

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Electrónica



Sistema de Tiempo Real para el Análisis de Vibración en Puentes

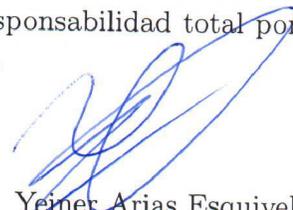
Tesis de Maestría para optar por el grado de
Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Énfasis en Sistemas Empotrados

Yeiner Arias Esquivel

Cartago, 11 de diciembre, 2015

Declaro que esta tesis de Maestría ha sido elaborada enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo realizado y por el contenido de la correspondiente tesis.



Yeiner Arias Esquivel

Cartago, 11 de diciembre de 2015

Céd: 7-0184-0659

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica
Tesis de Maestría
Tribunal Evaluador

Tesis de Maestría defendida ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Máster en Electrónica con Énfasis en Sistemas Empotrados, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



M.Sc. Eduardo Canessa Montero
Lector



M.Sc. Daniel Ureña Muñoz
Lector



Ph.D. Carlos Meza Benavides
Director

Los miembros de este Tribunal dan fe de que la presente Tesis de Maestría para optar por el grado de Máster en Ciencias en Ingeniería Electrónica con Énfasis en Sistemas Empotrados, cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 11 de diciembre de 2015

Resumen

En este documento se propone el desarrollo de un sistema empotrado de tiempo real, para el análisis en línea de vibraciones en puentes, donde se exponen las principales consideraciones de dicho análisis, así como técnicas para la reducción del consumo de potencia y para asegurar el determinismo en el tiempo de muestreo de las aceleraciones. Además se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en el laboratorio y en el campo.

Palabras clave: Análisis de vibración, aceleración, frecuencia, potencia, puentes.

Abstract

This document proposes the development of a real-time embedded system for online vibration analysis on bridges, where the main considerations of this analysis are presented, as well as techniques to reduce power consumption and ensure determinism in the sampling rate of the acceleration signals. In addition, the obtained results during tests on field and laboratory are shown.

Keywords: Acceleration, bridges, frequency, power consumption, vibration analysis.

a mi querida madre

Agradecimientos

Agradezco a mi madre por todo su apoyo, cariño y dedicación.

Yeiner Arias Esquivel

Cartago, 11 de diciembre de 2015

Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
1 Introducción	1
1.1 Entorno	1
1.2 Justificación	2
1.3 Problema	4
1.4 Enfoque de la Solución	4
1.5 Objetivos	5
1.6 Estructura	6
2 Marco teórico	7
2.1 Antecedentes	7
2.1.1 Análisis de vibración realizado a nivel nacional	7
2.1.2 Análisis de vibración en el mundo	8
2.1.3 Aspectos a considerar	9
2.2 Conceptos del análisis de vibración	9
2.3 Transformada discreta de Fourier (DFT)	11
2.4 Proceso de Digitalización [29]	12
2.4.1 Muestreo	12
2.4.2 Relación señal a ruido	12
2.4.3 Sobremuestreo	13
2.5 Sistemas operativos de tiempo real (RTOS)	14
2.5.1 Clasificación de las tareas	14
2.5.2 Algoritmos de calendarización	14
2.6 Metodología de Diseño de Sistemas en Chip (<i>SoC</i>) [24]	15
2.7 Sensor de vibración	15
3 Metodología	17
3.1 Investigación y definición de los alcances	17
3.2 Establecimiento de requisitos de medición	18
3.3 Selección de la plataforma	18
3.4 Implementación	19

4	Sistema para el análisis de vibración	21
4.1	Características del sensor de aceleración	21
4.2	Selección de sensor de aceleración	22
4.3	Establecimiento de la frecuencia de muestreo	22
4.4	Características de la plataforma	23
4.5	Selección de la plataforma	23
4.6	Diseño e implementación del software	24
4.6.1	Software para la recolección de la información	24
4.6.2	Software para el análisis de la información	26
4.7	Reducción del consumo de potencia	28
4.7.1	Adquisición y procesamiento de la información	28
4.7.2	Cálculo de la frecuencia de máxima potencia	29
5	Resultados y análisis	31
5.1	Validación de la frecuencia de muestreo	31
5.2	Validación de las frecuencias extraídas	32
5.3	Validación de la reducción del consumo de potencia	36
6	Conclusiones y recomendaciones	43
	Bibliografía	45
A	Periódicos de muestreo	49

Índice de figuras

1.1	Espectro de frecuencia de señal sin jitter.	2
1.2	Espectro de frecuencia de señal con un jitter de 100 μ s.	3
1.3	Esquema de la solución general.	5
2.1	Modelo de una viga simplemente apoyada (sistema de un grado de libertad).	10
2.2	Señal discreta aperiódica, su espectro continuo, y su espectro muestreado [3].	12
4.1	Respuesta en frecuencia de filtros elípticos de distinto orden.	26
4.2	Software básico para la adquisición y análisis de las señales de vibración. .	27
4.3	Software optimizado para la adquisición y análisis de las señales de vibración.	29
5.1	Comparación de la variación del jitter con calendarización de tiempo real (azul) y sin calendarización de tiempo real (rojo).	32
5.2	Colocación del dispositivo en los tubos durante la pruebas.	33
5.3	Espectro de potencia obtenido de la viga simplemente apoyada.	34
5.4	Respuesta del modelo de la viga ante una perturbación.	35
5.5	Medición de aceleración en uno de los perfiles durante los experimentos. . .	36
5.6	Profundidad y ubicación del daño en el perfil.	37
5.7	Espectro en frecuencia de la viga con y sin daño.	39
5.8	Elevación e identificación de elementos del puente sobre el río Virilla en la ruta 32 [2].	39
5.9	Mediciones de aceleración en el tramo 4 del puente sobre el río Virilla en la ruta 32.	41

Índice de tablas

4.1	Características del sensor [14]	21
4.2	Especificaciones del acelerómetro ADXL345.	22
4.3	Especificaciones de la plataforma BeagleBone Black [10].	24
5.1	Variación del periodo de muestreo con y sin calendarización de tiempo real.	31
5.2	Características de los perfiles cuadrados utilizados en las pruebas [38].	34
5.3	Resultados de las pruebas de flexión realizadas al perfil.	35
5.4	Consumo de potencia del BeagleBone Black en mW para distintas frecuencias de muestreo.	37
5.5	Frecuencia de vibración de los perfiles con y sin daño.	38
5.6	Frecuencia de las formas modales identificadas por el LanammeUCR.	40
A.1	Mediciones del periodo de muestreo.	49

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se describe el entorno alrededor del que se desarrolla esta tesis, donde se expone la relevancia y aporte de la solución planteada al Laboratorio del Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes, así como el problema existente y el enfoque de la solución, con la propuesta de un sistema de bajo costo y consumo de potencia, para el procesamiento en tiempo real de las señales de vibración en puentes.

1.1 Entorno

A finales del año 2013, el Instituto Tecnológico de Costa Rica firmó un contrato con el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) para la evaluación de todos los puentes del país, dicha labor es llevada a cabo por el Laboratorio del Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes, dentro del proyecto *eBridge 2.0: Sistema integrado para el desempeño de puentes*.

Como parte de los trabajos de evaluación de las estructuras, el laboratorio realiza inspección y monitoreo de los puentes a fin de determinar su estado. Dichas revisiones son en su mayoría visuales y llevadas a cabo por expertos en el área. En el caso de estructuras críticas, ya sea por su alto flujo vehicular o por su ubicación, se realizan monitoreos periódicos para determinar cambios que puedan afectar el funcionamiento o la vida útil de las mismas. Los monitoreos son realizados mediante pruebas estáticas y dinámicas, entre las cuáles se encuentran los análisis teóricos de fatiga, prueba de carga, pruebas de esfuerzo, análisis de vibración, entre otras.

El laboratorio, como parte de una casa de educación superior y creado con el objetivo de generar capacidad de predicción de fallas en puentes [31], tiene la tarea de realizar investigaciones que impulsen el avance en el área en el cual se desarrollan los trabajos y es aquí donde se realizan esfuerzos como el fin de cumplir dicho objetivo.

1.2 Justificación

En la actualidad, la preocupación por el envejecimiento de las estructuras civiles y su degradación, junto con la necesidad de validar el comportamiento de las nuevas estructuras han contribuido al aumento del interés en los programas de monitoreo basados en los análisis dinámicos [23].

En el ámbito de puentes, el alto costo de las estructuras y el impacto económico que implica la interrupción del flujo vehicular ha motivado el uso del análisis de vibración como método para conocer el estado de la estructura sin afectar su funcionamiento, ya que puede realizarse utilizando la excitación provista por los vehículos que circulan sobre el puente o incluso por los efectos de condiciones ambientales como el viento, el oleaje y los sismos [6].

Un aspecto importante en este tipo de análisis es el determinismo en el tiempo de muestreo, abordado en [20], donde se explica cómo la variación aleatoria en los intervalos de tiempo entre muestras conocida como *jitter* temporal, puede causar una distorsión entre las frecuencias de vibración reales de la estructura y las frecuencias obtenidas luego del muestreo de los datos.

A continuación se muestra un ejemplo de como el *jitter* afecta las mediciones.

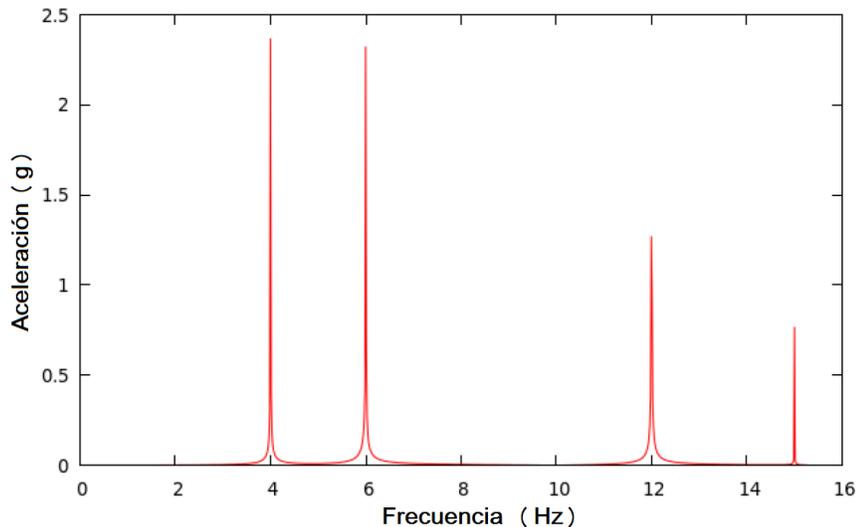


Figura 1.1: Espectro de frecuencia de señal sin jitter.

En la figura 1.1 se observa el espectro de frecuencia de una señal de aceleración simulada, donde las frecuencias naturales de vibración están centradas en 4 Hz, 6 Hz, 12 Hz y 15 Hz.

En contraste con la figura 1.1, la figura 1.2 muestra la misma señal de vibración, pero en este caso, se simuló una variación temporal no determinística entre los $0 \mu\text{s}$ y los $100 \mu\text{s}$. Dicho cambio se refleja en el espectro como un desplazamiento en las frecuencias, que se hace aun más notorio para frecuencias altas.

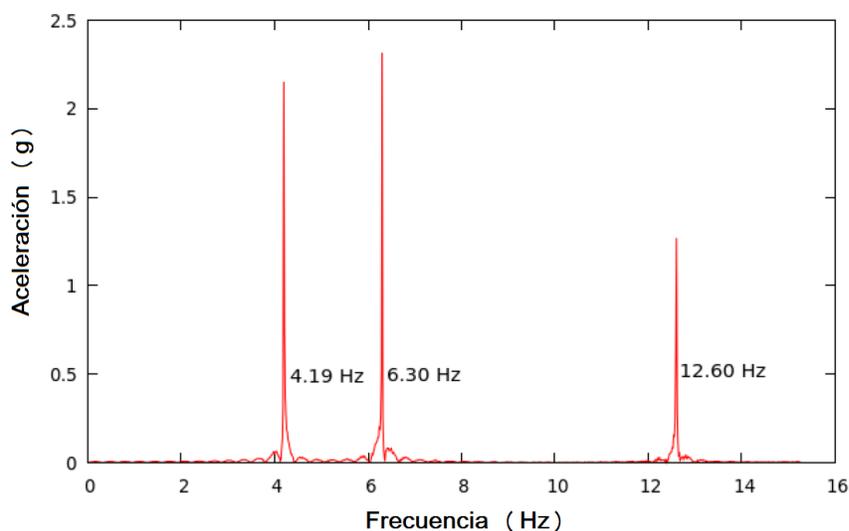


Figura 1.2: Espectro de frecuencia de señal con un jitter de $100 \mu s$.

Como se verá más adelante en la sección 2.2, un cambio en la rigidez de la estructura debido a un daño en la misma, se puede asociar con una disminución en las frecuencias naturales de vibración. Es por esta razón que el jitter en las mediciones puede enmascarar los posibles daños en estructura cuando se realiza un análisis de las frecuencia de vibración.

Además de un muestreo determinístico, en trabajos previos realizados por *ebridge* como: los del puente sobre el río Purires [15] y el puente en el río Virilla [17], se encontraron diversas dificultades en cuanto al procesamiento de los datos, esto porque en ambos monitoreos toda la información proveniente de los sensores de vibración fue almacenada y posteriormente analizada en el laboratorio. El principal inconveniente es que se realiza una medición “a ciegas” ya que no se conoce ningún resultado hasta su posterior procesamiento, lo que dificulta determinar si los datos recibidos por los sensores son correctos, y por las características de la respuesta en frecuencia de los puentes, mucha de la información almacenada no es relevante para el análisis.

Por otra parte, según [11] uno de los factores que más influyen en la detección de daños es la cercanía de los sensores a la falla. Por lo que cuando se realiza la instrumentación de una estructura, si la ubicación de los dispositivos de medición no es la apropiada o se ubican en un punto de la estructura donde el daño tiene poco impacto, cuando se realice el procesamiento de los datos en el laboratorio no se podrá observar ninguna influencia de este, lo que puede causar que sea necesario realizar una nueva instrumentación del puente, o en el peor de los casos, que el defecto sea pasado por alto.

