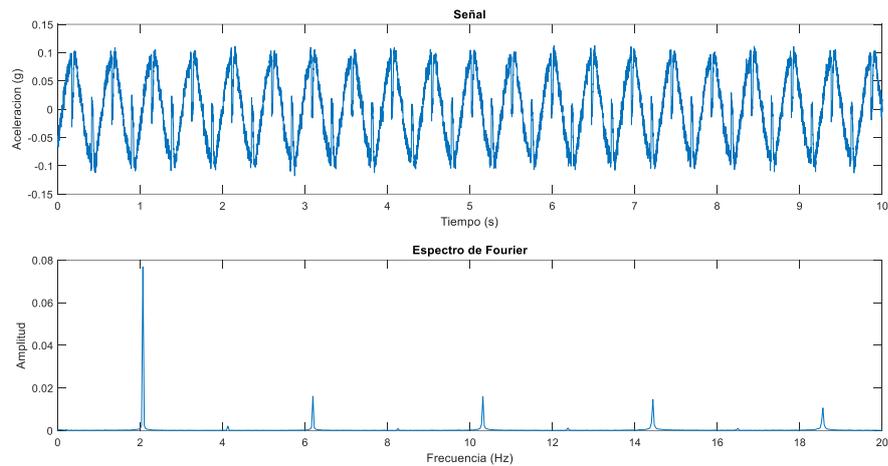


Figura N° 28. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.

Fuente: Elaboración Propia

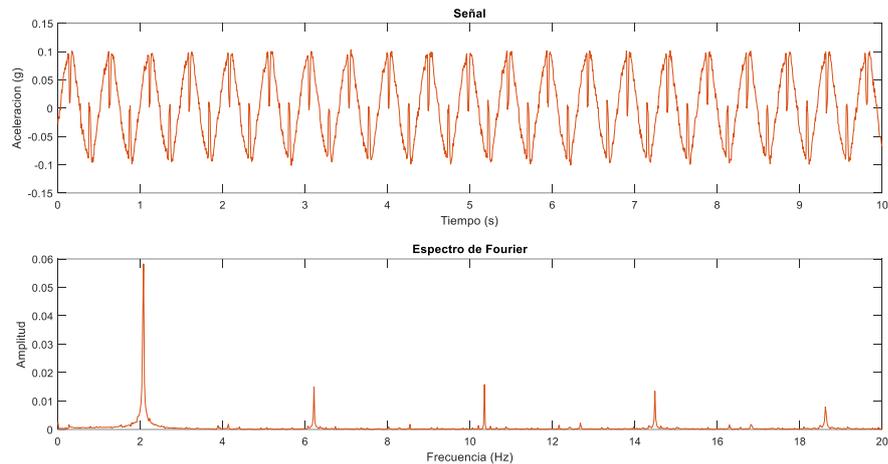


Figura N° 29. Señal de Acelerómetro MPU6050.

Fuente: Elaboración Propia

4.2. Diseño del software

La estructura del software usado en la presente tesis se divide básicamente en dos partes. La primera está enfocada a la placa Arduino, la cual tiene como único objetivo la recolección de la data. Así, el programa subido a la placa está diseñado para que registre la información de los dos sensores acelerómetros y del GPS y, finalmente, los guarde en un archivo alojado en la tarjeta micro SD.

La segunda parte del software está enfocada en el procesamiento de los datos registrados por el rugosímetro. Es esta la que calcula el IRI de la vía.

4.2.1. Descripción del algoritmo

Como todo programa de Arduino, está compuesto de dos bloques principalmente. El primero, denominado “Setup”, se ejecuta una sola vez, y es aquí donde se inicializan los sensores acelerómetros y el GPS. El acelerómetro ubicado en la masa no suspendida del auto (eje del neumático) está configurado a un rango de “8g” debido a las altas vibraciones que se generan por su recorrido por una vía. El acelerómetro ubicado en la masa suspendida (eje de la suspensión) está configurado a un rango de “2g” debido a la atenuación de las vibraciones generadas en el auto.

Luego de la configuración inicial, se crea un archivo en la tarjeta microSD donde se guardarán los datos de los sensores. Este archivo tiene de encabezado la fecha y hora a la que se empiezan a tomar los datos, además de información relevante como el rango de los sensores. También cuenta con un encabezado para la identificación del eje en el que se toma la aceleración. Antes de finalizar el bloque “Setup”, se espera a que el módulo GPS capte la señal de al menos 5 satélites. Esto con el propósito de conseguir una buena resolución en la obtención de la latitud y longitud.

Una vez captada la señal en el GPS, el algoritmo pasa al bloque “Loop” de Arduino, el cual se repite indefinidamente siempre que la placa se encuentre alimentada. Dentro de este bloque se toman los registros de los sensores acelerómetros y GPS y se guardan en el archivo previamente creado. La diferencia en la frecuencia de muestreo de estos dos sensores ocasiona que se tenga un dato del GPS por cada 200 datos de aceleración aproximadamente. Cuando el número de datos supere el valor de 500,000, se procede a crear un nuevo archivo y se siguen registrando los datos de los sensores.

Un ejemplo del archivo generado se observa en la Figura N° 30.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	LAT	LON	ALT	FECHA Y HORA GMT									
2	-11.929417	-77.059869	151.5	12	28	2019	09:19:0						
3	tiempo:	AX	AY	AZ	GX	GY	GZ	MX	MY	MZ	LAT	LON	ALTURA
22	26	-17	-3931	170	-337	99	137	-3329	14592	-8193			
23	25	-16	-3929	177	-348	100	133	-3329	14080	-7425			
24	26	-33	-3922	202	-353	97	121	-3329	14080	-7169			
25	25	-33	-3948	174	-352	116	114	-3585	14592	-7425	-11.929418	-77.059869	151.5

Figura N° 30. Ejemplo de archivo generado por el rugosímetro.

Fuente: Elaboración Propia.

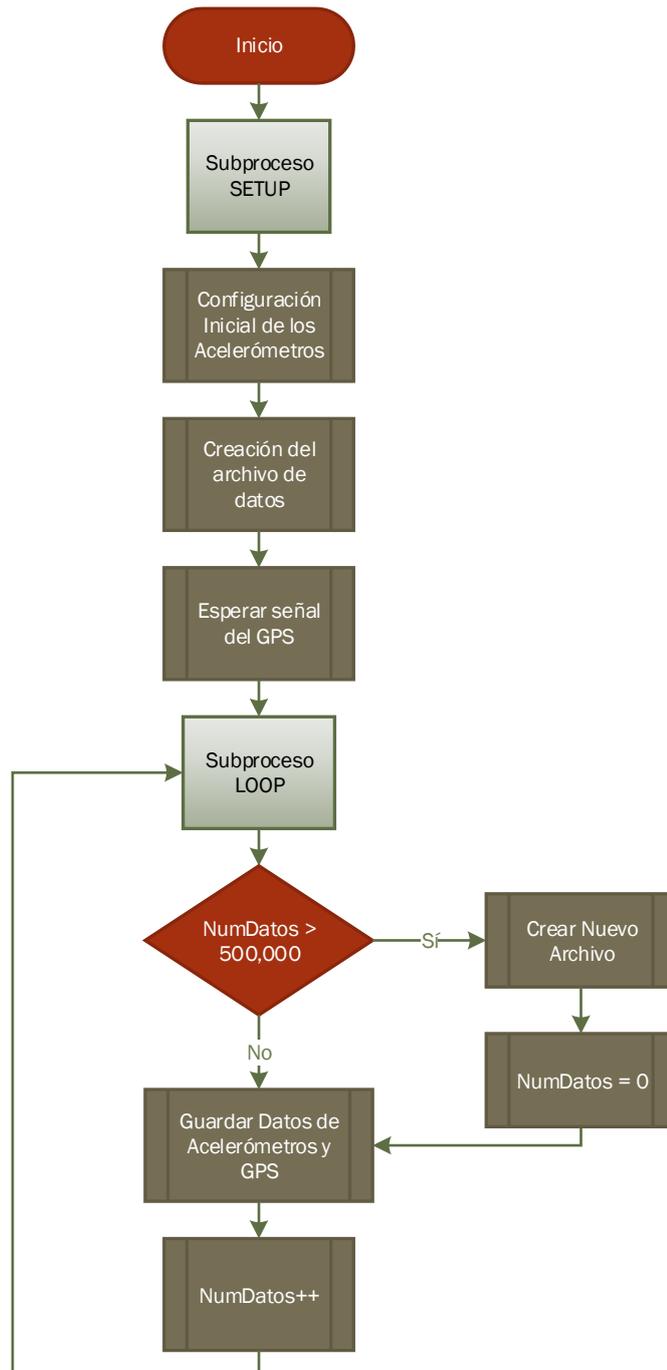


Figura N° 31. Flujograma de toma de datos del rugosímetro.

Fuente: Elaboración Propia

Ya tomados los datos con el rugosímetro, se procede al procesamiento de estos leyéndolos directamente de la tarjeta microSD. El algoritmo encargado del procesamiento de los datos se resume en el siguiente flujograma:

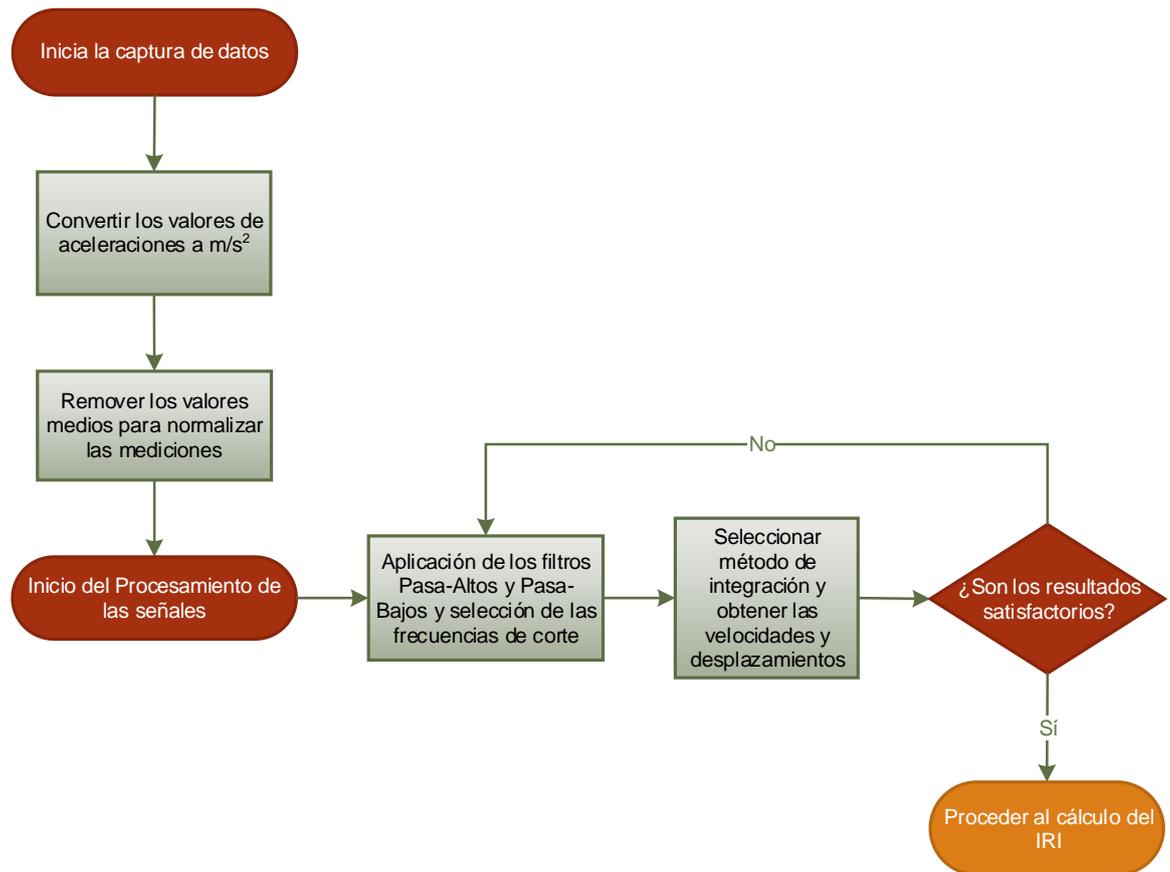


Figura N° 32. Flujograma de procesamiento de datos.