Uno de los métodos que permiten solucionar este inconveniente es aumentar el número de sensores, por ejemplo utilizando la ecuación (1.1) [6].

$$N \geq 2n - 1 \quad (1.1)$$

Donde N es el número de puntos a instrumentar y n el número de modos de vibración

que se desean medir de forma simultánea.

Si bien, el incrementar el número de sensores permite obtener mayor información sobre el comportamiento dinámico de la estructura facilitando la identificación de daños, no siempre es posible llevarlo a cabo, esto porque se debe considerar que el costo del equipo se incrementa en proporción al número de instrumentos de medición, además el aumento en la cantidad de información, complica el proceso de análisis y necesita de herramientas computacionales más complejas [6].

Por otra parte, no todas las estructuras cuentan con acceso a energía eléctrica, normalmente por estar ubicadas en lugar alejados, por lo que es necesario un sistema de bajo consumo de potencia, que permita un uso prologando sin necesidad de recarga. Según [39], una de los principales causas de la reducción en el tiempo de vida de la batería en dispositivos móviles es la adquisición de información del entorno (*sensing*) y la comunicación inalámbrica, por lo que se debe procurar un aprovechamiento eficiente tanto del hardware como del software.

Es por estas razones que surge la necesidad de desarrollar un equipo de medición determinístico, de costo y consumo de potencia bajo, que permita realizar un análisis en línea de la estructura para obtener resultados en el momento que se realizan las mediciones, permitiendo a los expertos tomar decisiones en el campo y disminuir la cantidad de información que se almacena durante las mediciones, a diferencia de los sistemas tradicionales que realizan un procesamiento fueran de línea de la información recolectada.

Se debe resaltar que en este proyecto se aborda el desarrollo de un único dispositivo de medición para la detección de cambios en las frecuencias de vibración en puentes, donde se podrá obtener información del comportamiento modal de la estructura (distintas frecuencias naturales) en un punto determinado, en trabajos futuros se pretende implementar un sistema que permita realiza un análisis más profundo del estado del puente, incorporando varios nodos de medición.

1.3 Problema

Los análisis de vibración que actualmente se realizan en el laboratorio no permiten conocer en tiempo real el comportamiento de la estructura, además muchos de los datos recopilados no aportan información útil para el análisis, y no es posible determinar durante las mediciones si la información recibida de los sensores es relevante.

1.4 Enfoque de la Solución

Con el objetivo de dar solución al problema encontrado en el laboratorio de puentes, se plantea el desarrollo de un sistema empotrado de bajo costo, tanto desde el punto de vista energético como el económico, que permita realizar un análisis en tiempo real (en línea)

de la información obtenida por los sensores de aceleración, tal que permita obtener el espectro en frecuencia de la señal de vibración y así extraer los periodos fundamentales.

Basado en el esquema de la figura 1.3, se plantea dividir la solución en múltiples etapas. En primer lugar, se deben establecer cuáles son las características y necesidades en la medición de señales de vibración, lo que permita identificar las cualidades de los sensores de aceleración y los filtros a aplicar. Luego, se debe seleccionar una plataforma de bajo costo y consumo de potencia, teniendo en cuenta los requisitos de muestreo de la señal, considerando que el sistema debe realizar múltiples tareas de forma simultánea, además debe ser fácilmente configurable para uso en distintas estructuras. Por último, es necesario el desarrollo del código para el procesamiento y la adquisición de los datos, además de la migración de las bibliotecas a utilizar a la plataforma de evaluación.

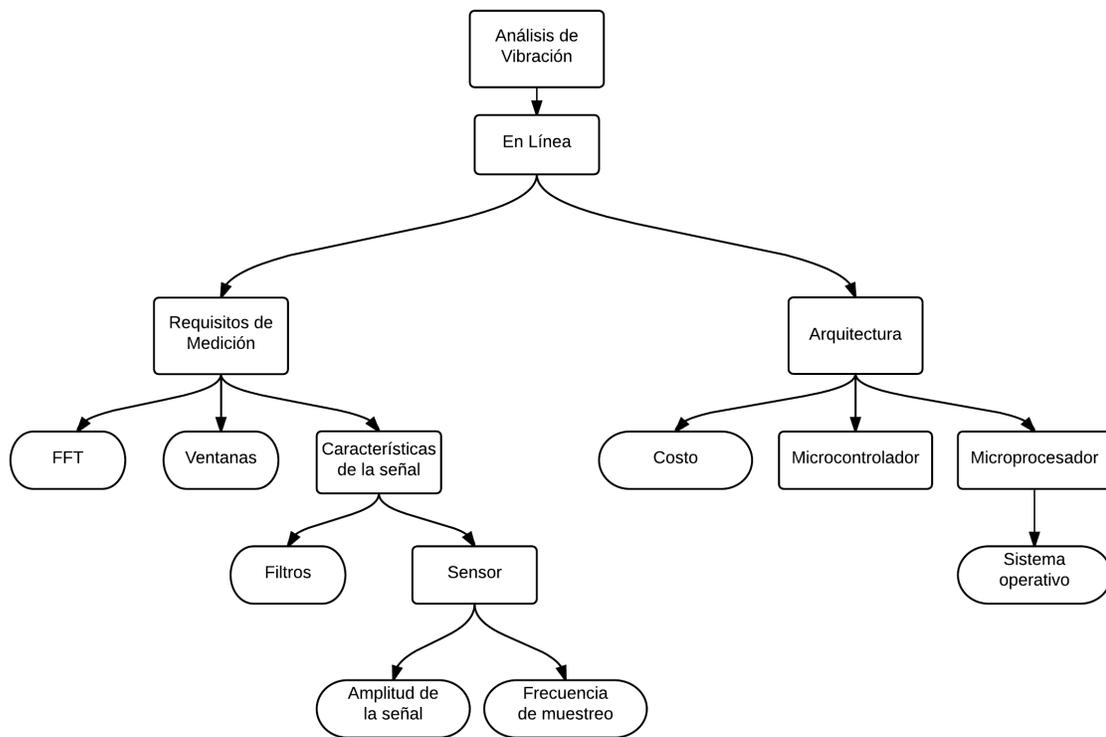


Figura 1.3: Esquema de la solución general.

1.5 Objetivos

Objetivo General

Proponer un sistema de bajo costo y consumo de potencia, que permita la adquisición y procesamiento en tiempo real de las señales de vibración de estructuras tipo puente.

Objetivos Específicos

- Determinar las características del sistema de adquisición y procesamiento de la información, que permita analizar las señales de aceleración.
- Diseñar e implementar un prototipo del sistema, que permita validar su funcionamiento.
- Evaluar las características del sistema de adquisición y procesamiento en tiempo real de la información en cuanto a rendimiento y consumo energético.

1.6 Estructura

En el presente documento se expone un análisis y los criterios para la solución al problema encontrado en los análisis de vibración en el proyecto *ebridge* desde el punto de vista de la electrónica, específicamente desde los sistema embebidos. En el capítulo siguiente se exponen los conceptos teóricos necesarios para la comprensión de este texto y el estado de arte en cuanto a análisis de vibración se refiere, tanto a nivel nacional como a nivel mundial. En el capítulo 3 se describe la metodología utilizada en la elaboración de esta tesis. El capítulo 4 describe la solución al problema planteado, tanto desde un punto de vista de diseño como de implementación. El capítulo 5 presenta los resultado obtenidos durante el desarrollo del proyecto, así como su respectivo análisis. Por último, en el capítulo 6 se exponen las principales conclusiones obtenidas de la ejecución del proyecto y las recomendaciones que permitan mejorar el desempeño de la solución planteada.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se describen los principales conceptos utilizados en el desarrollo del trabajo, iniciando con un resumen de los estudios realizados en Costa Rica y en el mundo referentes al análisis de vibración. Además se exponen los fundamentos de dichos análisis; donde se presenta el modelo matemático simplificado de un puente. Por último se presenta el proceso de digitalización de una señal analógica y sus implicaciones, así como un método para obtener la respuesta en frecuencia de una señal, y las metodologías utilizadas en el diseño de sistemas en chip.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Análisis de vibración realizado a nivel nacional

En el país se han realizado algunos estudios en materia de puentes con el fin de monitorear y evaluar su estado. Uno de ellos fue el realizado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (Japan International Cooperation Agency, JICA) donde se estudiaron 29 puentes en las distintas rutas nacionales [1]. La metodología utilizada para dicho análisis fue la inspección visual de los componentes estructurales y una evaluación hidráulica de las condiciones del flujo del río.

Otros de los estudios, son los realizados en los trabajos finales de graduación de la Escuela de Ingeniería Civil de la UCR en el año 2004, sobre el puente del Río Grande [26] y en el puente sobre el Río Tempisque [40]. Dichos trabajos realizan un análisis dinámico de la estructura tomando mediciones de vibración con ayuda de acelerógrafos mediante los que se obtuvieron los periodos fundamentales de oscilación, para posteriormente calibrar los modelos estructurales analíticos de los puentes.

En años recientes algunos otros análisis dinámicos se han realizado en el país, como los llevados a cabo por el Ing. Guillermo Santana, Ph.D. investigador de la LanammeUCR [35] y los investigadores del proyecto “eBridge 2.0 sistema integrado para el desempeño

de puentes” Ing. Francisco Navarro y Ing. Daniel Ureña [17] en el puente sobre el río Virilla. En dichos estudios se realizaron mediciones de aceleración en distintos tramos de la estructura del puente a fin de obtener su comportamiento.

En el caso de Guillermo Santana, se realizaron mediciones utilizando acelerógrafos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica, donde, luego de obtener el espectro de Fourier de las señales, se encontró una frecuencia fundamental de 2.7 Hz.

El análisis llevado a cabo por los investigadores del proyecto eBridge se realizó con acelerómetros triaxiales de fibra óptica y una frecuencia de muestreo de 1 kHz. Los datos adquiridos, fueron filtrados para excluir frecuencias mayores a los 25 Hz y luego se les calculó la FFT (transformada rápida de Fourier) para determinar las frecuencias predominantes. En este estudio se encontraron diversos modos de vibración, en un rango de entre 1.96 Hz y los 8.36 Hz, donde se precisó que el comportamiento deducido del análisis teórico corresponde con el obtenido de las mediciones y se recomendó establecer un seguimiento del comportamiento dinámico en forma periódica, a fin de poder determinar cambios en las frecuencias de vibración que se deriven de un posible daño en la estructura.

2.1.2 Análisis de vibración en el mundo

En el mundo, el análisis de vibración es una técnica de uso frecuente para la validación de modelos analíticos, así como el monitoreo de la salud estructural. Uno de estos análisis fue el realizado en el Golden Gate Bridge, donde se colocaron un total de 64 nodos para la adquisición de datos de aceleración en la sección más larga de la estructura con aproximadamente 1.280km de longitud, utilizando como medio de excitación la vibración ambiental de la estructura. En esta medición se realizó un sobre-muestreo de las señales para disminuir el efecto de la desincronización de nodos, además se utilizó un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte de 25 Hz, en cada nodo, para disminuir el ruido en las mediciones. Los datos recolectados mostraron que las frecuencias fundamentales de vibración de la estructura se localizaban en 0.17 Hz, 0.22 Hz y 0.27 Hz lo que coincidía con las encontradas en los modelos de simulación y en estudios previos [20].

Otro de los trabajos realizados es el presentado en [11], donde se hace un análisis detallado de los distintos métodos de detección de daño aplicados a la respuesta dinámica de los puentes. En este se concluyó, que la eficiencia de las distintas técnicas depende de factores como el número de sensores, el ruido de la respuesta dinámica y la localización y extensión del daño. Algunos otros estudios que utilizan puntualmente datos de vibración para el monitoreo de la salud estructural de puentes, se presentan en [22] y [37].

Recientemente se han incorporado en el campo de monitoreo estructural, técnicas novedosas como las redes neuronales artificiales para la detección y localización de daños [8]. La principal ventaja de este enfoque es que no requiere un modelo estructural, ya que utiliza únicamente las frecuencias modales para realizar el entrenamiento de la red y además es aplicable a estructuras de complejidad arbitraria. Sin embargo el aplicar la técnica AANN (*Auto-associative neural network*) puede producir tanto falsos positivos

como falsos negativos en la determinación de un daño, debido a los efectos ambientales.

2.1.3 Aspectos a considerar

Los puentes de carretera y peatonales con separaciones entre apoyos menores a los 100 m, presentan frecuencias típicas de vibración menores a los 11 Hz [11, 42], por lo que frecuencias mayores a estas, no proveen información relevante para los análisis.

Además utilizando como base los datos recopilados por el laboratorio *ebridge* y otros investigadores sobre mediciones de aceleración en estructuras de puentes, las amplitudes registradas en dichos estudios varían entre los 0.01 g y los 0.62 mg.

En las mediciones, las frecuencias obtenidas fuera del rango pueden producirse por sonidos fuertes en el ambiente como los generados por los mismo vehículos que transitan por el puente. Por lo que es necesario realizar un filtrado de la información de vibración recopilada antes de someterla a cualquier tipo de análisis.

2.2 Conceptos del análisis de vibración

Antes de iniciar con las consideraciones acerca de los análisis de vibración, es importante tener en cuenta su modelo matemático y la relación que existe entre las variables del sistema. El comportamiento dinámico típico de muchas estructuras como los puentes de carretera puede ser representado de forma simplificada por un sistema de un grado de libertad (SDOF) [41, 11, 7], y su modelo matemático esta dado por la ecuación (2.1), e ilustrado en la figura 2.1.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = g(t) \quad (2.1)$$

Donde x representa el desplazamiento, m la masa, c la constante de amortiguamiento, k la constante elástica y g representa las excitación producida por fuerzas externas al sistema.

Ahora bien, si se considera que el sistema se encuentra en vibración libre, (no existen fuerzas externas que lo perturben) y por efectos prácticos se supone que el amortiguamiento es nulo, se obtiene que:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2.2)$$

Utilizando una solución del tipo $A\sin(\omega t + \phi)$ para (2.2) se puede extraer que la frecuencia natural de vibración está dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

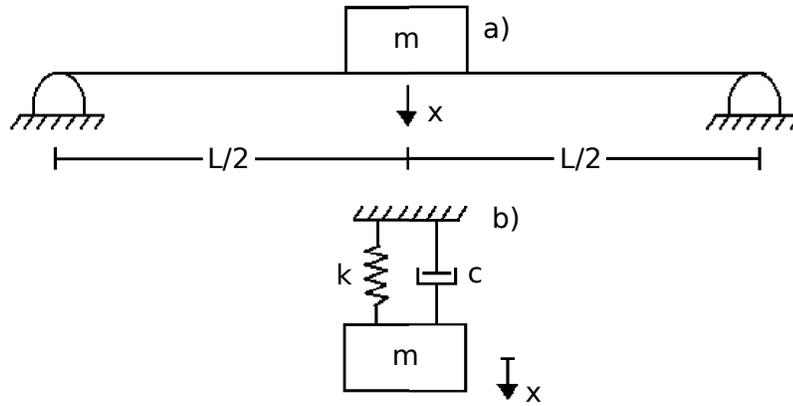


Figura 2.1: Modelo de una viga simplemente apoyada (sistema de un grado de libertad).

Por otra parte, el cálculo teórico de la rigidez de una viga simplemente apoyada se puede realizar mediante la siguiente expresión.

$$k' = \frac{48EI}{l^3} \quad (2.4)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, I es el momento de inercia geométrico de segundo orden del área de la sección transversal de la viga y l es la distancia entre los apoyos [12]. La relación entre k y k' está dado por la ecuación (2.5), donde g es la aceleración debida a la gravedad.

$$k = k'g \quad (2.5)$$

De la ecuación (2.3), se puede observar que la frecuencia natural de vibración está en función de la constante de rigidez y la masa de la estructura. Dado que los cambios en la masa son poco comunes (normalmente debido a reparaciones), basado en este análisis simplificado y según lo mencionado por Estrada [11], es que se busca monitorear cómo las frecuencias naturales de vibración cambian a través del tiempo, producto de las variaciones en la constante de rigidez de la estructura, debidas a daños.

De la ecuación (2.1) se obtiene la función de transferencia del sistema 2.6, cuando se toma como entrada la fuerza externa y como salida la aceleración de la viga, la cual permite extraer la respuesta vibratoria del sistema.

$$\frac{A(s)}{G(s)} = \frac{s^2}{ms^2 + cs + k} \quad (2.6)$$

En sistemas con múltiples grados de libertad (MDOF) las constantes de la ecuación diferencial (2.1) se convierten en matrices, por lo que conforme el sistema posea un mayor número de grados de libertad, también contará con un número mayor de frecuencias de vibración [19]. Cada una de estas frecuencias se conoce como modos normales de

vibración, y se producirán para condiciones iniciales particulares, lo que quiere decir que dependiendo de las perturbaciones que exciten el sistema, así aparecerán, unos u otros modos de vibración.

Es importante tener en cuenta que aunque en este análisis se ignora el efecto del amortiguamiento, este sí afecta la frecuencia a la cual oscila la estructura, pero que no es de interés para los propósitos de esta tesis.

2.3 Transformada discreta de Fourier (DFT)

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que permite obtener, a partir de una función continua en el tiempo, otra función continua, que contiene toda la información de la primera pero en el dominio de la frecuencia. En los elementos de procesamiento digitales, resulta imposible tratar con señales continuas, ya que estos trabajan de forma discreta y además la memoria es limitada. Es por esta razón que se han desarrollado otro tipo de herramientas como la transformada discreta de Fourier, DFT por sus siglas en inglés, que consiste en un muestreo uniforme en frecuencia de la transformada de Fourier.

Toda señal aperiódica de energía finita tiene un espectro continuo que esta dado por la ecuación (2.7):

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (2.7)$$

Si se muestrea el espectro de la ecuación (2.7) cada $\delta\omega = \frac{2\pi}{N}$, solo se necesitarán N muestras del espectro, ya que al ser una señal discreta, su periodo es 2π [29]. De este muestreo obtendremos puntos en $\omega = \frac{2\pi}{N}k$ con $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.8)$$

La DFT permite transformar una función en tiempo discreto, en otra función en el dominio de la frecuencia discreta. Una de las características de la DTF es que únicamente se puede aplicar a una secuencia discreta finita de datos, lo que es conveniente para los propósitos de este documento. La figura 2.2 muestra como la transformada discreta de Fourier convierte un espectro continuo, en discreto:

Otra de las características de la DFT, es que cuanto más se conozca la señal en el dominio del tiempo, menos se conocerá su información en el dominio de la frecuencia y en el caso contrario, entre más se conozca su comportamiento frecuencial, menos se conocerá la señal en el tiempo. Esto quiere decir que cuando se calcula la DFT con pocas muestras (una señal muy definida en del tiempo) la resolución en el dominio de la frecuencia será pobre

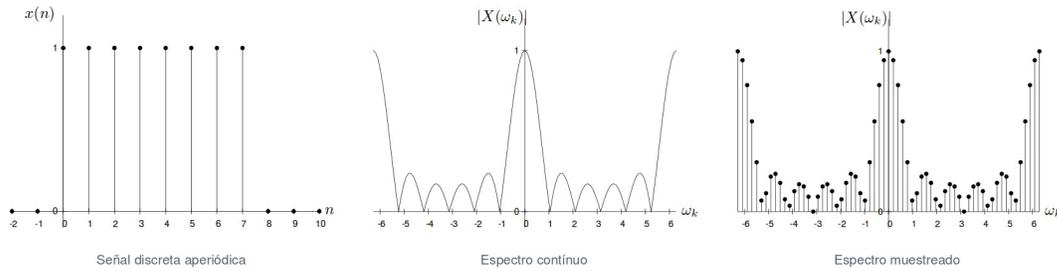


Figura 2.2: Señal discreta aperiódica, su espectro continuo, y su espectro muestreado [3].

y en el caso contrario, cuando la señal está muy definida en la frecuencia, la señal en el dominio del tiempo será muy amplia.

Con base en estas consideraciones es importante tener en cuenta que para aplicar la DFT se deberá definir la frecuencia a la cual se muestrea la señal continua y el tamaño de ventana (número de muestras de la señal en el tiempo) para obtener una resolución en frecuencia adecuada.

2.4 Proceso de Digitalización [29]

Actualmente muchos de los sensores de aceleración y otras magnitudes físicas brindan su salida en formato digital, por lo que es importante conocer los efectos de la digitalización de la señal.

2.4.1 Muestreo

Cuando se realiza el proceso de conversión analógica-digital es necesario definir la frecuencia con que se toman las muestras de la señal, ya que si no se tiene cuidado se pueden presentar problemas como el solapamiento temporal o *aliasing*, que es un efecto indeseable que causa que dos o más señales continuas diferentes resulten indistinguibles luego del proceso de digitalización. De acuerdo con el teorema de Nyquist-Shannon [16, 5] para lograr la reconstrucción correcta de la forma de onda, es necesario que la frecuencia de muestro (fs) sea al menos el doble de la frecuencia máxima a muestrear.

2.4.2 Relación señal a ruido

Luego de obtener las muestras de la señal, se debe considerar el número de dígitos binarios disponibles para la representación dicha señal analógica, dentro de un conjunto finito de niveles (proceso de cuantificación), ya que esto introduce un error conocido como ruido de cuantificación. Dicho error se define como la diferencia entre el valor cuantificado y el valor real de la muestra. Cuando el ruido de cuantificación aumenta, también aumenta la potencia del ruido. La calidad de un convertidor analógico A/D se mide normalmente

como la relación señal a ruido de cuantificación (SQNR por su siglas en inglés), que relaciona la potencia de la señal con la potencia del ruido y esta dada por la ecuación (2.9).

$$SQNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_x}{P_q} \quad (2.9)$$

Donde P_x es la potencia media de la señal y P_q la potencia media del error cuadrático.

$$P_q = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{\Delta^2}{2\tau} t^2 \cdot dt = \frac{\Delta^2}{12} \quad (2.10)$$

El cuanto Δ se calcula como la amplitud de la señal entre el número de valores disponible para la representación de la misma 2^b , siendo b la cantidad de bits de salida del convertidor. De la ecuación (2.10) se puede observar que entre mayor sea el número de bits del convertidor A/D mejor será su relación señal-ruido, convirtiéndose en un factor a considerar en la selección del sensor.

2.4.3 Sobremuestreo

Según lo expuesto en [20], en ambientes estructurales no controlados como los puentes, el nivel de ruido es normalmente alto, por lo que generalmente se aplica sobremuestreo para mejorar la relación señal-ruido. Esta técnica consiste en tomar muestras a una frecuencia más alta que la establecida por el teorema de muestreo y luego aplicar un filtro que elimine las frecuencias por encima de la frecuencia de interés, lo que permite distribuir la potencia del ruido de cuantificación en todo el nuevo ancho de banda y luego eliminar parte de su potencia con el filtro. Para calcular la nueva potencia del ruido de cuantificación, es necesario definir el factor de sobremuestreo, dado por la ecuación (2.11).

$$k = \frac{f_s}{2f_{max}} \quad (2.11)$$

La nueva potencia del ruido se calcula como:

$$P_q = \frac{\Delta^2}{12k} \quad (2.12)$$

De las ecuaciones 2.10 y 2.12 se puede extraer que el aumentar cuatro veces la tasa de muestreo equivale, a agregar un bit a la salida del convertidor A/D y por ende contribuye a mejorar la relación señal-ruido de cuantificación. Cabe resaltar que ésta mejora solo es válida cuando la relación señal-ruido de la señal analógica es mayor que la obtenida por este método.

2.5 Sistemas operativos de tiempo real (RTOS)

En un sistema de tiempo real el adecuado funcionamiento no depende únicamente de realizar un cálculo correcto, sino también del tiempo en que se produce dicho resultado (*deadline*) [36]. Se puede definir un sistema operativo de tiempo real, como un programa que calendariza la ejecución de las tareas, tanto en tiempo como en forma, gestiona los recursos del sistema y proporciona una base para el desarrollo de aplicaciones en un marco de limitaciones temporales [21].

Algunos ejemplos de sistemas de tiempo real son: control de vuelo, control de procesos, controladores de frenos en automóviles, etc. En el mercado existen distintas opciones de sistemas operativos de tiempo real para administrar los recursos de una plataforma, como *Wind River VxWorks*, *FreeRTOS* y *QNX Neutrino* las cuales son en su mayoría de paga. Por otra parte, existen herramientas como el *Proyecto Yocto*, que es una colaboración de código abierto que proporciona plantillas, herramientas y métodos que permiten crear sistemas personalizados basados en Linux para los productos embebidos, independientemente de la arquitectura de hardware [30].

2.5.1 Clasificación de las tareas

Dentro del contexto de los sistemas operativos de tiempo real, todas las tarea deben cumplir con sus *deadline*, dicho *deadline* se define como el instante en el que el resultado debe ser producido. Con base en esta medida se pueden clasificar las tareas de un RTOS. Aquellas aplicaciones de tiempo real donde las tareas devuelven el resultado después de haber sobrepasado el *deadline* y aún tiene utilidad, se conocen como aplicaciones de tiempo real suave (*soft real time*), cuando el resultado no tiene utilidad después de su *deadline* se llaman de tiempo real firme (*firm real time*) y cuando el resultado no tiene utilidad después de su *deadline* y además tiene alguna consecuencia se conoce con tiempo real duro (*hard real time*). Un ejemplo de *hard real time* es la tarea de frenado en el computador de un automóvil, ya que si el vehículo no se detiene en el momento que se presionan los frenos se puede sufrir un accidente.

2.5.2 Algoritmos de calendarización

El calendarizador del kernel de linux soporta varios tipos de calendarizaciones como SCHED_NORMAL, SCHED_BATCH, SCHED_IDLE, entre otras. Pero únicamente dos algoritmos de calendarización de tareas en tiempo real SCHED_FIFO (FIFO) y SCHED_RR (Round robin) [4], donde ambas calendarizaciones tienen rangos de prioridad que van desde 1 (baja) hasta 99 (alta).

FIFO es un algoritmo de calendarización simple, en el cual, se ordenan los procesos en la cola de *listo* según su prioridad y una vez adquieren el uso del procesador, bloquean el recurso hasta terminar su ejecución. El algoritmo Round Robin es similar a FIFO pero

con la diferencia de que existe un tiempo máximo para la ejecución de la tarea (*quantum*) que una vez agotado, le quita el control del procesador y dicha tarea vuelve a la cola de *listo*, si aún no ha finalizado.

2.6 Metodología de Diseño de Sistemas en Chip (*SoC*) [24]

En el diseño de *SoCs*, existen distintas metodologías para adaptar el tiempo y el costo de desarrollo de acuerdo a las necesidades. A continuación se presenta una breve descripción de dichas metodologías.

El diseño basado en tiempo consiste en el desarrollo de un *Application Specific Integrate Circuit* (ASIC) normalmente prototipado en un hardware reconfigurable (FPGA), el cual ofrece la máxima flexibilidad ya que todos los detalles pueden ser ajustados, por otro lado, teóricamente en este tipo de diseño puede alcanzar el máximo rendimiento y menor consumo de energía, pero con la desventaja de que el tiempo de diseño y por consiguiente el *time-to-market* puede ser muy alto. Además este tipo de soluciones son limitadas en cuanto a configurabilidad, ya que el tratarse de un hardware específico, los cambios implican modificaciones sustanciales en el diseño o un rediseño completo de la implementación.