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2. Visualización de los resultados

Gracias a la integración del GPS, los resultados obtenidos por el procesamiento de los datos están georreferenciados. Esto permite una visualización espacial de los datos en cualquier entorno GIS (siglas de Sistemas de Información Geográfica en inglés).

Como ejemplo, en la Figura N° 33 se observan los resultados de rugosidad en un recorrido por la ciudad de Casma, en Perú, haciendo uso de la plataforma de Google Earth. De esta forma, se puede indicar un código de colores que identifique rápidamente los tramos de las vías en mal estado o los que se encuentren empezando a deteriorarse, pudiendo cubrirse con una primera capa de análisis para la propuesta de un plan de gestión vial.



Figura N° 33. Visualización espacial de resultados.

Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo V. Aplicación y validación del rugosímetro

En este capítulo se presenta la validación del equipo desarrollado en Arduino. Para tal fin, se comparan los resultados del rugosímetro propuesto con los valores dados por equipos de Clase 1 y de Clase 2, como el Perfilómetro láser y el equipo Merlín.

Se consideran escenarios de pavimentos en buen estado ($IRI < 2$), pavimentos con algunas imperfecciones superficiales ($IRI < 4$) y pavimentos deteriorados ($IRI > 5$). Los tramos escogidos se resumen en la siguiente tabla:

Escenario	Tramo Escogido
Pavimento en Buen Estado	Red Vial N°4, Red Vial N°6
Pavimento con Imperfecciones Superficiales	Vía Expresa Línea Amarilla
Pavimentos Deteriorados	Pavimento de la Universidad Nacional de Ingeniería

5.1. Escenario 1 – pavimento en buen estado

En el año 2017, Airbus y el Banco Mundial proponen instrumentar buses con una antena satelital, la cual pueda proveer de internet de banda ancha a los usuarios dentro del vehículo durante su viaje al interior del país. En el planteamiento, se decide implementar buses con otros tipos de sensores de modo que estos puedan recopilar distinta información de las carreteras y/o ambientes por las cuales recorren en la realización de sus rutas de viaje.

Bajo este contexto, Perú fue seleccionado como el país donde se desarrollaría este proyecto. Es por ello que Airbus, como coordinadores de proyecto, contactan con diversas instituciones públicas y privadas para el desarrollo del mismo. Una de estas empresas es Tepsa, la cual fue contactada para que provea los buses que serían instrumentados.

Como primer paso, se implementó en un bus de Tepsa un prototipo de acelerómetros para la medición de IRI. Se llegaron a instalar dos equipos rugosímetros basados en Arduino propuestos en esta investigación. Cada placa Arduino está conectada con 2 sensores acelerómetros. Estos sensores fueron ubicados en el eje delantero y en el eje trasero del bus, en la llanta de la izquierda,

cómo se indica en la Figura N° 34. En un mismo eje, un sensor fue ubicado a la altura de la suspensión y otro sensor fue ubicado a la altura del eje del neumático.

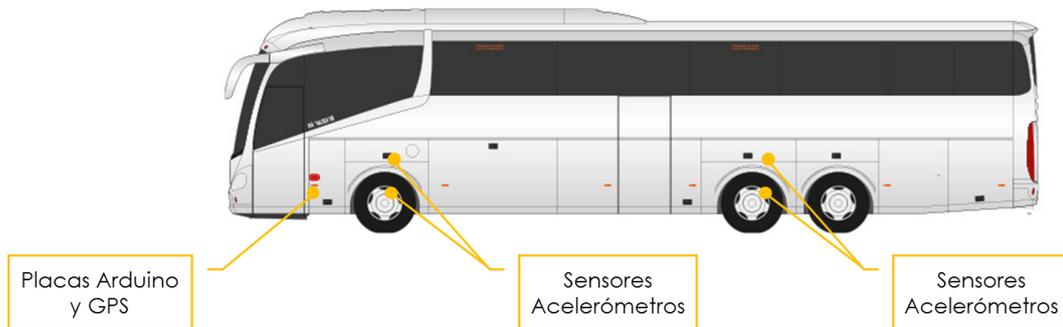


Figura N° 34. Esquema de ubicación de sensores en el bus de Tepsa.

Fuente: Elaboración Propia.

La ubicación de los sensores acelerómetros se realizó de esta manera con el fin de replicar el modelo del cuarto de carro.

De los recorridos realizados por el bus, se seleccionaron dos tramos considerados dentro de los criterios de pavimento en buen estado (según la Figura N° 2, se puede considerar un IRI menor a 2). El primer tramo se encuentra dentro de la Red Vial N°4, la cual forma parte de la carretera Panamericana Norte, y conecta las ciudades de Pativilca, Casma, Chimbote, hasta llegar a Trujillo.

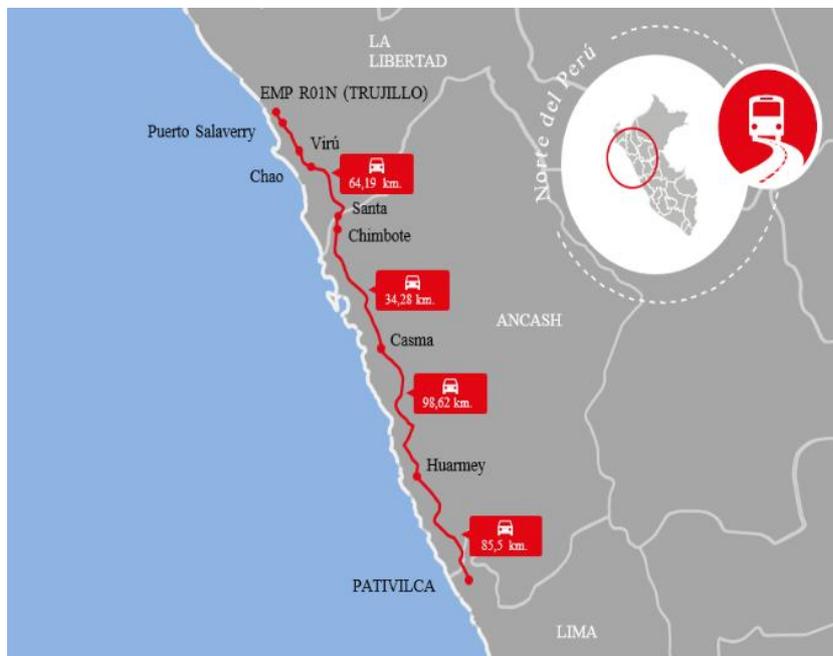


Figura N° 35. Mapa de la Red Vial N° 4.

Fuente: Memoria Institucional de OSITRAN 2016.

El tramo seleccionado va desde la progresiva 453+800 hasta la progresiva 483+000 de esta Red Vial. Los datos de IRI de este tramo fueron medidos por Perfilómetro Láser, arrojando un valor de 0.99 en su carril 4.

El segundo tramo se encuentra dentro de la Red Vial N°6, la cual forma parte de la Panamericana Sur y cruza las provincias de Cañete, Chincha, Pisco e Ica. El tramo seleccionado va desde la progresiva 58+000 hasta la progresiva 122+800 de esta Red Vial. También se midieron los datos de rugosidad con un equipo Perfilómetro Láser, obteniéndose valores de IRI menores a 2.



Figura N° 36. Mapa de la Red Vial N°6.

Fuente: Memoria Institucional de Ositrán 2016.

Gracias a que el equipo propuesto cuenta con un GPS, se pueden extraer los valores obtenidos por los acelerómetros cuando el bus pasó por estos tramos de las redes viales. Se realizó la limpieza de los datos haciendo uso de los filtros digitales así como la aplicación del modelo de cuarto de carro para la obtención de valores de IRI.

Los valores obtenidos de IRI con el equipo propuesto en esta investigación se comparan con los obtenidos con el Perfilómetro en la siguiente tabla:

Tabla 4. Resultados de IRI medido en tramos de Redes Viales.

Fuente: Elaboración Propia.

Recorrido	Carril	Long.	Fecha	IRI (Clase 1)	IRI (Sensores + Arduino)	Error Rel. (%)
Red Vial N°6	1	65 Km	15/11/2018	1.31	1.28	2.3%
Red Vial N°6	1	65 Km	19/11/2018	1.31	1.35	3.3%
Red Vial N°6	1	65 Km	23/11/2018	1.31	1.30	0.6%
Red Vial N°6	2	65 Km	17/11/2018	1.17	1.18	0.4%
Red Vial N°4	4	29 Km	23/11/2018	0.99	0.98	1.0%

5.2. Escenario 2 – pavimento con imperfecciones superficiales

Para el segundo escenario a evaluar, se escogieron tramos de la vía expresa denominada Línea Amarilla, la cual se ubica en el departamento de Lima, en la ciudad del mismo nombre. Se encuentra aledaña al río Rímac y cuenta con varios viaductos y un túnel que pasa debajo del río, de una extensión aproximada de 2 Km.

El recorrido se realizó con el uso de un auto particular y se hizo a lo largo de la mayor parte de la vía. La instalación del equipo Rugosímetro propuesto se hizo tal cual se muestra en la Figura N° 37, donde se colocaron dos sensores en las posiciones mostradas.

La medición se hizo en los carriles ubicados en los extremos de las calzadas izquierda y derecha. Las mediciones realizadas con el equipo de perfilómetro láser (de Clase I), antes de ingresar al túnel, como se observa en la Figura N° 38, se presentan en la Tabla 5. También se agregan los valores obtenidos por el rugosímetro propuesto en la presente investigación.

Tabla 5. Resultados de IRI medido en tramos de Línea Amarilla.

Fuente: Elaboración Propia.

Recorrido	Carril	Long.	Fecha	IRI (Clase 1)	IRI (Sensores + Arduino)	Error Rel. (%)
Línea Amarilla	I	1.6 Km	17/01/2019	1.62	1.70	4.93%
Línea Amarilla	D	1.6 Km	17/01/2019	1.64	1.72	4.87%

También se realizaron mediciones de IRI dentro de los túneles de Línea Amarilla. Es en este pavimento donde se encontró un mayor nivel de IRI. Se debe mencionar, además, que en este tramo el GPS no brinda valores muy certeros de ubicación, debido a la imposibilidad de señal satelital, por lo que se trabajó la posición con la distancia del vehículo, la cual se mantuvo constante y cercana a los 50 KPH.