En contraposición con el diseño basado en tiempo existe el diseño basado en plataforma, el cual es un enfoque de desarrollo orientado a la integración para la creación de productos a partir de plataformas, que integra características diferenciadoras en términos de aplicación, producto o dominio específico. Una de las ventajas más significativas de este tipo de diseño, es que reduce el *time-to-market* y por ende disminuye los costos asociados al proceso de desarrollo, pero con la desventaja de ser un sistema predefinido que restringe la flexibilidad y que la diferenciación es llevada a cabo principalmente mediante software.

2.7 Sensor de vibración

Para cuantificar una señal vibratoria, es necesario el uso de sensores de vibración, siendo el acelerómetro el más utilizado en dichas mediciones [14]. Los acelerómetros convierten la aceleración debida al movimiento, en una señal de tensión que es proporcional a dicha aceleración. La unidad utilizada para cuantificar la aceleración es g , que están definida como la aceleración debida a la gravedad de la tierra sobre un objeto (9.8 m/s^2). Además existen distintos tipos de acelerómetros: los piezoeléctricos y los mecánicoelectrónicos, los cuales presentan distintas características que se abordarán más adelante.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se describen cuáles fueron los pasos seguidos en la búsqueda de la solución al problema, iniciando con la definición de los alcances de esta tesis, así como la investigación bibliográfica realizada. Además, se exponen las pautas para el establecimiento de los requisitos de los sensores que cuantifican las señales de vibración y las consideraciones que fueron tomadas en cuenta, tanto para la elección de la plataforma como el sistema operativo que mejor se ajusta a los análisis de vibración.

3.1 Investigación y definición de los alcances

Como primer paso para la búsqueda de una solución al problema planteado, se inició un periodo de recopilación de información, tanto de material escrito, como por medio de preguntas a los expertos en el tema de estructuras, sobre las características de los análisis de vibración y la forma en que estos se realizan. De los resultados de la primera búsqueda se definió el enfoque de esta tesis, orientada a la recolección de información relevante para el laboratorio de evaluación de estructuras de puentes y la necesidad de un sistema de bajo consumo y costo. Una vez definidos los alcances del proyecto, fue necesaria una investigación bibliográfica de los principales métodos utilizados en el análisis de vibración aplicado a puentes (mencionados en el capítulo anterior), con el objetivo de identificar las técnicas empleadas en estudios previos, así como las dificultades típicas de este tipo de análisis. Además, con el fin de facilitar el proceso de recolección de información y el manejo de fuentes bibliográficas, provenientes de las bases de datos como IEEE Xplore y ACM DL, así como libros de texto, se utilizaron gestores de referencias como Zotero, Refworks y Mendeley, que permiten almacenar y categorizar la información. Por último, durante la investigación se estudiaron temas como el diseño de filtros, relación señal ruido en dispositivos digitales, la forma de obtener el espectro en frecuencia de una señal discreta y algunos de los conceptos sobre sistemas de tiempo real que se abordaron en el siguiente capítulo.

3.2 Establecimiento de requisitos de medición

Con la información obtenida de la investigación bibliográfica, se procedió a definir las características de los sensores necesarios para el recolección de las señales bajo estudio. Primero, se debió determinar las amplitudes y frecuencias naturales de vibración de las estructuras, como las que se exponen en [17, 28], donde se define (con base las mediciones realizadas en el campo) que las aceleraciones típicas de un puente están en el orden de los 10 a los 620 mg, lo que posibilita establecer un marco de referencia para determinar las características del sensor que permita extraer la información de manera apropiada.

Además de considerar los puntos ya mencionados, fue necesario definir el tiempo de respuesta del sensor, es decir, el tiempo que le toma a un cambio en la entrada verse reflejado en la salida del instrumento, no sólo contemplando las características propias de la frecuencia de vibración en puente, sino también la forma en que es recolectada la información. Se debe considerar, además, la resolución en frecuencia necesaria para la adecuada interpretación de los datos, lo que se estableció de acuerdo a las necesidades de los expertos.

Como se mencionó en la sección 1.2 las frecuencias naturales de vibración de los puentes son típicamente menores a los 11 Hz, y mucha de la información que se obtiene del espectro en frecuencia de la señal *cruda*, recibida de los sensores, no aporta mayor información al análisis. Es por esto que luego definir la frecuencia de muestreo, fue necesario el desarrollo de filtros que permitieran eliminar las componentes no deseadas. Para esto, se debió definir los tipos de filtros a implementar, basado en el comportamiento de la respuesta en frecuencia del filtro, en la banda pasante; y en la banda de rechazo.

3.3 Selección de la plataforma

Para alcanzar el objetivo de obtener un sistema de bajo costo, se procedió a realizar una búsqueda de sistemas basados tanto en microprocesadores como microcontroladores, para desarrollar el sistema empujado. Durante esta búsqueda, fue necesario considerar la restricción tanto de que la operación del sistema debe ser en línea y que el tiempo de muestreo debe ser lo más uniforme posible. Bajo estas premisas, tanto la memoria del sistema, la posibilidad de realizar multitarea, y el determinismo en la ejecución fueron tomados en cuenta, resultando de este punto, el enfoque de utilizar un sistema operativo que permitiera la opción de definir prioridades a las tareas críticas (como la tarea encargada del muestreo) para asegurar el determinismo y el cumplimiento de los *deadlines* [18].

Por otra parte, además de los sistemas basados en microprocesadores y microcontroladores, también se consideró el utilizar un dispositivo lógico programable (FPGA) para la aplicación, opción que se descartó, tomando como base que la implementación de nuevas funciones en el equipo sería muy limitada considerando que es un hardware de aplicación específica. Además, el tiempo de desarrollo aumentaría considerablemente, en detrimento

del costo económico del dispositivo.

3.4 Implementación

Para llevar a cabo la implementación es necesario en primera instancia, evaluar las opciones existentes en cuanto a sistemas operativos de tiempo real, por ejemplo, se debe tener en cuenta las capacidades del sistemas operativo como soporte de *drivers*, tamaño del sistema, plataformas soportadas y precios. Entre la alterativas se tuvieron sistemas operativos de tiempo real como *VxWorks* [32] y herramientas para el desarrollo de sistemas operativos a la medida como el proyecto Yocto, el cual permite crear distribuciones de Linux personalizadas, para una amplia gama de arquitecturas de hardware [33]. Luego de seleccionado el sistema operativo se procede a migrar las bibliotecas de software necesarias para el desarrollo del sistema y el desarrollo del código para el procesamiento y adquisición de la información.

Capítulo 4

Sistema para el análisis de vibración

En este capítulo se exponen los pasos seguidos en el desarrollo de la solución, iniciando con la determinación de las características del sensor y la plataforma para la adecuada recolección y procesamiento de los datos. Además, se establecen los criterios para la selección de la frecuencia de muestreo. Por último se presenta el diseño del software y las estrategias para la reducción del consumo de potencia del sistema.

4.1 Características del sensor de aceleración

Como ya se abordó en capítulos anteriores, las frecuencias de vibración en puentes de carretera son típicamente menores a los 11 Hz, con amplitudes de entre los 10 mg y 620 mg. Para establecer adecuadamente los requisitos del sensor es necesario considerar algunas otras variables que no forman parte de la magnitud física a medir, por ejemplo la temperatura, que puede afectar el funcionamiento de los instrumentos de medición. Según los monitoreos realizados en los últimos años por el Instituto Meteorológico Nacional[27], las temperaturas en el país varían entre los 13.4 °C y 36.6 °C, es por esto que el sensor a utilizar debe presentar poca sensibilidad a los cambios de temperatura. Además, teniendo en cuenta que el sistema puede estar expuesto directamente a factores como la lluvia, el viento y la radiación solar, el rango de temperaturas a las que el dispositivo debe trabajar aumenta.

Con base en las consideraciones anteriores el sensor de aceleración debe cumplir con las restricciones de la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Características del sensor [14]

Rango de medición	[10 mg, 620 mg]
Ancho de banda	[0 Hz, 11 Hz]
Rango de temperatura	[13.4 °C, 36.6 °C]
Frecuencia de muestreo	> 22 Hz

Como se pudo observar en la sección 2.4, para definir la frecuencia de muestreo es necesario conocer el ancho de banda de la señal analógica. Por lo que, para el enfoque de esta tesis, la tasa de muestreo debe ser como mínimo de 22 Hz, pero es necesario tener en cuenta otras implicaciones del muestreo antes de definir dicha frecuencia. Además, se debe tener claro que aunque en este documento se trata de establecer criterios generales basado en los estudios realizado por el laboratorio y algunos otros investigadores, es necesario realizar un análisis previo de la estructura, con el objetivo de determinar si los criterios de la tabla 4.1 son igualmente aplicables y, además, si los rangos de medición se adecuan a las características del puente en particular.

4.2 Selección de sensor de aceleración

Con base en las características anteriores, se procedió a la búsqueda de un sensor adecuado a las necesidades del problema. Se analizaron dos tipos de acelerómetros, los piezoeléctricos y los microelectromecánicos (MEMS), donde se encontró que aunque los primeros son ampliamente utilizados en las mediciones de vibración, tienen diferentes inconvenientes, por ejemplo, para realizar mediciones dinámicas, como las vibraciones, se debe acondicionar la señal de salida del transductor utilizando un amplificador, además son sensibles al efecto triboeléctrico en sus cables [25]. Por otra parte, los acelerómetros MEMS, aunque poseen una relación señal a ruido menor que los sensores piezoeléctricos, no se ven afectados por el ruido triboeléctrico, además son de bajo costo debido a su proceso de fabricación [14]. Es por esta razón que se escogió el acelerómetro MEMS ADXL345 [9], el cuál se describe en la tabla 4.2. Este tiene la ventaja de ser de bajo consumo de potencia, aproximadamente $250 \mu\text{W}$ a la frecuencia de operación utilizada.

Tabla 4.2: Especificaciones del acelerómetro ADXL345.

Resolución (2g)	4 mg/LSB
Frecuencia de muestreo	[6.25 Hz, 3.2 kHz]
Temperatura	[-40°C , 105°C]
Costo aproximado	\$ 25

De la tabla 4.2 se puede observar que el mismo cumple con todos los requisitos expuestos en la tabla 4.1.

4.3 Establecimiento de la frecuencia de muestreo

La técnica de sobremuestreo permite mejorar la relación señal a ruido, por lo que es conveniente utilizar una frecuencia de muestreo mayor a 22 Hz, además según lo expuesto en la sección 2.3 entre mayor sea el número de muestras de la señal, al momento de aplicar la DFT mayor será la resolución en el espectro, por lo que se estableció la frecuencia de

muestreo más alta admitida, correspondiente a 625 Hz. Ya que la lectura de los datos provenientes del sensor toma aproximadamente 1.53 ms, si se disminuye el periodo de muestreo, no será posible cumplir con el *deadline* de la tarea.

4.4 Características de la plataforma

Luego de conocer la naturaleza de la señal y los rangos de operación del dispositivo, además de establecer los criterios de selección de sensor, se debieron definir los requisitos de la plataforma para el procesamiento de la información. Para dicha tarea se consideraron algunos de los conceptos utilizados en la fabricación de productos basado en *System on Chip* (SoC) expuestos en la sección 2.7.

Dado que el objetivo de ésta tesis es obtener un sistema de bajo costo, y dada la necesidad de un dispositivo fácilmente configurable para adaptarse a las características de las diferentes estructuras, además considerando la posibilidad de agregar más funciones de acuerdo a las necesidades que se les presentan a los expertos en el análisis de vibraciones, este documento se enfoca en una solución basada en una plataforma predefinida, que permita implementar las funcionalidades necesarias por medio de software.

Luego de este punto, fue necesario determinar cuál de las tecnologías de hardware predefinido ofrece la posibilidad de implementar todas las funcionalidades requeridas, realizando una comparación entre los microprocesadores y los microcontroladores.

Aunque conceptualmente los microprocesadores son iguales a los microcontroladores, estos últimos tienen un conjunto de instrucciones más reducido, menor capacidad de cálculo y memoria[34], lo que dificulta la ejecución de tareas complejas o con alta demanda de almacenamiento; los microcontroladores carecen de sistemas operativos robustos, lo que dificulta la ejecución de tareas en paralelo. Dado que se busca una plataforma que permita ejecutar tareas de forma simultánea para el muestreo y procesamiento de la señal, además del almacenamiento de una gran cantidad de datos y la posibilidad de agregar nuevas funcionalidades a futuro, se eligió un sistema basado en microprocesador, ya que además de ofrecer las cualidades antes mencionadas, permite la ejecución de un sistema operativo, con el cual es posible migrar bibliotecas de software altamente validadas para la implementación de las funciones, por ejemplo la transformada rápida de Fourier en la obtención del espectro en frecuencia de la señal de vibración.

4.5 Selección de la plataforma

Para la implementación del prototipo del sistema, se escogió la plataforma de evaluación BeagleBone Black ya que además de ser de bajo costo, soporta el uso de un sistema operativo como es el caso de linux y su versión del kernel de tiempo real, de igual manera, permite la conexión sencilla de periféricos a travez de diversos protocolos de comunicación

RS-232, Ethernet, SPI, I2C, USB, etc. Dicho dispositivo es de bajo consumo de potencia y posee las características de la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Especificaciones de la plataforma BeagleBone Black [10].

Procesador	AM3359AZCZ100, 1GHz
SRAM	512MB DDR3L, 400MHz
Flash	2GB eMMC, uSD
Sistema operativo	Si
Potencia	210-460 mA@5 V
Costo aproximado	\$ 50

Con base en las características mencionadas, se puede determinar que la plataforma es apta para el desarrollo de la aplicación.

4.6 Diseño e implementación del software

Como se mencionó en la sección 1.2 la variación en el periodo de muestreo ocasiona el corrimiento de las frecuencias obtenidas en el espectro de la señal de vibración, por lo que fue necesario asegurar el determinismo de dicho periodo, tanto para el desarrollo del software, como la selección del sistema operativo.