Los valores de IRI obtenidos dentro del túnel tanto con el equipo Perfilómetro Láser como con el Rugosímetro propuesto se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 6. Resultados de IRI medido en tramos de Línea Amarilla.

Fuente: Elaboración Propia.

Recorrido	Carril	Long.	Fecha	IRI (Clase 1)	IRI (Sensores + Arduino)	Error Rel. (%)
Línea Amarilla (Túnel)	I	1.8 Km	17/01/2019	3.02	3.31	9.6%
Línea Amarilla (Túnel)	D	1.8 Km	17/01/2019	3.14	2.93	6.7%

El error relativo obtenido en el tramo fuera del túnel se mantiene menor al 5%, sin embargo, el error calculado dentro del túnel supera este valor pero se mantiene menor al 10%.

5.3. Escenario 3 – pavimentos deteriorados

Para el tercer escenario, se escogió un pavimento con un daño que sea visible y que pudiese tener un IRI mayor a 5. Es así que se selecciona un tramo de 400 metros de pavimento de la Universidad Nacional de Ingeniería, el cual presentaba zonas con baches sin reparar.



Figura N° 39. Tramo de prueba en la Universidad Nacional de Ingeniería.

Fuente: Google Earth.

La limitación del tramo a 400 metros se hizo para garantizar la eficiencia en la recolección de datos y optimizar los equipos que se tuvieron disponibles. La longitud del tramo seleccionado permite obtener mediciones detalladas y significativas del IRI utilizando el nivel topográfico y el equipo Merlín, lo que facilita la comparación con los datos recopilados por el rugosímetro electrónico basado en Arduino.

También, al reducir la variabilidad en las condiciones del pavimento, como la presencia de diferentes tipos de deterioro, se puede controlar mejor el proceso de validación y obtener resultados más precisos y confiables. Esto permite identificar de manera más clara cualquier discrepancia entre las mediciones del rugosímetro

electrónico y los valores de referencia del IRI, lo que contribuye a una evaluación más rigurosa del desempeño del dispositivo.

En este tramo se calculó el IRI inicialmente haciendo uso de un nivel topográfico, el cual es un método clásico y muy preciso; sin embargo, una de sus principales desventajas es la gran cantidad de tiempo que toma dependiendo de la precisión a la que se quiera llegar.

Para el presente caso, las mediciones se hicieron cada 30 cm (ver Anexo 1) y los resultados que se obtuvieron con el nivel topográfico se muestran en la Figura N° 40. Bajo este método se obtuvo un IRI de 9.52 m/Km.

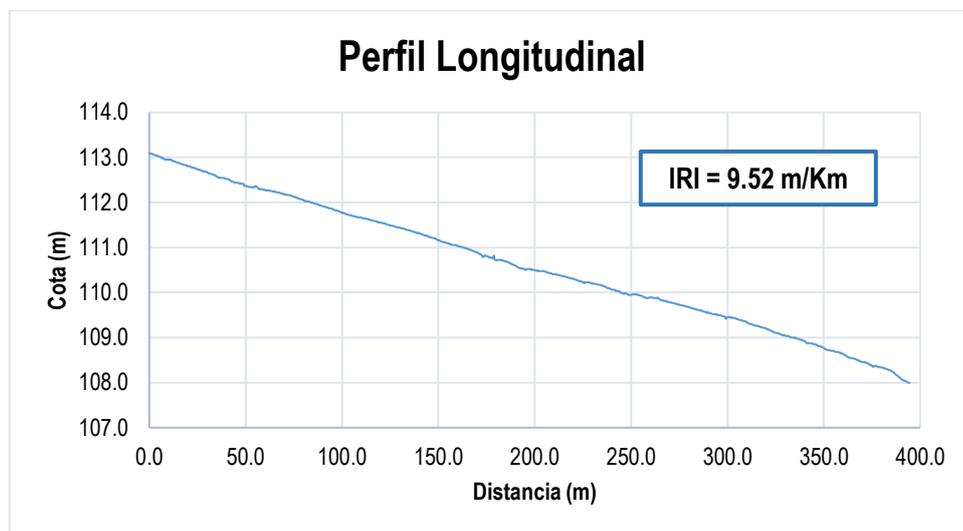


Figura N° 40. Perfil longitudinal obtenido con el nivel topográfico.

Fuente: Elaboración Propia.

5.3.1. Pruebas en auto

Al igual que en el Escenario N°2, se procedió a instalar el rugosímetro en un auto particular, ubicando un sensor acelerómetro en el eje de la suspensión y otro sensor en el eje de los neumáticos. Ya con los sensores dispuestos en la masa suspendida y no suspendida del auto, se procedió a realizar un total de 8 recorridos en el tramo de prueba. Se realizó la ejecución del algoritmo usando las ecuaciones del cuarto de carro para obtener valores de IRI. Los resultados se resumen en la Tabla 7, en donde se coloca además la velocidad promedio del recorrido y el error relativo en comparación al valor de IRI obtenido con el nivel topográfico (IRI 9.52 m/Km).

Tabla 7. Resultados de la prueba con el auto.

Fuente: Elaboración propia.

Recorrido	Velocidad (KPH)	IRI (mm/m)	IRI Nivel (mm/m)	% Error
1	14	8.58	9.52	9.9%
2	17	9.24	9.52	2.9%
3	15	9.50	9.52	0.2%
4	17	8.93	9.52	6.2%
5	17	9.30	9.52	2.4%
6	17	9.85	9.52	3.4%
7	15	9.51	9.52	0.1%
8	23	8.96	9.52	5.9%

Para hallar cuán preciso es el instrumento, se calcula el error relativo en porcentaje, el cual es el cociente del error absoluto con el valor exacto o de referencia. Para el presente estudio, se toma como valor exacto o de referencia al obtenido de mediciones con instrumentos de Clase 1.

$$\%Error = \frac{|Valor\ medido - Valor\ exacto|}{Valor\ exacto} \times 100\%$$

Se observa en la Tabla 7 que la correlación entre el valor medido y el valor de referencia es muy buena. Y es que el valor del IRI no va a ser el mismo en cada medida debido a que el auto no necesariamente pasa por la misma huella en cada recorrido. En promedio, se tiene un error relativo de 3% con relación al valor medido con el nivel topográfico.

5.3.2. Pruebas en bicicleta

La facilidad de acceso a este tramo ubicado en la Universidad ayuda a que, además, se puedan realizar pruebas con el rugosímetro instalado en bicicletas. Los acelerómetros se ubicaron en el eje de las llantas y se instalaron de forma similar al auto, con uno de sus ejes alineado de forma perpendicular con la superficie. Se hicieron 10 recorridos.



Figura N° 41. Ubicación de acelerómetros en la bicicleta.

Fuente: Elaboración Propia.

Para el cálculo del perfil inercial de la vía a lo largo del recorrido se hizo uso del modelo físico mostrado en la Figura N° 42.

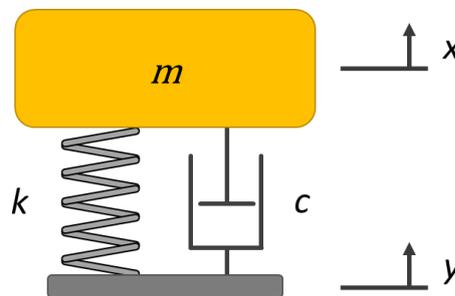


Figura N° 42. Modelo usado para el cálculo del IRI con bicicleta.

Fuente: Elaboración Propia.

Donde la masa está conformada por la llanta, un porcentaje de la masa de la bicicleta y un porcentaje de la masa del ciclista. La ecuación constituyente del modelo viene dada por la siguiente expresión: $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ky$. Los valores normalizados de los parámetros usados para el cálculo del IRI se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores usados para el cálculo del IRI.

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor
C/M	1.00
K/M	200.00

Los resultados se resumen en la siguiente tabla, en donde se coloca además el error relativo en comparación al valor de IRI obtenido con el nivel topográfico.

Tabla 9. Resultados de la prueba con la bicicleta.

Fuente: Elaboración propia.

Recorrido	IRI (mm/m)	IRI Refer. (mm/m)	% Error
1	9.23	9.52	3.0%
2	9.59	9.52	0.7%
3	9.60	9.52	0.8%
4	8.97	9.52	5.8%
5	9.21	9.52	3.3%
6	9.58	9.52	0.6%
7	9.90	9.52	4.0%
8	9.69	9.52	1.8%

Se observa una buena correlación con el IRI medido con instrumentos de Clase 1. Se logra un error promedio de 2% en las medidas con respecto a las realizadas con el nivel topográfico.

5.4. Validación del rugosímetro

Como se mencionó, se han recopilado datos de rugosidad en pavimentos en buen estado, en pavimentos con irregularidades superficiales y en pavimentos en mal estado. En todos los casos, se obtuvieron datos de instrumentos de Clase I, como el perfilómetro láser y el nivel topográfico, y también del rugosímetro propuesto en esta investigación.

Una vez hecha las mediciones, es posible elaborar una tabla general que sintetice los datos recopilados en los tres escenarios propuestos. Esto con el objetivo de evaluar el nivel de correlación que existe entre los instrumentos de Clase I y el equipo elaborado con Arduino.

Tabla 10. Resumen de valores obtenidos de IRI.

Fuente: Elaboración Propia.

Escenario	IRI (Clase I)	IRI (Equipo Propuesto)
Escenario 01	1.31	1.28
Escenario 01	1.31	1.35
Escenario 01	1.31	1.30
Escenario 01	1.17	1.18
Escenario 01	0.99	0.98
Escenario 01	1.62	1.70
Escenario 01	1.64	1.72
Escenario 02	3.02	3.31
Escenario 02	3.14	2.93
Escenario 03	9.52	8.58
Escenario 03	9.52	9.24
Escenario 03	9.52	9.50
Escenario 03	9.52	8.93
Escenario 03	9.52	9.30
Escenario 03	9.52	9.85
Escenario 03	9.52	9.51
Escenario 03	9.52	8.96

Para evaluar el grado de asociación entre estas dos variables, se calculará el coeficiente de correlación de Pearson, ya que ambas variables son cuantitativas continuas y hay independencia entre cada tramo medido.

El coeficiente de correlación de Pearson para dos variables “X” y “Y” se calcula según la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Se interpreta que un valor de “r” positivo indica una correlación lineal directa mientras que un valor negativo indica una correlación lineal inversa. Asimismo, un valor de 0 indica que no existe correlación lineal.

Aplicando la fórmula para los valores mostrados en la Tabla 10, se obtiene un coeficiente de correlación de 99.73%, lo cual implica una correlación casi perfecta entre las variables de IRI medido con instrumentos de Clase I y el IRI medido con el instrumento propuesto en esta investigación.