4.6.1 Software para la recolección de la información

De acuerdo con los conceptos expuestos en la sección 2.5.1 la tarea de muestreo se encuentra dentro de la clasificación de *soft real time*, ya que aún cuando su *deadline* se sobrepasa, los datos mantienen información relevante para el análisis, pero es necesario minimizar la cantidad de veces que esto ocurre. Para asegurar la calendarización periódica y uniforme de la tarea de adquisición de la información, y como parte de los aportes de esta tesis, se planteó la alternativa de utilizar un sistema operativo de tiempo real para la administración de los recursos de la plataforma y permitir la ejecución “simultánea” de distintos procesos. Los RTOS presentan regiones críticas pequeñas en comparación con un sistema operativo convencional, lo que permite a una tarea ser atendida rápidamente por el procesador una vez se encuentre en la cola de *listo*, reduciendo así la variación en los tiempos de ejecución.

Durante la selección del sistema operativo se evaluaron algunas de las opciones comerciales, donde se encontró que estas eran, en algunos casos, limitadas o de paga, lo que aumenta el costo del equipo y restringe su funcionalidad. Es por esto que se eligió utilizar el *Proyecto Yocto*, ya que es una herramienta gratuita, configurable y ofrece soporte completo para la plataforma de evaluación.

Para la construcción del RTOS a la medida de la plataforma, se utilizó una *imagen*

mínima de tiempo real, la cual contiene únicamente los componentes necesarios para que el dispositivo pueda arrancar, sin incluir interfaz gráfica o software adicional. Esto permite tener un sistema operativo con muy poco *overhead* y bajo consumo de potencia, donde la mayor parte de las aplicaciones a utilizar deben ser porteadas a la plataforma por medio del *toolchain*, el cual es posible construirlo con Yocto.

Algunas de las bibliotecas utilizadas por la aplicación fueron insertadas en la imagen durante la construcción de la misma, mediante la creación de recetas que le indican a la herramienta, entre otras cosas, la versión de descarga del código fuente y los comandos de compilación.

Una vez creado el sistema operativo de tiempo real se procedió al desarrollo de la aplicación, iniciando con la tarea de muestreo de las señales de vibración. Como se ha mencionado antes, la adquisición de los datos de aceleración deber ser realizada de forma precisa para que el espectro en frecuencia extraído de las señales represente el comportamiento del puente. Es por esto que fue necesario asignarle a dicha tarea la máxima prioridad (99) y utilizar el algoritmo de calendarización SCHED_RR para que ninguna de las tareas del sistema operativo acapare el uso de los recursos. A continuación se presenta el segmento de código que permite definir la prioridad y el algoritmo de calendarización a utilizar:

```

struct param;

param.sched_priority = sched_get_priority_max(SCHED_RR);

if(sched_setscheduler((pid_t) 0, SCHED_RR, &param) == -1) {
    exit(-1);
}

```

Para convertir el proceso de adquisición de los datos en una tarea periódica, se utilizó un temporizador (*timer*) de tiempo real que permite establecer el tiempo de disparo con una precisión de microsegundos.

```

struct sigaction sa;
struct itimerval timer;

memset (&sa, 0, sizeof (sa));
//Tarea periodica
sa.sa_handler = &sampling_rt;
sigaction (SIGALRM, &sa, NULL);

//Frecuencia de muestreo 625 Hz
timer.it_value.tv_usec = 1600;
timer.it_interval.tv_usec = 1600;

timer.it_value.tv_sec = 0;
timer.it_interval.tv_sec = 0;
setitimer (ITIMER_REAL, &timer, NULL);

```

4.6.2 Software para el análisis de la información

Definido el periodo de muestreo, y debido a que las frecuencias de interés son las que se encuentran por debajo de los 11 Hz, se implementó un filtro paso bajos elíptico de orden tres, ya que son los más eficientes cuando se desea conseguir el filtro de orden mínimo para un conjunto dado de especificaciones [29]. Para definir el orden del filtro, se buscó obtener una atenuación mínima de 20 dB en la banda pasante a 20 Hz; la figura 4.1 muestra la respuesta en frecuencia de cuatro filtros elípticos de distinto orden, con una frecuencia de corte de 12 Hz, siendo el de orden tres el más simple, que cumple con el requisito.

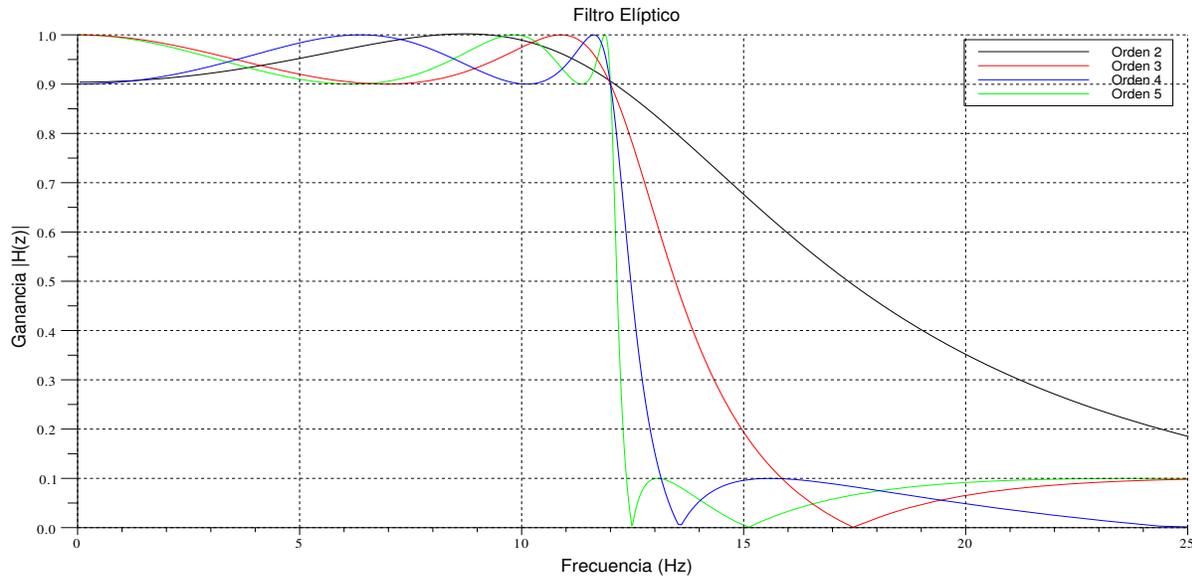


Figura 4.1: Respuesta en frecuencia de filtros elípticos de distinto orden.

La implementación del filtro se realizó en forma directa II, ya permite reducir el número de variables y por ende el consumo de memoria. La ecuación de diferencias utilizada se muestra en la ecuación (4.1).

$$\begin{aligned} h(n) &= x(n) + 0.8865h(n-3) - 2.7563h(n-2) + 2.8686h(n-1) \\ y(n) &= 0.0371h(n-3) - 0.0731h(n-2) + 0.0371h(n-1) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Para realizar el análisis de los datos, el primer paso fue definir la biblioteca de software a utilizar para el cálculo de la transformada de Fourier, donde se encontró que la FFTW (*Fastest Fourier Transform in the West*) es una de las implementaciones de la DFT más utilizadas y *premiada*, debido a su alto nivel de optimización [13]. Por otra parte, la biblioteca posee banderas que le permiten habilitar instrucciones SIMD (Single instruction, multiple data) como ARM Neon, debido a que la plataforma BeagleBone Black posee un procesador ARM con soporte para Neon, la biblioteca se compiló utilizando dichas banderas para aumentar la velocidad de cálculo.

Luego se procedió a definir el tamaño de la ventana de información a procesar para obtener el espectro de la señal. Para esto, se utilizaron dos criterios, la resolución en la

frecuencia asociada a los cambios en la rigidez y la excitación producida por los vehículos al circular por el puente. Con una frecuencia máxima de muestreo de 625 Hz, la única forma de aumentar la resolución en el espectro y evitar la dispersión de la potencia; fue aumentar la cantidad de datos que se procesan en cada una de las transformadas. Con base en los resultados obtenidos durante los experimentos y mediante la ecuación (4.2), derivada de la ecuación (2.3), se estableció un total de 32768 muestras, lo que permite teóricamente, apreciar cambios menores al 1% en la rigidez de la estructura, a partir de una resolución en frecuencia de 19,07 mHz. Además este número es potencia de 2, lo que según la implementación en la biblioteca FFTW, permite el cálculo eficiente de la DFT .

$$\Delta k = 2\omega m \Delta\omega \quad (4.2)$$

Para obtener dicha cantidad de muestras, se debe recopilar información durante un periodo de 52.43 s, lo que permite capturar un mayor número de excitaciones. Por ejemplo en un puente de 100 m de largo con una velocidad promedio de circulación de 40 km/h, se podrán obtener excitaciones completas de aproximadamente 6 vehículos.

En la figura 4.2 se muestra un diagrama de flujo de la aplicación básica de muestreo y análisis de la información, donde el diagrama de la izquierda representa el flujo principal del programa, y el de la derecha el hilo paralelo que se ejecuta luego de iniciada la DFT.

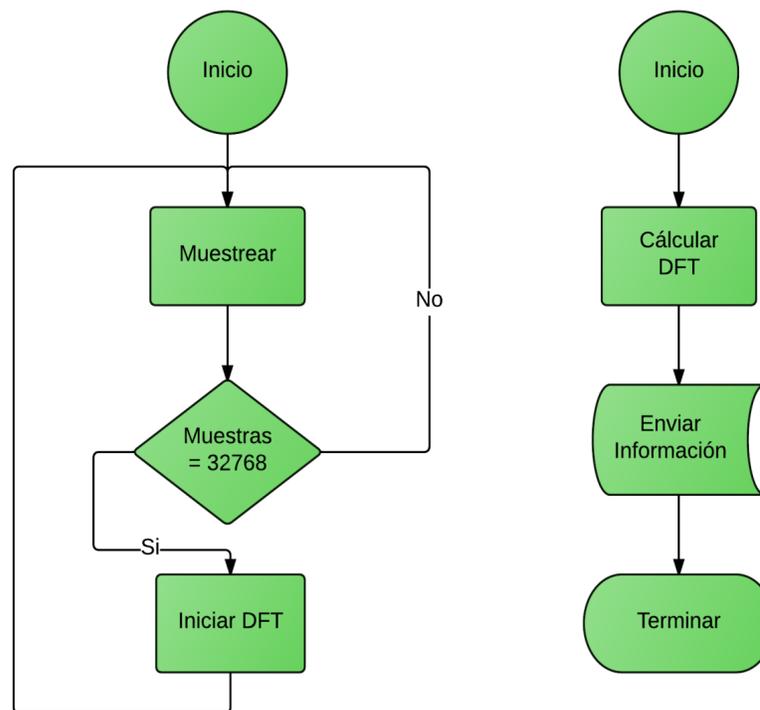


Figura 4.2: Software básico para la adquisición y análisis de las señales de vibración.

4.7 Reducción del consumo de potencia

Como se abordó en el capítulo 1, uno de los retos del proyecto es desarrollar un sistema de bajo consumo de potencia y según lo expuesto en [39], la recolección de información del ambiente y la comunicación son las tareas de mayor demanda energética, es por esto que el trabajo se enfoca en estas dos áreas.

Aunque en este trabajo no se implementa la comunicación del dispositivo, este es uno de los trabajos futuros, por lo que en el documento se aborda la reducción del consumo de energía al momento de la transmisión.

4.7.1 Adquisición y procesamiento de la información

Para reducir el consumo de potencia se implementaron dos técnicas, una para disminuir la cantidad de datos que se deben procesar y otra para reducir la frecuencia de muestreo.

La reducción de los datos a procesar se basa en que la respuesta dinámica del puente se atenúa con el tiempo luego de una excitación. Si no existe una fuerza actuando de forma continua sobre el puente (personas, vehículos, viento, etc), no se podrán extraer frecuencias de vibración, haciendo inútil el procesamiento de los datos. Definiendo un valor mínimo de aceleración para el cual el dispositivo inicia el tratamiento de la señal, se evita el procesamiento innecesario, lo que reduce el tiempo en que se ejecuta la tarea de análisis y por consiguiente el consumo de energía.

El umbral de activación se definió de forma experimental en 50 mg esto con base en las mediciones realizadas en el puente sobre el río Virilla en la ruta 32, para las cuales se pudo apreciar que las excitaciones debidas a vehículos livianos en su mayoría no permitieron distinguir ninguna frecuencia en el espectro, y las señales de vibración no superaron los 40 mg. Por otra parte, vehículos pesados como furgones y vagonetas sí permitieron identificar los modos de vibración de la estructura, con aceleraciones iniciales superiores a las 80 mg. Es importante destacar que dicho valor de activación es configurable y dependerá de las características de cada uno de los puentes, por ejemplo el tráfico promedio diario (TPD), la rigidez y la masa de la estructura, además del criterio de los expertos. Con esta modificación no se necesita una frecuencia de muestreo alta cuando el umbral de activación no se ha superado, ya que no se calcula el espectro de la señal, por lo que se redujo la frecuencia de muestreo a 25 Hz en dichos periodos, cumpliendo aún con el teorema de muestreo para no perder información. En el momento en que se superan los 50 mg el dispositivo aumenta la frecuencia de muestro a la original y realiza el análisis de los datos. Cuando finaliza la ventana de adquisición, el equipo disminuye nuevamente la frecuencia de muestreo a la espera de un nuevo estímulo.

Otra de las ventajas del umbral es la reducción de la cantidad y la frecuencia de los datos que deben ser transmitidos por el equipo, disminuyendo el costo de la comunicación. Además, la DFT retorna un espectro con frecuencias desde los 0 Hz a los 312.5 Hz, donde

la información relevante se encuentra en los primeros 11 Hz, por lo que únicamente es necesario enviar un 3.52% de los datos calculados por la transformada.

En la figura 4.3 se muestra un diagrama de flujo del software, luego de la implementación del umbral de medición.