Conclusiones

- La presente investigación reprodujo un rugosímetro compuesto por dos sensores acelerómetros y un módulo de GPS usando hardware y software del entorno Arduino. Se realizaron mediciones instalando este rugosímetro en un auto, una bicicleta y un bus de transporte provincial de personas, siendo una de las principales conclusiones que, gracias a este equipo, se puede obtener el valor del índice de rugosidad internacional (IRI) con una precisión menor al 5% (al promediar los errores se tiene un valor de 3.8%) y a un costo mucho menor comparado con los equipos que se cuentan actualmente para realizar dicha medición.
- Con el rugosímetro instalado en el auto, en el Escenario 3 se llegó a un error promedio del 3% en las mediciones de IRI cuando se comparan los resultados con los obtenidos con un instrumento de Clase I (Nivel topográfico). Cuando se realizan mediciones de validación en los tramos de Línea Amarilla, se llega a un error menor del 5% cuando se comparan los resultados con los obtenidos también por un instrumento de Clase I (Perfilómetro Láser). En ambos casos, el error es menor al 5%, lo que según la norma ASTM E1364, clasifica al rugosímetro propuesto dentro de la Clase 2.
- En las mediciones hechas con el rugosímetro propuesto en una bicicleta, se llega a un error promedio del 2%, cuando se comparan los valores obtenidos con los de un instrumento de Clase I (Nivel topográfico). Sin embargo, es necesario notar que una de las principales desventajas de este vehículo es la dependencia en la habilidad del ciclista, pues dependiendo de la destreza, la bicicleta puede tener pequeñas oscilaciones respecto a su eje vertical que pueden alterar las mediciones. No obstante, resulta un sistema muy económico para la medición de rugosidad.
- La experiencia instalando el rugosímetro en un bus de transporte provincial de personas arrojó como resultados un error promedio de menos del 2% comparado con las mediciones hechas con un instrumento de Clase I (Perfilómetro Láser). En este caso, según la norma ASTM E1364, al ser el error promedio menor al 2% clasifica al rugosímetro propuesto dentro de la Clase I. Es preciso notar que es en este vehículo donde se hicieron las mediciones en mayores longitudes de carreteras, llegándose a cubrir

cientos de kilómetros. Esto fue una prueba para el rugosímetro propuesto que demuestra que puede trabajar con varias horas de funcionamiento continuo sin mayores problemas.

- La plataforma Arduino ha demostrado una gran efectividad para la realización de dispositivos de medición en proyectos de ingeniería. Una muestra de ello es el rugosímetro elaborado en la presente tesis, el cual no requirió mayor inversión y, al ser un dispositivo propio, se puede modificar de acuerdo a los requerimientos de los diferentes proyectos en los que se use. Esto sería muy complicado de hacer, sino imposible, con un equipo que se compra ya elaborado, el cual tiene su estructura interna ya cerrada y de difícil acceso.

Recomendaciones

- El cálculo del IRI, realizado con los diferentes tipos de vehículos ya previamente mencionados, se hizo tomando en cuenta los denominados “eventos”. Se denomina eventos a las gibas, rejillas, juntas, entre otros, que se encuentran en el pavimento. En un rugosímetro del tipo respuesta dinámica como el propuesto, estos eventos crean interferencias grandes en las mediciones, lo que puede alterar el valor final del IRI calculado. Para una mayor precisión de la rugosidad, estos eventos no deben ser tomados en el cálculo final, por lo que es recomendable en futuras investigaciones la identificación automatizada de estos eventos, labor que es posible con las propias señales de los acelerómetros o incluso con ayuda de imágenes de video y el posterior procesamiento de estas.
- El sistema propuesto en esta investigación consta de dos sensores acelerómetros y un módulo GPS. Los datos recolectados por estos sensores son almacenados en una tarjeta microSD para su posterior procesamiento y obtención de la rugosidad en la carretera. Sin embargo, existen en el mercado módulos WIFI o módulos de la red móvil 3G que permitirían la transferencia de los datos en tiempo real, permitiendo una obtención de la rugosidad de forma casi instantánea. Este tipo de sistema embebido entraría en lo que actualmente se denomina “Internet de las cosas” o IOT por sus siglas en inglés. La presente tesis no ahonda en esta corriente pues escapa de sus objetivos, sin embargo se recomienda la exploración de esta tendencia tecnológica por las grandes ventajas que ello conllevaría.
- En esta tesis, las señales de los sensores acelerómetros fueron analizadas en un rango de frecuencias de hasta 30 Hz, atenuando las altas frecuencias, usando los filtros ya descritos, con el fin de disminuir la influencia del ruido en los cálculos de rugosidad. Sin embargo, estas frecuencias elevadas pueden utilizarse para obtener información de las vibraciones propias que sufre el vehículo y sus demás partes. Así, se pueden observar las frecuencias a las que vibra el motor para un mantenimiento preventivo de este por ejemplo.

Referencias bibliográficas

- American Society for Testing and Materials E1364-95. (2017). *Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International.
- American Society for Testing and Materials International. (2017). *Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International.
- American Society for Testing and Materials Standard E 1448-92. (2004). *Standard Practice for Calibration of Systems Used for Measuring Vehicular Response to Pavement Roughness*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International.
- American Society for Testing and Materials Standard E1170-97. (2001). *Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International.
- Badilla Vargas, G. (2009, 1 de febrero). *Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)*. Universidad de Costa Rica: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/autores/badilla/2009-badilla-07.PDF>
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2006). *Manual Técnico de Mantenimiento Rutinario para la Red Vial Departamental No Pavimentada*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Doebelin, E. (2004). *Measurement Systems: Application and Design* (4ta ed.). McGraw-Hill.
- Dyer, S. A. (2001). *Survey of Instrumentation and Measurement*. John Wiley & Sons.
- MathWorks. (2019, 1 de marzo). *Filtro Paso Alto*. Mathworks. <https://uk.mathworks.com/discovery/filtro-paso-alto.html>
- Melis, M. J. (1993). El IRI, el HRI o IRI-Medio Coche y los Modelos de Cuarto y de Medio Coche. *Revista de Obras Públicas*, 49-65.

- Ministerio de Economía y Finanzas. (2008). *Presupuesto Público Evaluado: Conservación o Mantenimiento de Carreteras*. Ministerio de Economía y Finanzas.
- Provías Nacional. (2017). *Memoria Anual*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ramirez Castro, B. (2017). *Cálculo del IRI mediante Acelerómetro de Smartphone en el Tramo Huarmey – Casma de la Carretera Panamericana Norte* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio de tesis PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9714>
- Sayers, M. W. (1990). On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile. *Transportation Research Record*, (1501), 1-12. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1501/1501-001.pdf>
- Sayers, M. W., & Karamihas, S. M. (1998). *The Little Book of Profiling*. University of Michigan, Ann Arbor, Transportation Research Institute. <https://hdl.handle.net/2027.42/21605>
- Tomiyama, K., Kawamura, A., Nakajima, S., Ishida, T., & Jomoto, M. (2012). A Mobile Profilometer for Road Surface Monitoring by Use of Accelerometers. *7th Symposium on Pavement Surface Characteristics: SURF 2012*, 1-10.
- Tomiyama, K., Kawamura, A., Ohiro, T., & Tozuka, S. (2014). Estimation of a Longitudinal True Profile for Expressway Pavements by a Mobile Profiling System. *International Conference on Asphalt Pavements*, 1, 471-479. Carolina del Norte: Taylor & Francis Group.
- Wilmshurst, T. (2010). *Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers*. Elsevier Ltd.
- Zhang, Z., Zhang, H., Xu, S., & Lv, W. (2021). Pavement roughness evaluation method based on the theoretical relationship between acceleration measured by smartphone and IRI. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(9), 3082-3098. doi.org/10.1080/10298436.2021.1881783

Anexos

Anexo 1	71
Anexo 2	75
Anexo 3	76

Anexo 1

Dist. (m)	Cota (m)										
0.00	113.095	17.10	112.850	34.20	112.601	51.30	112.353	68.40	112.205	85.50	111.981
0.30	113.089	17.40	112.843	34.50	112.595	51.60	112.349	68.70	112.204	85.80	111.976
0.60	113.084	17.70	112.842	34.80	112.583	51.90	112.348	69.00	112.199	86.10	111.971
0.90	113.087	18.00	112.837	35.10	112.579	52.20	112.348	69.30	112.195	86.40	111.969
1.20	113.084	18.30	112.833	35.40	112.565	52.50	112.347	69.60	112.193	86.70	111.966
1.50	113.081	18.60	112.830	35.70	112.557	52.80	112.346	69.90	112.190	87.00	111.965
1.80	113.072	18.90	112.826	36.00	112.557	53.10	112.345	70.20	112.184	87.30	111.961
2.10	113.064	19.20	112.823	36.30	112.555	53.40	112.340	70.50	112.179	87.60	111.954
2.40	113.057	19.50	112.827	36.60	112.550	53.70	112.337	70.80	112.179	87.90	111.948
2.70	113.056	19.80	112.807	36.90	112.548	54.00	112.334	71.10	112.174	88.20	111.946
3.00	113.057	20.10	112.803	37.20	112.547	54.30	112.344	71.40	112.167	88.50	111.942
3.30	113.050	20.40	112.800	37.50	112.546	54.60	112.341	71.70	112.166	88.80	111.935
3.60	113.046	20.70	112.802	37.80	112.546	54.90	112.345	72.00	112.165	89.10	111.930
3.90	113.043	21.00	112.805	38.10	112.545	55.20	112.369	72.30	112.164	89.40	111.926
4.20	113.038	21.30	112.790	38.40	112.543	55.50	112.350	72.60	112.161	89.70	111.923
4.50	113.030	21.60	112.784	38.70	112.543	55.80	112.344	72.90	112.162	90.00	111.917
4.80	113.028	21.90	112.786	39.00	112.543	56.10	112.332	73.20	112.158	90.30	111.913
5.10	113.023	22.20	112.783	39.30	112.536	56.40	112.318	73.50	112.153	90.60	111.912
5.40	113.016	22.50	112.778	39.60	112.528	56.70	112.309	73.80	112.151	90.90	111.909
5.70	113.010	22.80	112.773	39.90	112.524	57.00	112.302	74.10	112.140	91.20	111.906
6.00	113.005	23.10	112.771	40.20	112.522	57.30	112.304	74.40	112.136	91.50	111.893
6.30	112.999	23.40	112.766	40.50	112.520	57.60	112.298	74.70	112.134	91.80	111.893
6.60	112.992	23.70	112.761	40.80	112.518	57.90	112.297	75.00	112.131	92.10	111.893
6.90	112.988	24.00	112.752	41.10	112.512	58.20	112.301	75.30	112.126	92.40	111.890
7.20	112.975	24.30	112.752	41.40	112.508	58.50	112.299	75.60	112.123	92.70	111.885
7.50	112.971	24.60	112.744	41.70	112.499	58.80	112.290	75.90	112.114	93.00	111.879
7.80	112.963	24.90	112.739	42.00	112.489	59.10	112.289	76.20	112.111	93.30	111.875
8.10	112.961	25.20	112.737	42.30	112.481	59.40	112.289	76.50	112.107	93.60	111.874
8.40	112.958	25.50	112.728	42.60	112.474	59.70	112.289	76.80	112.101	93.90	111.871
8.70	112.953	25.80	112.726	42.90	112.465	60.00	112.277	77.10	112.094	94.20	111.869
9.00	112.951	26.10	112.723	43.20	112.463	60.30	112.274	77.40	112.091	94.50	111.865
9.30	112.950	26.40	112.719	43.50	112.457	60.60	112.267	77.70	112.086	94.80	111.863
9.60	112.953	26.70	112.717	43.80	112.452	60.90	112.271	78.00	112.082	95.10	111.855
9.90	112.953	27.00	112.714	44.10	112.445	61.20	112.274	78.30	112.073	95.40	111.844
10.20	112.950	27.30	112.709	44.40	112.440	61.50	112.274	78.60	112.068	95.70	111.840
10.50	112.950	27.60	112.699	44.70	112.439	61.80	112.269	78.90	112.067	96.00	111.835
10.80	112.953	27.90	112.694	45.00	112.440	62.10	112.263	79.20	112.064	96.30	111.833
11.10	112.949	28.20	112.689	45.30	112.439	62.40	112.262	79.50	112.057	96.60	111.829
11.40	112.946	28.50	112.689	45.60	112.437	62.70	112.264	79.80	112.059	96.90	111.822
11.70	112.937	28.80	112.685	45.90	112.434	63.00	112.264	80.10	112.045	97.20	111.821
12.00	112.933	29.10	112.682	46.20	112.435	63.30	112.256	80.40	112.039	97.50	111.819
12.30	112.926	29.40	112.680	46.50	112.432	63.60	112.251	80.70	112.030	97.80	111.809
12.60	112.920	29.70	112.675	46.80	112.428	63.90	112.251	81.00	112.029	98.10	111.801
12.90	112.915	30.00	112.669	47.10	112.420	64.20	112.248	81.30	112.032	98.40	111.799
13.20	112.909	30.30	112.659	47.40	112.422	64.50	112.243	81.60	112.026	98.70	111.798
13.50	112.903	30.60	112.653	47.70	112.418	64.80	112.244	81.90	112.023	99.00	111.794
13.80	112.898	30.90	112.646	48.00	112.414	65.10	112.239	82.20	112.023	99.30	111.789
14.10	112.893	31.20	112.643	48.30	112.413	65.40	112.236	82.50	112.022	99.60	111.781
14.40	112.893	31.50	112.640	48.60	112.411	65.70	112.236	82.80	112.016	99.90	111.774
14.70	112.888	31.80	112.639	48.90	112.411	66.00	112.230	83.10	112.014	100.20	111.769
15.00	112.883	32.10	112.635	49.20	112.373	66.30	112.229	83.40	112.014	100.50	111.774
15.30	112.881	32.40	112.630	49.50	112.368	66.60	112.229	83.70	112.008	100.80	111.769
15.60	112.873	32.70	112.625	49.80	112.367	66.90	112.222	84.00	112.005	101.10	111.761
15.90	112.867	33.00	112.619	50.10	112.365	67.20	112.217	84.30	111.999	101.40	111.753
16.20	112.863	33.30	112.612	50.40	112.365	67.50	112.213	84.60	111.996	101.70	111.744
16.50	112.858	33.60	112.611	50.70	112.358	67.80	112.211	84.90	111.994	102.00	111.739
16.80	112.854	33.90	112.606	51.00	112.353	68.10	112.207	85.20	111.987	102.30	111.739