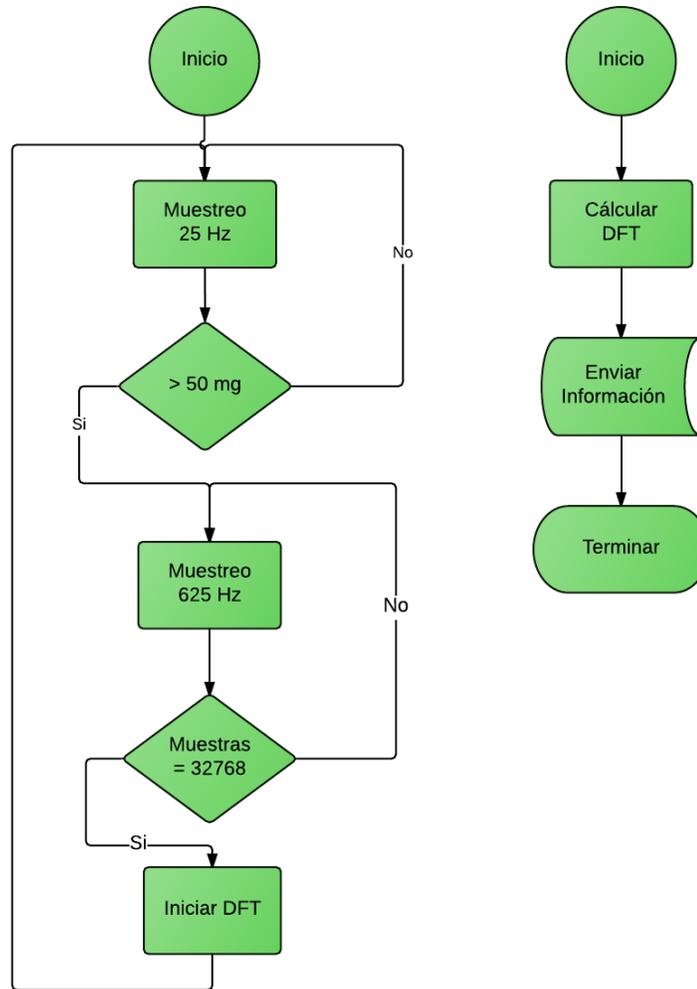


Figura 4.3: Software optimizado para la adquisición y análisis de las señales de vibración.

4.7.2 Cálculo de la frecuencia de máxima potencia

Además de utilizar una imagen de tiempo real mínima, así como disminuir la cantidad de información procesada y muestrear a una frecuencia menor, se planteó que el equipo envíe datos únicamente cuando ocurra un desplazamiento de la frecuencia(s) de vibración. Para esto, se encontró el punto de mayor potencia en el espectro (frecuencia natural) y se calculó un promedio de la frecuencia del espectro actual y de espectros anteriores, esto porque las variaciones, ya sea en la temperatura o en el muestreo de la señal, pueden provocar pequeñas diferencias entre máximos.

Para el cálculo de la frecuencia promedio, el equipo extrae la frecuencia de máxima po-

tencia en el espectro actual, y obtiene el valor medio entre esta y las frecuencias de los espectros anteriores por medio de la ecuación (4.3).

$$\bar{f} = \frac{f_{max}(n) + f_{max}(n-1) + f_{max}(n-2) + \dots + f_{max}(n-k)}{k} \quad (4.3)$$

Para determinar que ocurrió un desplazamiento de la frecuencia de vibración, se debieron definir límites aceptables de corrimiento, basado en el método de Helmut Wenzel [41] de calcular umbrales de forma estadística para definir condiciones normales de operación. Se estableció un límite de desplazamiento en frecuencia de una desviación estándar (σ) con respecto al promedio, a partir del cual, el dispositivo debe enviar una alarma. Cabe resalta que dicho umbral debe ser programado en el dispositivo.

Capítulo 5

Resultados y análisis

En este capítulo se abordan las pruebas realizadas para la validación de la solución, así como los resultados y su análisis; iniciando con la validación del tiempo de muestreo de las señales de vibración y los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio y su comparación con el modelo teórico, además de las mediciones del consumo de potencia del dispositivo en sus diferentes formas de operación. Por otra parte, se muestran los resultados obtenidos en las mediciones realizadas en el puente sobre el río Virilla en la ruta Nacional número 32 y su comparación con las mediciones hechas por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).

5.1 Validación de la frecuencia de muestreo

Para verificar que el periodo de muestreo de la señal se mantiene uniforme durante la ejecución del programa, cuando se utiliza un sistema operativo de tiempo real y definiendo una alta prioridad a la tarea de adquisición de la información, se realizaron mediciones del tiempo transcurrido entre cada una de las atenciones a la tarea de muestreo, obteniendo los resultados mostrados en la tabla A.1, sintetizados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Variación del periodo de muestreo con y sin calendarización de tiempo real.

	Con calendarización de Tiempo Real (μs)	Sin calendarización de Tiempo Real (μs)
Máximo	1616	1809
Mínimo	1582	1574
Máximo - Mínimo	34	235
Desviación Estándar	4,6	38,9

Durante la medición se obtuvieron un total de 70 muestras consecutivas cuando la aplicación se ejecuta con y sin prioridades de tiempo real, donde, al utilizar un el algoritmo de calendarización FIFO se obtuvo una mejora porcentual del 691% cuando se compara

la diferencia entre mínimo y máximo en ambos casos. Por otro lado, cuando se compara la desviación estándar, dicha mejora ronda el 739%, lo que comprueba que utilizar un algoritmo de calendarización de tiempo real mejora sustancialmente el determinismo en el tiempo de muestreo.

Para ilustrar las implicaciones de los resultados obtenidos en el espectro en frecuencia, se simuló una variación temporal no determinista entre $0 \mu\text{s}$ y la desviación estándar de ambos resultados. Como se puede observar en la figura 5.1 la variación de la frecuencia en el peor de los casos (utilizando como referencia una frecuencia alta en el espectro) cuando se utiliza calendarización de tiempo real es de 10 mHz, lo cual es despreciable, debido a que se encuentra dentro de la incertidumbre del equipo (19.07 mHz).

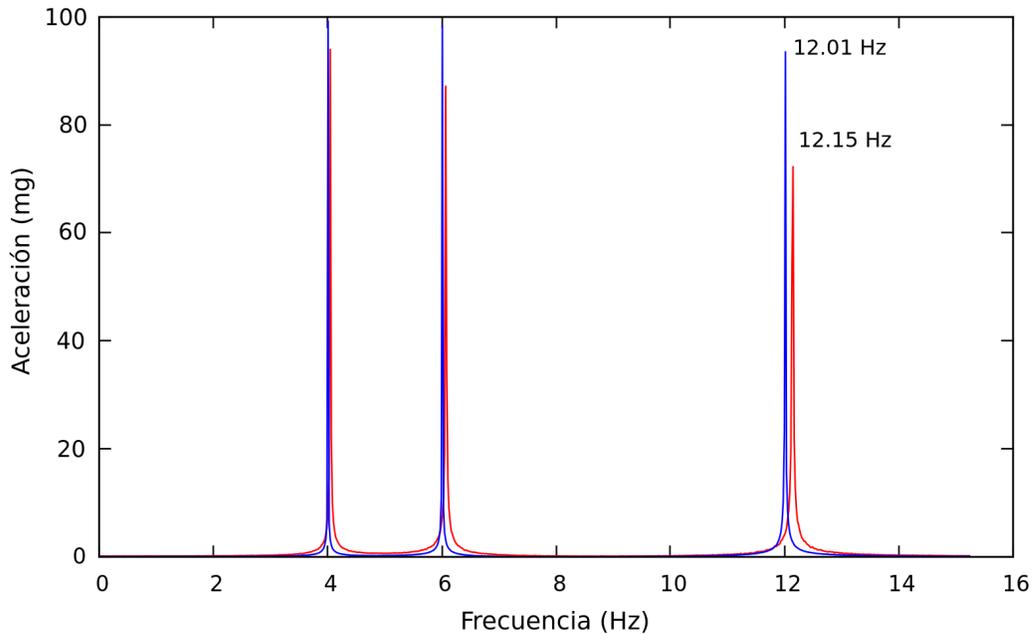


Figura 5.1: Comparación de la variación del jitter con calendarización de tiempo real (azul) y sin calendarización de tiempo real (rojo).

5.2 Validación de las frecuencias extraídas

Durante las pruebas de funcionamiento del equipo, se realizaron mediciones en dos perfiles cuadrados lisos, cuyas características se muestran en la tabla 5.2. El dispositivo se ubicó en el centro de la viga, a 2.5 m de los apoyos como se muestra en la figura 5.2.

Las excitaciones utilizadas fueron golpes de distinta magnitud y se aplicaron en puntos aleatorios en la viga, obteniendo para una de las ventanas, los resultados mostrados en la figura 5.3. Este experimento se realizó durante 30 minutos, lo que permitió capturar múltiples espectros de la señal, obteniendo una única frecuencia natural de vibración. La frecuencia a la que se obtuvo el máximo valor de potencia para cada una de las ventanas

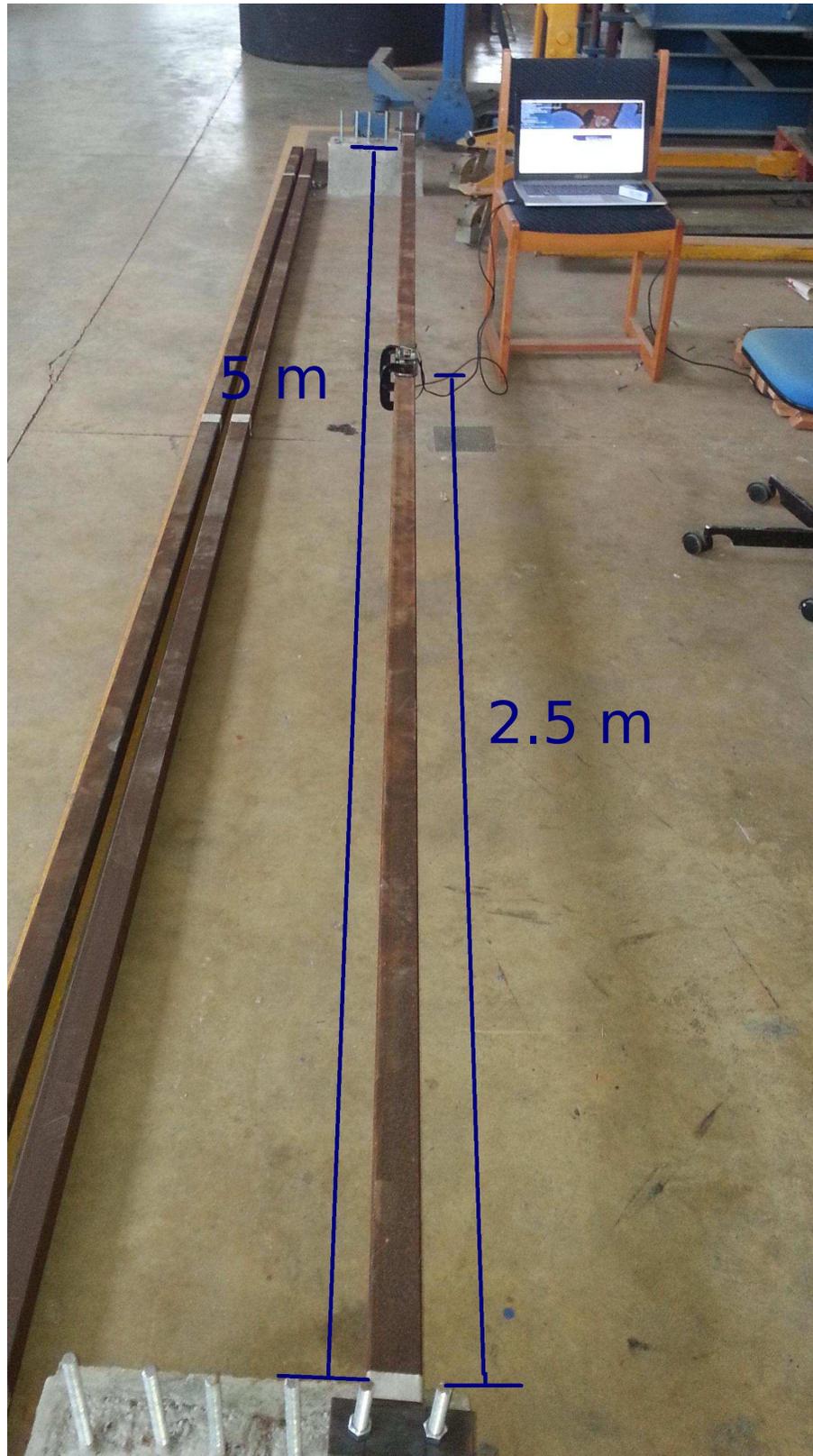
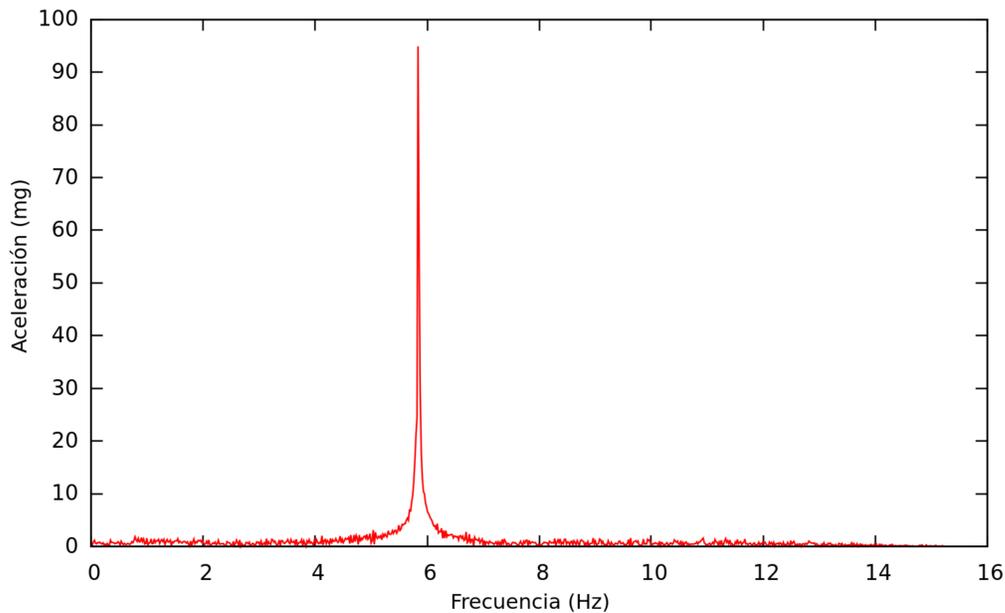


Figura 5.2: Colocación del dispositivo sobre la viga durante la pruebas.