Dist. (m)	Cota (m)										
102.60	111.739	119.70	111.554	136.80	111.350	153.90	111.108	171.00	110.866	188.10	110.633
102.90	111.733	120.00	111.551	137.10	111.350	154.20	111.101	171.30	110.860	188.40	110.629
103.20	111.731	120.30	111.554	137.40	111.346	154.50	111.099	171.60	110.856	188.70	110.623
103.50	111.727	120.60	111.550	137.70	111.343	154.80	111.094	171.90	110.851	189.00	110.614
103.80	111.722	120.90	111.544	138.00	111.340	155.10	111.088	172.20	110.840	189.30	110.610
104.10	111.716	121.20	111.544	138.30	111.337	155.40	111.084	172.50	110.831	189.60	110.604
104.40	111.715	121.50	111.542	138.60	111.333	155.70	111.087	172.80	110.812	189.90	110.601
104.70	111.713	121.80	111.537	138.90	111.326	156.00	111.075	173.10	110.792	190.20	110.594
105.00	111.706	122.10	111.530	139.20	111.321	156.30	111.070	173.40	110.780	190.50	110.584
105.30	111.700	122.40	111.526	139.50	111.322	156.60	111.064	173.70	110.822	190.80	110.576
105.60	111.696	122.70	111.524	139.80	111.320	156.90	111.063	174.00	110.823	191.10	110.566
105.90	111.693	123.00	111.520	140.10	111.313	157.20	111.058	174.30	110.821	191.40	110.556
106.20	111.694	123.30	111.514	140.40	111.312	157.50	111.057	174.60	110.819	191.70	110.550
106.50	111.696	123.60	111.510	140.70	111.303	157.80	111.056	174.90	110.810	192.00	110.548
106.80	111.689	123.90	111.504	141.00	111.301	158.10	111.056	175.20	110.804	192.30	110.545
107.10	111.687	124.20	111.503	141.30	111.293	158.40	111.053	175.50	110.799	192.60	110.542
107.40	111.685	124.50	111.499	141.60	111.291	158.70	111.053	175.80	110.801	192.90	110.536
107.70	111.681	124.80	111.496	141.90	111.289	159.00	111.053	176.10	110.792	193.20	110.535
108.00	111.671	125.10	111.491	142.20	111.282	159.30	111.050	176.40	110.779	193.50	110.534
108.30	111.668	125.40	111.487	142.50	111.279	159.60	111.043	176.70	110.778	193.80	110.532
108.60	111.666	125.70	111.483	142.80	111.272	159.90	111.037	177.00	110.784	194.10	110.528
108.90	111.676	126.00	111.480	143.10	111.264	160.20	111.034	177.30	110.777	194.40	110.520
109.20	111.674	126.30	111.478	143.40	111.266	160.50	111.029	177.60	110.777	194.70	110.515
109.50	111.669	126.60	111.479	143.70	111.261	160.80	111.026	177.90	110.773	195.00	110.510
109.80	111.667	126.90	111.475	144.00	111.263	161.10	111.023	178.20	110.762	195.30	110.501
110.10	111.662	127.20	111.471	144.30	111.252	161.40	111.021	178.50	110.753	195.60	110.506
110.40	111.659	127.50	111.465	144.60	111.248	161.70	111.021	178.80	110.822	195.90	110.523
110.70	111.652	127.80	111.459	144.90	111.242	162.00	111.013	179.10	110.741	196.20	110.526
111.00	111.647	128.10	111.455	145.20	111.230	162.30	111.006	179.40	110.731	196.50	110.527
111.30	111.643	128.40	111.454	145.50	111.233	162.60	111.004	179.70	110.722	196.80	110.528
111.60	111.643	128.70	111.451	145.80	111.218	162.90	111.002	180.00	110.717	197.10	110.523
111.90	111.641	129.00	111.449	146.10	111.218	163.20	110.994	180.30	110.718	197.40	110.519
112.20	111.642	129.30	111.443	146.40	111.217	163.50	110.992	180.60	110.722	197.70	110.522
112.50	111.640	129.60	111.442	146.70	111.219	163.80	110.991	180.90	110.720	198.00	110.509
112.80	111.636	129.90	111.442	147.00	111.215	164.10	110.984	181.20	110.724	198.30	110.503
113.10	111.633	130.20	111.439	147.30	111.210	164.40	110.981	181.50	110.731	198.60	110.515
113.40	111.631	130.50	111.438	147.60	111.209	164.70	110.982	181.80	110.728	198.90	110.508
113.70	111.629	130.80	111.432	147.90	111.205	165.00	110.977	182.10	110.722	199.20	110.505
114.00	111.625	131.10	111.428	148.20	111.200	165.30	110.973	182.40	110.719	199.50	110.500
114.30	111.619	131.40	111.424	148.50	111.196	165.60	110.966	182.70	110.725	199.80	110.497
114.60	111.616	131.70	111.423	148.80	111.191	165.90	110.958	183.00	110.721	200.10	110.497
114.90	111.609	132.00	111.419	149.10	111.183	166.20	110.954	183.30	110.715	200.40	110.488
115.20	111.609	132.30	111.414	149.40	111.173	166.50	110.951	183.60	110.709	200.70	110.488
115.50	111.602	132.60	111.407	149.70	111.167	166.80	110.950	183.90	110.707	201.00	110.487
115.80	111.601	132.90	111.404	150.00	111.162	167.10	110.942	184.20	110.704	201.30	110.483
116.10	111.596	133.20	111.404	150.30	111.158	167.40	110.935	184.50	110.702	201.60	110.484
116.40	111.590	133.50	111.395	150.60	111.151	167.70	110.929	184.80	110.693	201.90	110.483
116.70	111.590	133.80	111.391	150.90	111.147	168.00	110.924	185.10	110.688	202.20	110.480
117.00	111.589	134.10	111.390	151.20	111.139	168.30	110.921	185.40	110.688	202.50	110.478
117.30	111.586	134.40	111.391	151.50	111.132	168.60	110.910	185.70	110.679	202.80	110.477
117.60	111.585	134.70	111.385	151.80	111.127	168.90	110.903	186.00	110.673	203.10	110.476
117.90	111.578	135.00	111.384	152.10	111.125	169.20	110.903	186.30	110.665	203.40	110.474
118.20	111.575	135.30	111.379	152.40	111.123	169.50	110.899	186.60	110.663	203.70	110.475
118.50	111.570	135.60	111.375	152.70	111.120	169.80	110.894	186.90	110.655	204.00	110.473
118.80	111.563	135.90	111.367	153.00	111.116	170.10	110.890	187.20	110.650	204.30	110.473
119.10	111.558	136.20	111.365	153.30	111.112	170.40	110.881	187.50	110.643	204.60	110.474
119.40	111.559	136.50	111.356	153.60	111.112	170.70	110.873	187.80	110.639	204.90	110.469

Dist. (m)	Cota (m)										
205.20	110.469	222.30	110.270	239.40	110.075	256.50	109.903	273.60	109.746	290.70	109.547
205.50	110.463	222.60	110.267	239.70	110.068	256.80	109.896	273.90	109.743	291.00	109.544
205.80	110.461	222.90	110.262	240.00	110.061	257.10	109.894	274.20	109.740	291.30	109.538
206.10	110.457	223.20	110.257	240.30	110.063	257.40	109.892	274.50	109.736	291.60	109.531
206.40	110.452	223.50	110.251	240.60	110.065	257.70	109.884	274.80	109.732	291.90	109.528
206.70	110.446	223.80	110.248	240.90	110.061	258.00	109.879	275.10	109.728	292.20	109.523
207.00	110.443	224.10	110.244	241.20	110.059	258.30	109.880	275.40	109.726	292.50	109.520
207.30	110.440	224.40	110.239	241.50	110.051	258.60	109.880	275.70	109.722	292.80	109.518
207.60	110.435	224.70	110.234	241.80	110.051	258.90	109.886	276.00	109.721	293.10	109.521
207.90	110.433	225.00	110.227	242.10	110.042	259.20	109.887	276.30	109.717	293.40	109.521
208.20	110.429	225.30	110.220	242.40	110.034	259.50	109.890	276.60	109.713	293.70	109.518
208.50	110.427	225.60	110.212	242.70	110.039	259.80	109.892	276.90	109.710	294.00	109.514
208.80	110.421	225.90	110.206	243.00	110.036	260.10	109.894	277.20	109.706	294.30	109.512
209.10	110.411	226.20	110.226	243.30	110.033	260.40	109.893	277.50	109.705	294.60	109.515
209.40	110.401	226.50	110.233	243.60	110.030	260.70	109.891	277.80	109.701	294.90	109.512
209.70	110.405	226.80	110.232	243.90	110.024	261.00	109.890	278.10	109.697	295.20	109.493
210.00	110.406	227.10	110.233	244.20	110.011	261.30	109.884	278.40	109.693	295.50	109.492
210.30	110.404	227.40	110.231	244.50	109.998	261.60	109.882	278.70	109.689	295.80	109.497
210.60	110.401	227.70	110.229	244.80	109.995	261.90	109.878	279.00	109.685	296.10	109.497
210.90	110.401	228.00	110.226	245.10	109.993	262.20	109.876	279.30	109.684	296.40	109.492
211.20	110.399	228.30	110.218	245.40	109.987	262.50	109.871	279.60	109.680	296.70	109.488
211.50	110.396	228.60	110.217	245.70	109.981	262.80	109.869	279.90	109.676	297.00	109.487
211.80	110.393	228.90	110.215	246.00	109.978	263.10	109.878	280.20	109.674	297.30	109.482
212.10	110.390	229.20	110.212	246.30	109.974	263.40	109.883	280.50	109.673	297.60	109.477
212.40	110.385	229.50	110.209	246.60	109.984	263.70	109.882	280.80	109.661	297.90	109.478
212.70	110.383	229.80	110.195	246.90	109.987	264.00	109.874	281.10	109.659	298.20	109.473
213.00	110.379	230.10	110.204	247.20	109.976	264.30	109.869	281.40	109.654	298.50	109.467
213.30	110.377	230.40	110.200	247.50	109.975	264.60	109.866	281.70	109.649	298.80	109.452
213.60	110.374	230.70	110.197	247.80	109.971	264.90	109.853	282.00	109.646	299.10	109.446
213.90	110.370	231.00	110.194	248.10	109.968	265.20	109.835	282.30	109.644	299.40	109.410
214.20	110.369	231.30	110.191	248.40	109.959	265.50	109.830	282.60	109.639	299.70	109.448
214.50	110.365	231.60	110.189	248.70	109.951	265.80	109.828	282.90	109.635	300.00	109.453
214.80	110.362	231.90	110.184	249.00	109.944	266.10	109.826	283.20	109.634	300.30	109.455
215.10	110.361	232.20	110.181	249.30	109.946	266.40	109.823	283.50	109.629	300.60	109.457
215.40	110.357	232.50	110.179	249.60	109.949	266.70	109.820	283.80	109.628	300.90	109.454
215.70	110.354	232.80	110.177	249.90	109.948	267.00	109.818	284.10	109.624	301.20	109.449
216.00	110.350	233.10	110.174	250.20	109.953	267.30	109.812	284.40	109.620	301.50	109.445
216.30	110.347	233.40	110.171	250.50	109.954	267.60	109.814	284.70	109.619	301.80	109.440
216.60	110.343	233.70	110.169	250.80	109.958	267.90	109.810	285.00	109.616	302.10	109.446
216.90	110.339	234.00	110.167	251.10	109.956	268.20	109.805	285.30	109.614	302.40	109.446
217.20	110.335	234.30	110.167	251.40	109.962	268.50	109.802	285.60	109.608	302.70	109.439
217.50	110.332	234.60	110.155	251.70	109.964	268.80	109.800	285.90	109.605	303.00	109.437
217.80	110.329	234.90	110.155	252.00	109.960	269.10	109.795	286.20	109.602	303.30	109.437
218.10	110.326	235.20	110.149	252.30	109.962	269.40	109.792	286.50	109.598	303.60	109.432
218.40	110.322	235.50	110.145	252.60	109.960	269.70	109.788	286.80	109.595	303.90	109.429
218.70	110.318	235.80	110.141	252.90	109.964	270.00	109.783	287.10	109.591	304.20	109.425
219.00	110.315	236.10	110.137	253.20	109.955	270.30	109.780	287.40	109.584	304.50	109.419
219.30	110.308	236.40	110.131	253.50	109.949	270.60	109.778	287.70	109.579	304.80	109.416
219.60	110.307	236.70	110.125	253.80	109.945	270.90	109.775	288.00	109.577	305.10	109.408
219.90	110.303	237.00	110.120	254.10	109.942	271.20	109.770	288.30	109.572	305.40	109.405
220.20	110.301	237.30	110.111	254.40	109.937	271.50	109.770	288.60	109.568	305.70	109.399
220.50	110.297	237.60	110.104	254.70	109.937	271.80	109.766	288.90	109.564	306.00	109.397
220.80	110.292	237.90	110.095	255.00	109.933	272.10	109.764	289.20	109.559	306.30	109.393
221.10	110.287	238.20	110.094	255.30	109.930	272.40	109.760	289.50	109.538	306.60	109.389
221.40	110.284	238.50	110.094	255.60	109.923	272.70	109.758	289.80	109.555	306.90	109.387
221.70	110.279	238.80	110.089	255.90	109.920	273.00	109.754	290.10	109.555	307.20	109.388
222.00	110.275	239.10	110.085	256.20	109.912	273.30	109.749	290.40	109.552	307.50	109.381

Dist. (m)	Cota (m)										
307.80	109.374	324.90	109.111	342.00	108.882	359.10	108.649	376.20	108.371	393.30	108.011
308.10	109.370	325.20	109.107	342.30	108.873	359.40	108.642	376.50	108.375	393.60	108.007
308.40	109.369	325.50	109.101	342.60	108.872	359.70	108.640	376.80	108.368	393.90	107.999
308.70	109.368	325.80	109.099	342.90	108.876	360.00	108.636	377.10	108.369	394.20	107.996
309.00	109.367	326.10	109.094	343.20	108.874	360.30	108.627	377.40	108.365	394.50	108.000
309.30	109.360	326.40	109.093	343.50	108.869	360.60	108.620	377.70	108.356		
309.60	109.350	326.70	109.089	343.80	108.868	360.90	108.606	378.00	108.355		
309.90	109.344	327.00	109.083	344.10	108.867	361.20	108.596	378.30	108.351		
310.20	109.336	327.30	109.076	344.40	108.863	361.50	108.593	378.60	108.347		
310.50	109.328	327.60	109.072	344.70	108.856	361.80	108.585	378.90	108.343		
310.80	109.316	327.90	109.067	345.00	108.852	362.10	108.571	379.20	108.343		
311.10	109.310	328.20	109.062	345.30	108.847	362.40	108.569	379.50	108.343		
311.40	109.307	328.50	109.060	345.60	108.843	362.70	108.564	379.80	108.343		
311.70	109.307	328.80	109.050	345.90	108.845	363.00	108.556	380.10	108.339		
312.00	109.300	329.10	109.062	346.20	108.840	363.30	108.556	380.40	108.334		
312.30	109.297	329.40	109.060	346.50	108.832	363.60	108.554	380.70	108.325		
312.60	109.293	329.70	109.052	346.80	108.822	363.90	108.550	381.00	108.322		
312.90	109.288	330.00	109.047	347.10	108.815	364.20	108.549	381.30	108.315		
313.20	109.282	330.30	109.038	347.40	108.807	364.50	108.545	381.60	108.314		
313.50	109.283	330.60	109.040	347.70	108.806	364.80	108.541	381.90	108.311		
313.80	109.280	330.90	109.036	348.00	108.808	365.10	108.540	382.20	108.302		
314.10	109.272	331.20	109.032	348.30	108.806	365.40	108.537	382.50	108.301		
314.40	109.269	331.50	109.027	348.60	108.799	365.70	108.531	382.80	108.299		
314.70	109.263	331.80	109.027	348.90	108.796	366.00	108.529	383.10	108.295		
315.00	109.257	332.10	109.021	349.20	108.788	366.30	108.522	383.40	108.288		
315.30	109.258	332.40	109.014	349.50	108.780	366.60	108.516	383.70	108.281		
315.60	109.255	332.70	109.007	349.80	108.773	366.90	108.511	384.00	108.278		
315.90	109.256	333.00	109.003	350.10	108.762	367.20	108.504	384.30	108.274		
316.20	109.251	333.30	109.003	350.40	108.750	367.50	108.501	384.60	108.265		
316.50	109.247	333.60	109.006	350.70	108.745	367.80	108.499	384.90	108.259		
316.80	109.240	333.90	109.006	351.00	108.740	368.10	108.493	385.20	108.251		
317.10	109.234	334.20	109.002	351.30	108.731	368.40	108.486	385.50	108.245		
317.40	109.231	334.50	108.996	351.60	108.725	368.70	108.479	385.80	108.239		
317.70	109.226	334.80	108.994	351.90	108.725	369.00	108.470	386.10	108.234		
318.00	109.228	335.10	108.996	352.20	108.725	369.30	108.465	386.40	108.226		
318.30	109.223	335.40	108.988	352.50	108.720	369.60	108.457	386.70	108.215		
318.60	109.221	335.70	108.982	352.80	108.715	369.90	108.460	387.00	108.199		
318.90	109.218	336.00	108.978	353.10	108.712	370.20	108.454	387.30	108.189		
319.20	109.216	336.30	108.977	353.40	108.711	370.50	108.455	387.60	108.176		
319.50	109.215	336.60	108.980	353.70	108.709	370.80	108.455	387.90	108.164		
319.80	109.214	336.90	108.977	354.00	108.705	371.10	108.456	388.20	108.151		
320.10	109.200	337.20	108.966	354.30	108.705	371.40	108.451	388.50	108.139		
320.40	109.188	337.50	108.958	354.60	108.704	371.70	108.448	388.80	108.126		
320.70	109.180	337.80	108.952	354.90	108.700	372.00	108.446	389.10	108.115		
321.00	109.184	338.10	108.951	355.20	108.700	372.30	108.437	389.40	108.109		
321.30	109.179	338.40	108.948	355.50	108.696	372.60	108.433	389.70	108.101		
321.60	109.173	338.70	108.942	355.80	108.691	372.90	108.421	390.00	108.091		
321.90	109.167	339.00	108.937	356.10	108.685	373.20	108.410	390.30	108.083		
322.20	109.160	339.30	108.935	356.40	108.682	373.50	108.406	390.60	108.071		
322.50	109.153	339.60	108.931	356.70	108.684	373.80	108.403	390.90	108.062		
322.80	109.146	339.90	108.927	357.00	108.680	374.10	108.395	391.20	108.054		
323.10	109.138	340.20	108.915	357.30	108.678	374.40	108.388	391.50	108.048		
323.40	109.134	340.50	108.903	357.60	108.675	374.70	108.385	391.80	108.045		
323.70	109.129	340.80	108.892	357.90	108.672	375.00	108.375	392.10	108.041		
324.00	109.122	341.10	108.881	358.20	108.666	375.30	108.360	392.40	108.036		
324.30	109.116	341.40	108.867	358.50	108.658	375.60	108.347	392.70	108.030		
324.60	109.111	341.70	108.874	358.80	108.653	375.90	108.345	393.00	108.020		