Tabla 5.2: Características de los perfiles cuadrados utilizados en las pruebas [38].

Largo (l)	6 m
Ancho exterior	5.5 cm
Espesor de la pared	2.5 mm
Momento de Inercia (I)	16.93 cm ⁴
Módulo de Elasticidad (E)	2100000 kg/cm ²
Peso por metro lineal	3.6 kg/m

se muestra en la tabla 5.5. Como se puede observar de dicha tabla, el promedio de las frecuencias de vibración se encuentra en 5.92 Hz.

**Figura 5.3:** Espectro de potencia obtenido de la viga simplemente apoyada.

Como se vió en la sección 2.2, la frecuencia de vibración teórica se puede obtener a partir de la masa y la constante elástica. Para calcular k' a partir de la ecuación (2.4), se utilizaron las tablas de características de los perfiles y el módulo de elasticidad longitudinal del acero. Dado que la distancia entre apoyos fue de 5 m, la masa suspendida fue de 18 kg, pero se debió considerar que el modelo utilizado, asume una masa puntual en el centro de viga, por lo que para realizar el cálculo, se utilizó la mitad de la masa suspendida, obteniendo un valor de k' de 1365.23 kg/m.

Además del cálculo de la rigidez teórica, se realizaron pruebas de flexión a uno de los perfiles, aplicando carga en el centro de la viga, donde se obtuvieron los resultados de la tabla 5.3.

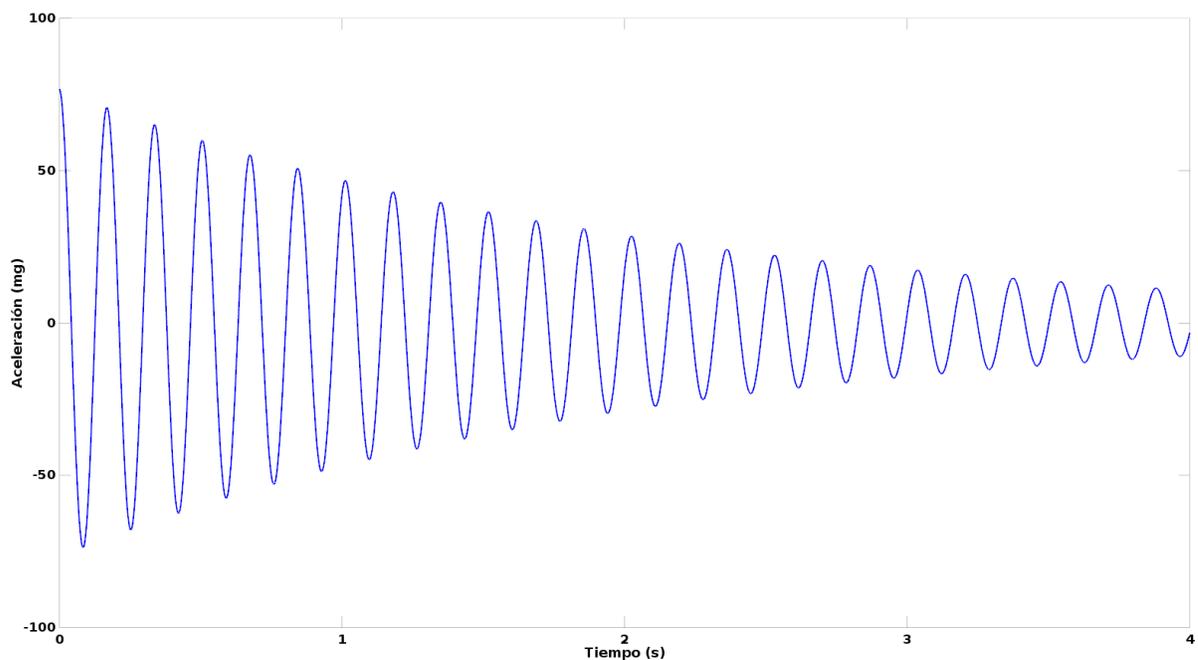
Con el fin de aproximar lo mejor posible la frecuencia de vibración teórica, y luego de verificar que los resultados de las pruebas de flexión concuerdan con el valor calculado, se utilizó la rigidez promedió de los experimentos (1297.05 kg/m) para obtener la frecuencia.

Tabla 5.3: Resultados de las pruebas de flexión realizadas al perfil.

Carga (kg)	Desplazamiento (cm)	k' (kg/m)
32.5	2.5	1300
35.8	2.7	1325.92
29.1	2.3	1265.22

Sustituyendo en la ecuación (2.3), frecuencia de vibración calculada fue de 5.98 Hz. Al comparar la frecuencia de vibración teórica con resultado experimental, se obtuvo un error del 1%, lo que indica que el dispositivo permite conocer de forma precisa las frecuencias naturales de vibración.

Además de la comparación de las frecuencias, se utilizaron las constantes calculadas; para ajustar los valores del modelo de la ecuación (2.6). Luego, se introdujo dicho modelo a la herramienta *octave*, para simular la respuesta de la viga ante una excitación tipo escalón. La figura 5.4 muestra las oscilaciones obtenidas, durante los primeros 4 s.

**Figura 5.4:** Respuesta del modelo de la viga ante una perturbación.

Luego de esto, se extrajo un fragmento de la señal de vibración en el tiempo, de una de las mediciones realizadas a las vigas (figura 5.5). De aquí se puede observar, que las respuesta son casi idénticas, tanto en amortiguamiento como periodo, confirmando así la validez del modelo y los resultados obtenidos.

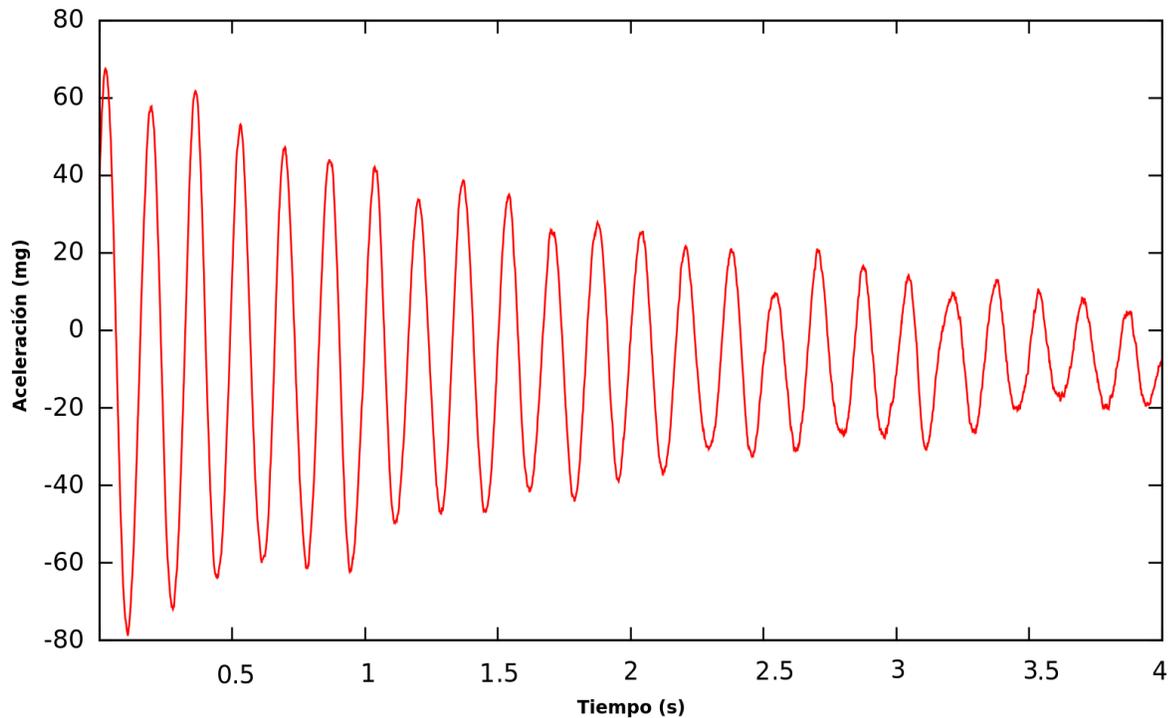


Figura 5.5: Medición de aceleración en uno de los perfiles durante los experimentos.

5.3 Validación de la reducción del consumo de potencia

Una de las ventajas de utilizar el Proyecto Yocto, fue que la herramienta permite la creación de imágenes a la medida de la plataforma, lo que implica una mayor eficiencia del sistema operativo. Por este motivo, se realizaron mediciones del consumo energético del dispositivo en distintas condiciones de operación.

Para validar que se redujo la potencia consumida por el equipo, cuando se utiliza el sistema operativo a la medida, se midió el consumo de energía del RTOS y de un sistema operativo estándar, específicamente Debian-7.8. Obteniendo los resultados de la tabla 5.4.

Como se puede observar, la potencia consumida por el equipo cuando se ejecutó el sistema operativo de tiempo real, es mucho menor (37.23%) que cuando se utilizó la imagen de Debian. Esto cuando no se ejecuta ninguna tarea adicional de las propias del sistema operativo.

Otra de las estrategias para reducir la potencia, fue el definir un umbral de aceleración mínima para la adquisición de los datos, por debajo del cual el equipo reduce la frecuencia de muestreo. En la tabla 5.4 también se muestra la potencia requerida en ambos modos de operación. Obteniendo una disminución en la potencia del 16.28% cuando se muestrea baja frecuencia, y una mejora del 71.79% con respecto al consumo de la plataforma, cuando no se ejecuta la tarea de muestreo. Es importante señalar que aún cuando el

Tabla 5.4: Consumo de potencia del BeagleBone Black en mW para distintas frecuencias de muestreo.

Distribución	Sin muestreo	Con muestreo de baja frecuencia	Con muestreo de alta frecuencia
Debian-7.8	1489,7	-	-
Linux-rt-3.14	935,1	1012,5	1209,5

equipo muestrea a 625 Hz la potencia es menor que la consumida con la imagen de Debian.

Para reducir los datos enviados por el dispositivo, se planteó emitir alertas únicamente cuando ocurre un desplazamiento de la frecuencia de vibración, mayor a una desviación estándar. Para definir las condiciones normales de operación, se realizaron múltiples mediciones de la frecuencia natural en uno de los perfiles, las cuales se muestran en la tabla 5.5. Para dichas frecuencias, el promedio calculado fue de 5,922 Hz y la desviación estándar de 77,624 mHz, lo que permitió definir el intervalo de frecuencias aceptables entre {5.844 Hz, 6 Hz}.

Luego de esto, se realizó corte transversal en el perfil, con el objetivo de cambiar su rigidez. El daño causado se muestra en la figura 5.6, la profundidad del corte fue de 1 cm y se ubicó a 15 cm del centro de viga. Luego de esto, se procedió a realizar nuevamente las mediciones de las frecuencias naturales de vibración, obteniendo los resultados de la tabla 5.5.



Figura 5.6: Profundidad y ubicación del daño en el perfil.

Con base en los resultados de la tabla se calculó la frecuencia promedio, obteniendo un valor de 5.732 Hz, que se encuentra fuera del rango normal de operación, por lo que el dispositivo debe enviar una alerta de daño.

En la figura 5.7 se puede apreciar una comparación de los espectros extraídos de la viga, antes y después del daño.

Luego de esta prueba, se realizaron mediciones en otro de los perfiles, donde se extrajo un total de 30 frecuencias de vibración que se muestran en la tabla 5.5. La frecuencia promedio calculada por el dispositivo fue de 5.964 Hz lo que indica que la viga no presenta ningún daño.

Tabla 5.5: Frecuencia de vibración de los perfiles con y sin daño.