Anexo 2

DETERMINACIÓN DE RUGOSIDAD POR EL MÉTODO MERLIN									
Proyecto : Tesis Javier Cornejo Tejada		Tramo : FIC - Capilla		Progresiva Inicial : 0+000			Ensayo N° : 01		
Capa : Carpeta Asfáltica		Carril : Derecha		Progresiva Final : 0+396			Fecha :		
Huella : Derecha		Longitud : 396 m							

LECTURAS CAMPO									
29	28	34	35	33	38	39	32	27	37
43	27	10	5	54	36	38	21	36	32
34	30	33	48	32	30	4	16	33	26
26	34	34	24	29	32	23	29	50	40
32	30	16	30	28	40	39	37	26	43
23	15	25	16	29	27	16	18	29	29
32	42	41	45	32	39	41	39	10	42
17	28	37	34	36	30	29	29	34	30
34	40	41	43	26	45	38	26	35	24
30	29	28	41	31	12	32	43	24	46
29	24	23	2	33	27	29	28	42	16
1	30	42	24	28	35	38	44	21	29
29	44	58	22	24	26	34	40	22	47
31	29	38	21	30	37	34	7	28	1
37	48	46	3	11	32	32	37	38	23
19	29	48	17	26	50	36	20	44	25
43	36	21	40	34	28	27	38	46	39
24	26	41	32	39	50	35	54	41	46
42	33	26	11	42	26	31	50	36	41
33	28	18	2	30	32	31	42	26	35

ESP. PASTILLA 6.01	LEC. INI. 37	LEC. FIN. 25
FACTOR DE CORRECCIÓN F.C. = 1.002		

CALCULO DE "D"	
$D = (CI + CE + CD) \times 5$	
DESCARTANDO 10 VALORES CADA COLA DEL HISTOGRAMA HISTOGRAMA: CI = COLA IZQUIERDA CE = CENTRO CD = COLA DERECHA	

CALCULO DE "R" (IR)	
$D > 40$	$D < 40$
$R = 0.593 + 0.0471 \times D$	$R = 0.0485 \times D$

	COLA IZQUIERDA (CI)	CENTRO (CE)	COLA DERECHA (CD)
TOTALES COLUMNAS EXTREMAS	0	-	4
LECTURAS CONSIDERADAS	0	-	2
FRACIONES RESULTANTES	0.000	35	0.500
SUMA FRACIONES (CI + CE + CD)	35.50		
D	177.80		
R	8.97		

COMENTARIOS	

FRECUECIAS	LECTURAS	
2	1	X X
2	2	X X
1	3	X
1	4	X
1	5	X
0	6	
1	7	X
0	8	
0	9	
2	10	X X
2	11	X X
1	12	X
0	13	
0	14	
1	15	X
5	16	X X X X X
2	17	X X
2	18	X X
1	19	X
1	20	X
4	21	X X X X
2	22	X X
4	23	X X X X
7	24	X X X X X X X
3	25	X X X
10	26	X X X X X X X X X X
5	27	X X X X X
9	28	X X X X X X X X X
15	29	X X X X X X X X X X X X X X X X
10	30	X X X X X X X X X X
4	31	X X X X
12	32	X X X X X X X X X X X X
6	33	X X X X X X
10	34	X X X X X X X X X X
5	35	X X X X X
6	36	X X X X X X
6	37	X X X X X X
7	38	X X X X X X X
6	39	X X X X X X
5	40	X X X X X
7	41	X X X X X X X
7	42	X X X X X X X
5	43	X X X X X
3	44	X X X
2	45	X X
4	46	X X X X
1	47	X
3	48	X X X
0	49	
4	50	X X X X

Anexo 3

Las siguientes gráficas corresponden a las mediciones comparativas hechas en el CISMID entre los acelerómetros industriales y los acelerómetros usados en la presente tesis.

A continuación se muestran las gráficas de las señales de los acelerómetros cuando la mesa de vibraciones se configuró para 2 Hz.

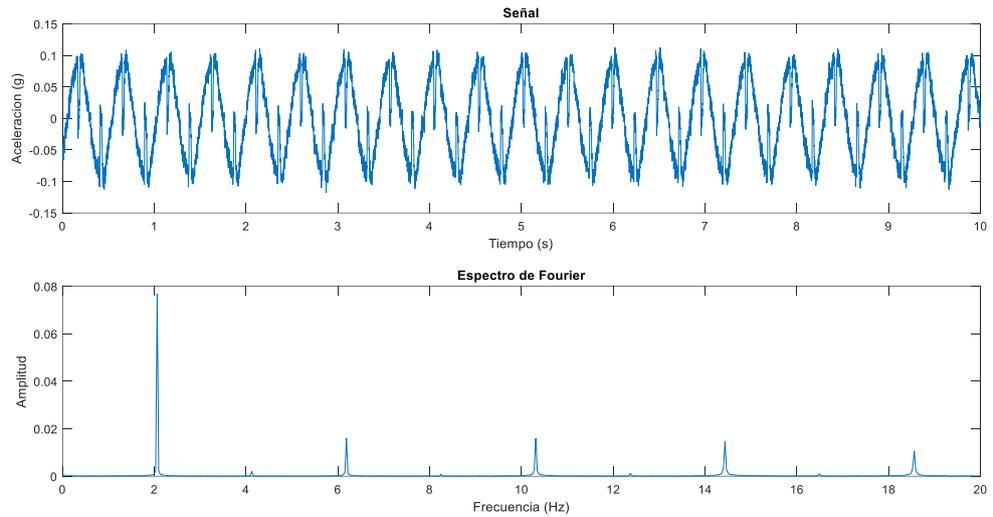


Figura N° 43. Señal de Acelerómetro Kyowa del CISMID.

Fuente: Elaboración Propia.

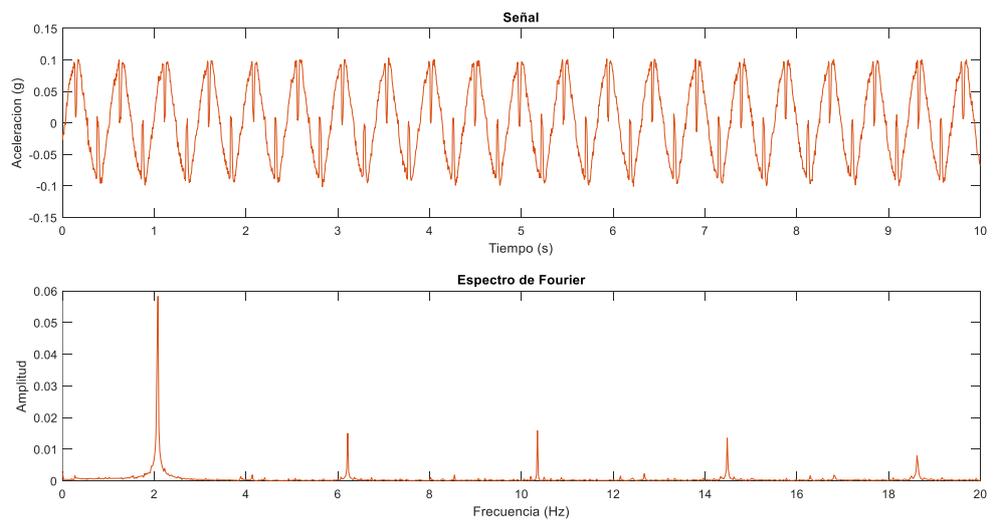


Figura N° 44. Señal de Acelerómetro MPU6050.

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se muestran las gráficas de las señales de los acelerómetros cuando la mesa de vibraciones se configuró para 5 Hz.

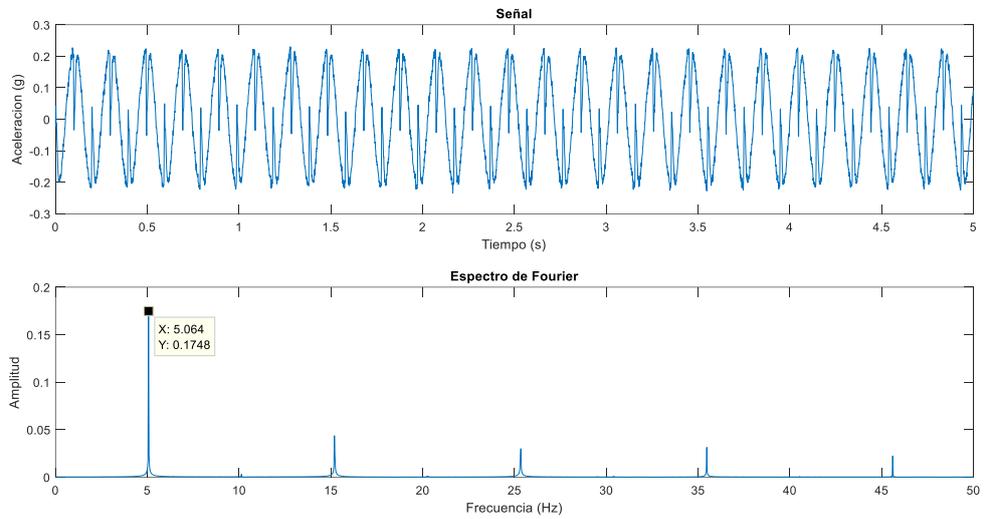


Figura N° 45. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.

Fuente: Elaboración Propia.

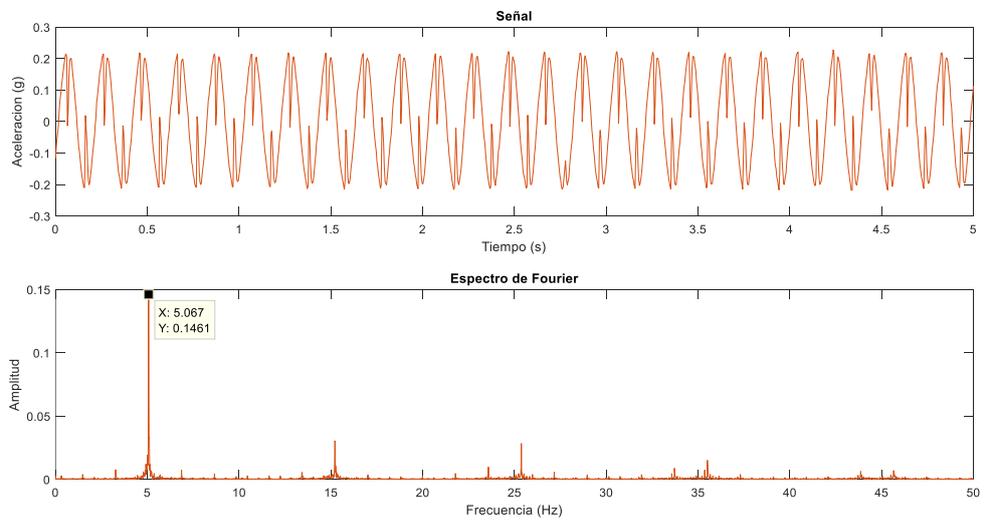


Figura N° 46. Señal de Acelerómetro MPU6050.

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se muestran las gráficas de las señales de los acelerómetros cuando la mesa de vibraciones se configuró para 7.6 Hz.

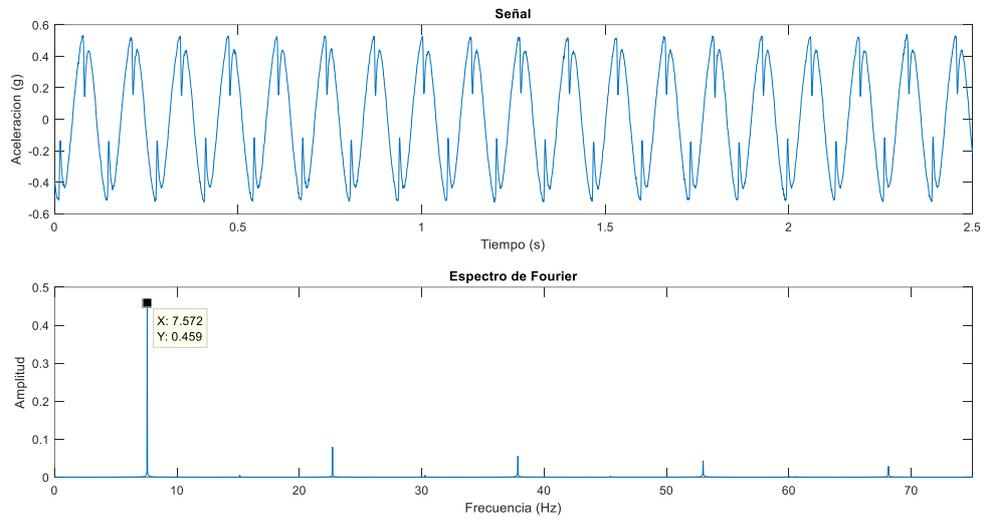


Figura N° 47. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.

Fuente: Elaboración Propia.

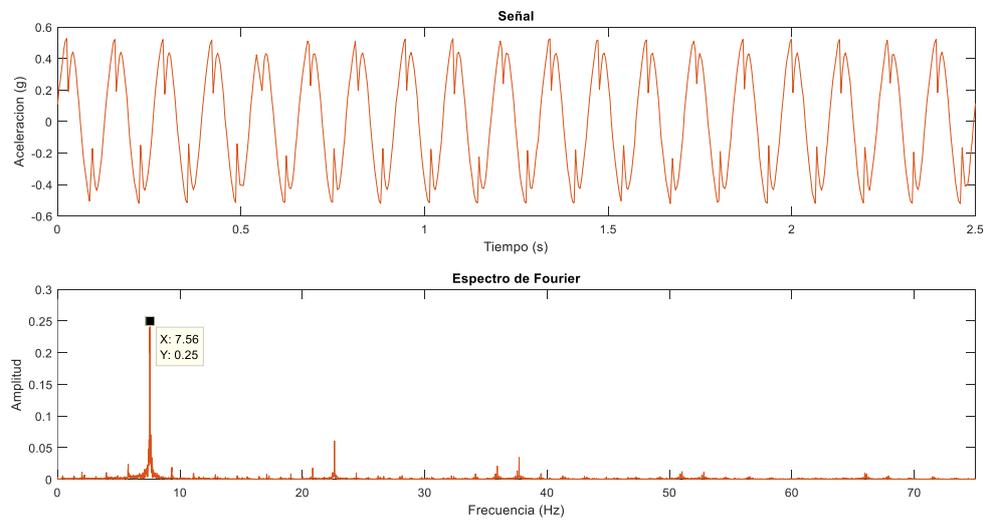


Figura N° 48. Señal de Acelerómetro MPU6050.

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se muestran las gráficas de las señales de los acelerómetros cuando la mesa de vibraciones se configuró para 10 Hz.

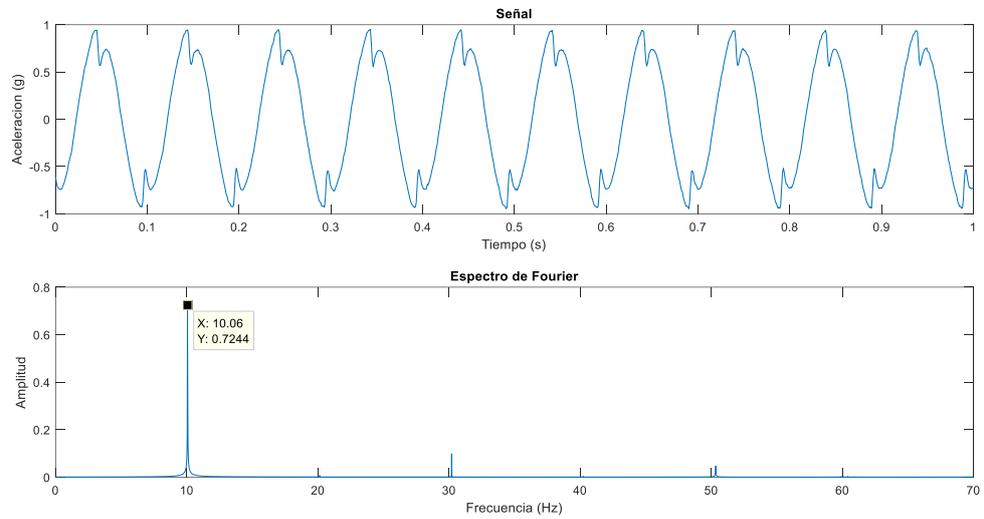


Figura N° 49. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.

Fuente: Elaboración Propia.

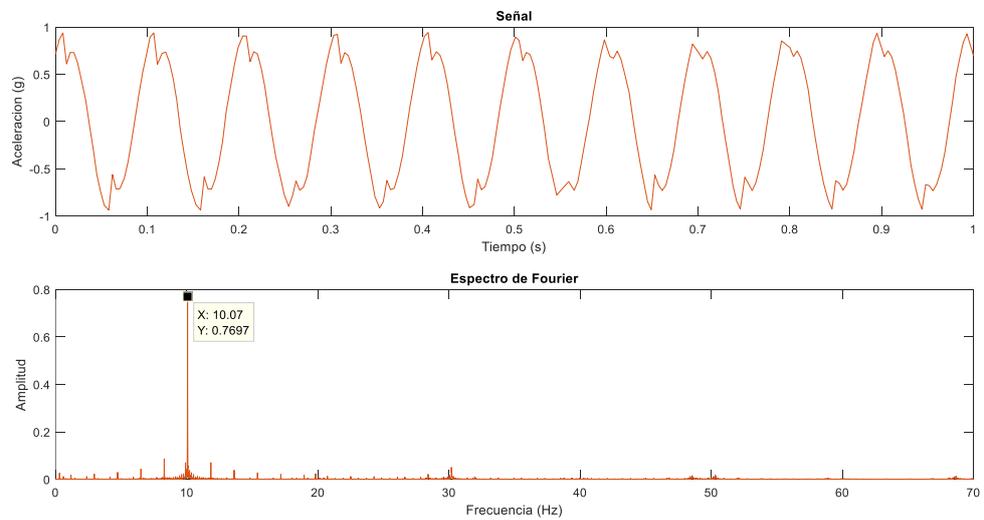


Figura N° 50. Señal de Acelerómetro MPU6050.

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se muestran las gráficas de las señales de los acelerómetros cuando la mesa de vibraciones se configuró para 15 Hz.

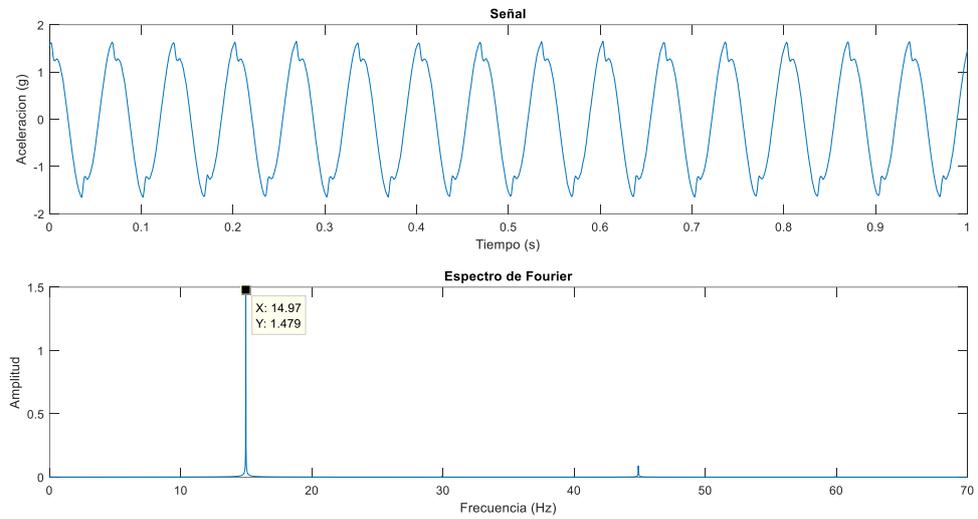


Figura N° 51. Señal de Acelerómetro Kyowa del Cismid.

Fuente: Elaboración Propia.

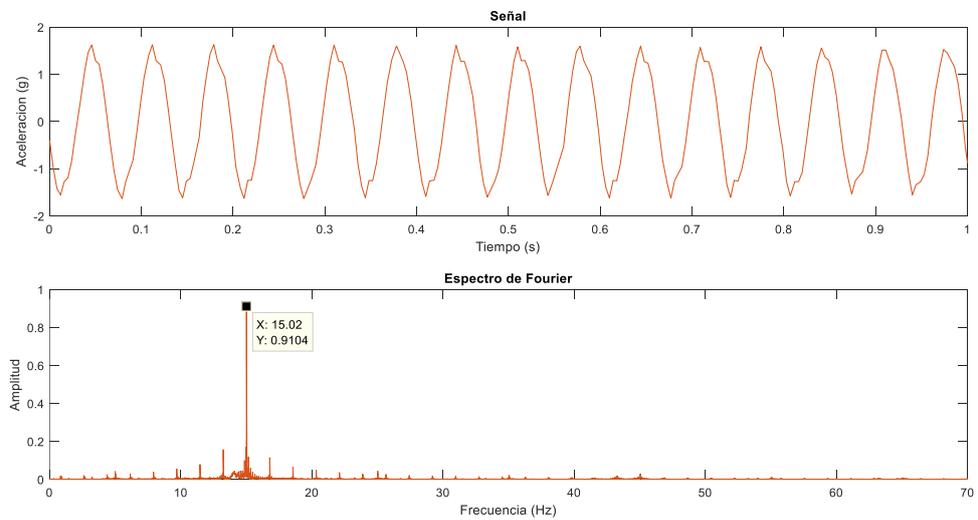


Figura N° 52. Señal de Acelerómetro MPU6050.

Fuente: Elaboración Propia.