Número de espectro	Perfil 1 sin daño (Hz)	Perfil 1 dañado (Hz)	Perfil 2 sin daño (Hz)
1	5.875	5.703	5.989
2	5.817	5.741	6.084
3	5.951	5.741	6.008
4	5.741	5.741	6.104
5	6.142	5.703	5.97
6	5.817	5.684	5.913
7	5.817	5.741	5.894
8	5.817	5.741	5.913
9	5.97	5.76	5.913
10	5.875	5.76	5.856
11	5.97	5.722	5.913
12	5.989	5.779	5.894
13	5.875	5.741	6.065
14	5.913	5.722	6.104
15	5.875	5.722	6.18
16	5.989	5.684	6.008
17	5.951	5.722	5.97
18	5.951	5.741	5.913
19	5.989	5.684	6.008
20	5.951	5.722	5.97
21	5.989	5.722	5.913
22	5.932	5.76	5.989
23	5.894	5.703	5.97
24	5.856	5.703	5.951
25	5.951	5.722	5.913
26	5.951	5.76	5.856
27	5.97	5.779	5.932
28	5.951	5.779	5.913
29	5.989	5.741	5.913
30	5.913	5.741	5.894

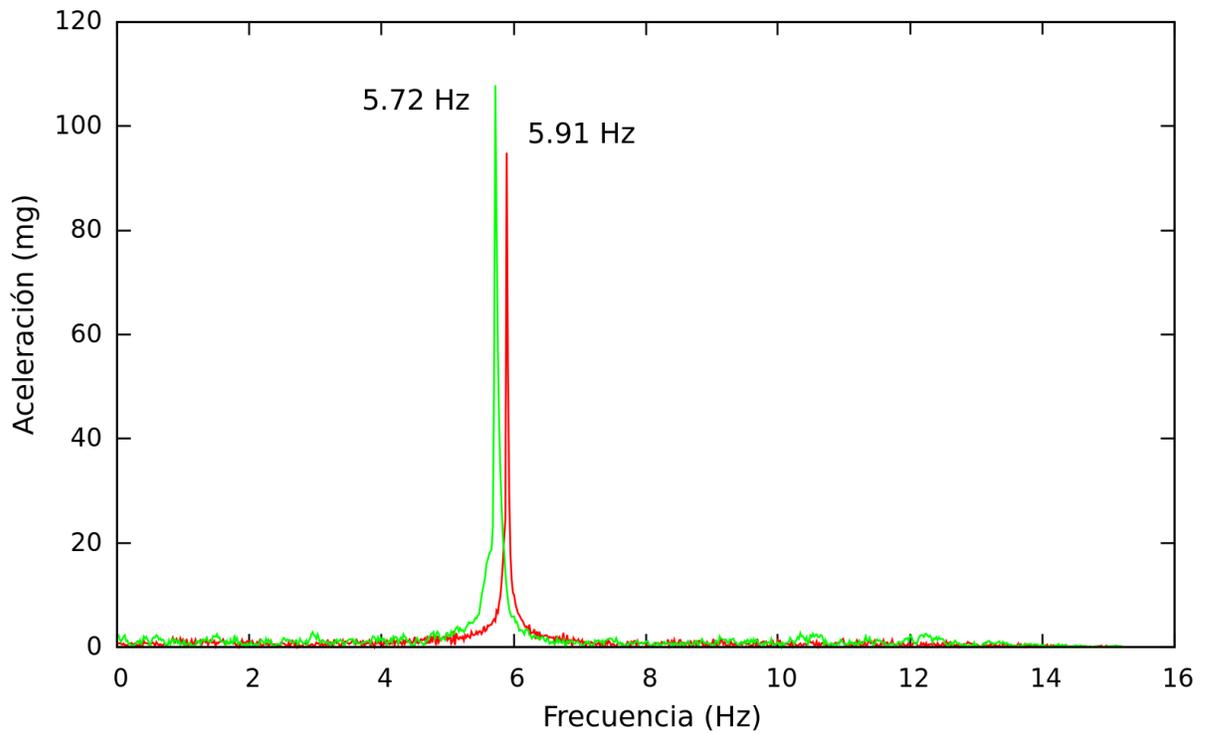


Figura 5.7: Espectro en frecuencia de la viga con y sin daño.

Además de las pruebas en el laboratorio, se realizaron mediciones en el tramo 4 de la superestructura 2 del puente sobre el río Virilla en la ruta 32, esto con el objetivo de realizar una comparación con las mediciones hechas por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), presentadas en agosto en el Congreso de Estructuras 2015 [2]. En la figura 5.8 se observa una elevación con la identificación de los elementos del puente, además del punto donde se realizaron las mediciones y en la tabla 5.6, se muestran las frecuencias modales identificadas en el monitoreo del LanammeUCR.

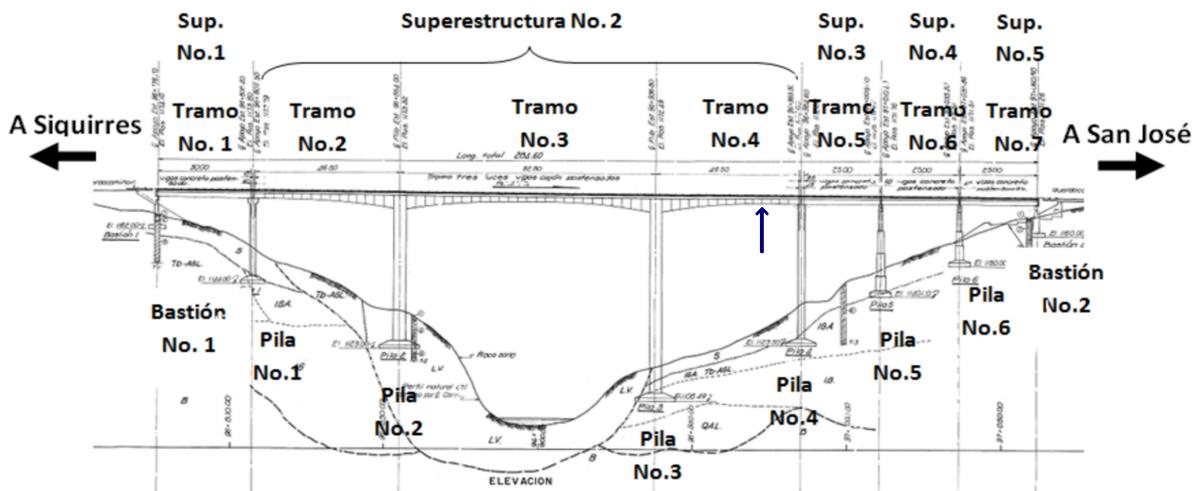


Figura 5.8: Elevación e identificación de elementos del puente sobre el río Virilla en la ruta 32 [2].

Durante las mediciones realizadas se pudieron identificar tres de los modos de flexión vertical en el tramo 2, el modo 2, 3 y 5. Como se observa en la figura 5.9, lo que demuestra la capacidad del equipo de identificar los distintos modos de vibración de un puente.

Un aspecto importante de mencionar es que aunque se hicieron varias visitas al puente, solo se pudieron realizar mediciones en el tramo 4 debido a las condiciones climáticas.

Tabla 5.6: Frecuencia de las formas modales identificadas por el LanammeUCR.

Modo	Frecuencia (Hz)
1 flexión vertical	1.372
2 flexión vertical	2.509
3 flexión vertical	2.936
4 flexión vertical	3.446
5 flexión vertical	3.744
6 flexión vertical	4.072

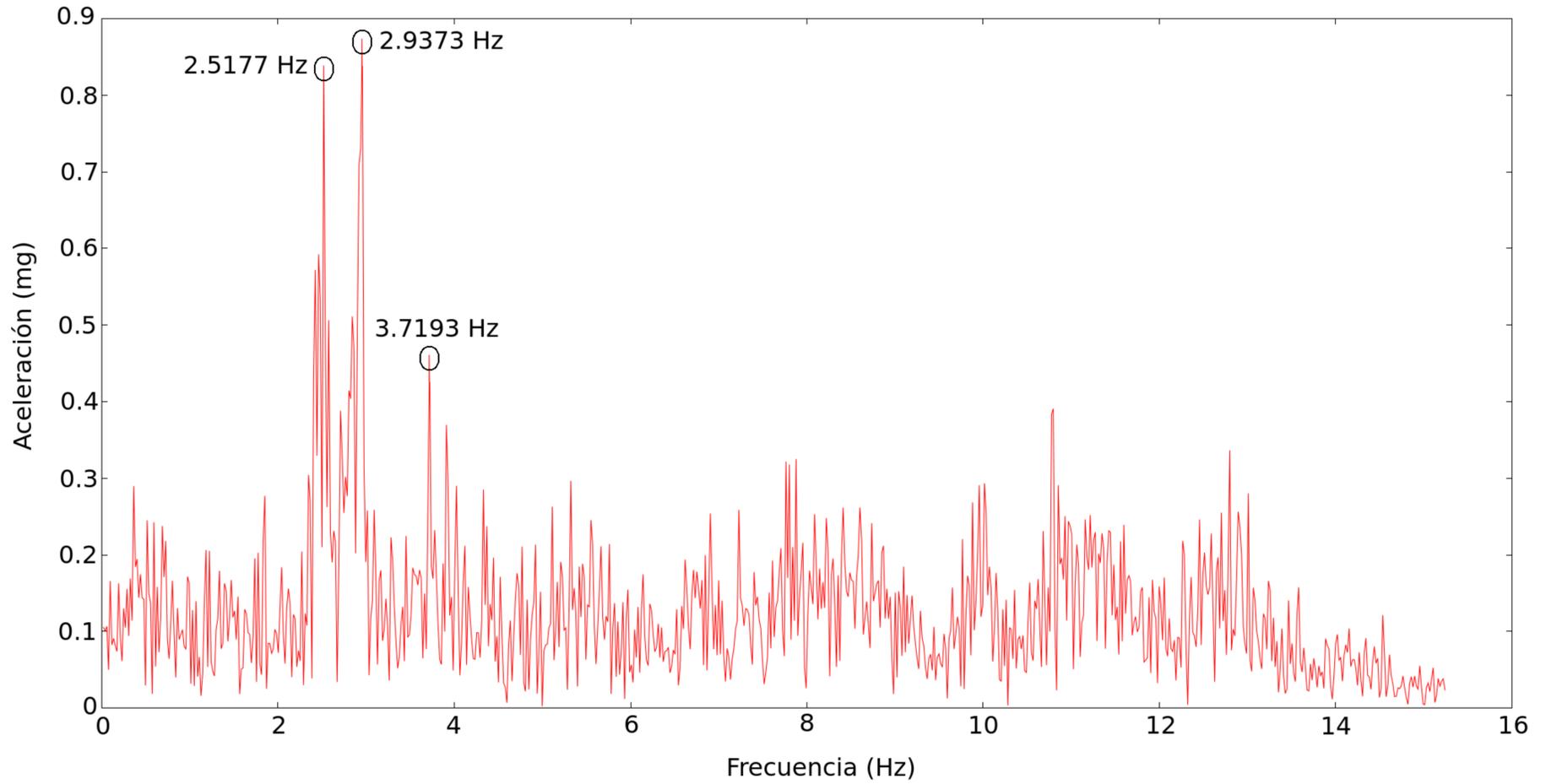


Figura 5.9: Mediciones de aceleración en el tramo 4 del puente sobre el río Virilla en la ruta 32.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

Uno de los principales aportes de esta tesis es el procesamiento en línea de las señales de vibración, por medio de un dispositivo de bajo costo y consumo de potencia, que además permite la implementación de múltiples funcionalidades, manteniendo un muestreo uniforme de la señal.

De este trabajo se determinaron las características del sistema de adquisición, procesamiento y análisis de las señales de vibración de puentes en tiempo real, brindando un método para la mantener un muestreo uniforme de las aceleraciones, mientras se realiza procesamiento paralelo, donde se logró obtener una mejora del 691% en la variación de periodo de muestreo cuando se utiliza calendarización de tiempo real, reduciendo considerablemente el corrimiento de las frecuencias en el espectro. Además, en las pruebas realizadas se determinó, que el dispositivo permite detectar cambios en la constante elástica menores al 1%.

Por otra parte, se logró una reducción del 62.8% de la potencia consumida por el Begle-Bone Black al utilizar una imagen de Linux a la medida, y una mejora del 71.8% cuando el dispositivo, debido a la falta de excitación, reduce su frecuencia de muestreo.

Además, se lograron identificar tres de los modos de vibración del puente sobre el río Virilla, realizando mediciones en un único punto. Aún así, se recomienda realizar nuevamente una visita al puente y medir en distintos puntos de la superestructura 2, para poder identificar todos los modos de vibración encontrados en el estudio del LanammeUCR.

Otra de las recomendaciones si se desea realizar un monitoreo continuo de la estructura, es realizar mediciones en el puente durante un día completo, permitiendo capturar información en distintas condiciones de temperatura y tráfico, con el fin de obtener los rangos de operación normal y realizar activaciones esporádicas del dispositivo, en las cuales, se mida la frecuencia promedio de vibración y en caso de no encontrar daño, este se desactive, con el objetivo de reducir aún más la potencia consumida.

Dado que uno de los atributos del dispositivo es que permite agregar nuevas funcionalidades, se recomienda, que al realizar modificaciones al software se repitan las mediciones

del periodo de muestreo, para asegurar que se mantienen las características descritas en este documento. Además, se recomienda utilizar un sensor de mayor sensibilidad en la adquisición de las aceleración, con el objetivo de capturar las frecuencias de vibración debidas a excitaciones de baja amplitud.

Bibliografía

- [1] Japan International Cooperation Agency. The study on capacity development in bridge rehabilitation planning, maintenance and management based on 29 bridges of national highway network in costa rica. 2007.
- [2] P. Agüero Barantes, Y. Liu Kuan, and R. Barrantes Jiménez. Monitoreo y análisis del puente sobre el río virilla en ruta nacional no. 32. In *Congreso de Estructuras 2015 y XIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica*, 2015.
- [3] P. Alvarado. *Notas de Clase*. 2011. URL <http://www.ie.itcr.ac.cr/palvarado/PDS/pds.pdf>.
- [4] Peter Barry and Patrick Crowley. *Modern embedded computing: designing connected, pervasive, media-rich systems*. Elsevier, 2012.
- [5] Shannon C. E. Communication in the presence of noise. *Proc. Institute of Radio Engineers*, 37(1):10–21, 1949.
- [6] FJ Carrión, A Lozano, MJ Fabela, D Vázquez-Vega, and JA Romero-Navarrete. Evaluación de puentes mediante análisis de vibraciones. *Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., México*, 1999.
- [7] Ray W Clough and Joseph Penzien. *Dynamics of Structures. Berkeley, CA, USA: Computers & Structures. Inc*, 2003.
- [8] A Cunha, E Caetano, P Ribeiro, and G Müller. Structural health monitoring of cable-supported bridges based on vibration measurements. In *Structural Dynamics, 2014. EURO-DYN 2014. 9th International Conference on*, pages 65–72, 2014.
- [9] Analog Devices. Adxl345 digital accelerometer data sheet. *Analog Devices, Inc., One Technology Way, PO Box, 9106*.
- [10] DigiKey. Beaglebone black, beagleboard, beagleboard-xm - texas instruments — digikey [online]. 2015. URL <http://www.digikey.com/en/product-highlight/t/texas-instruments/beagleboard>.
- [11] Rolando Salgado Estrada. Damage detection methods in bridges through vibration monitoring: evaluation and application. 2008.

- [12] Manuel de Jesús. Fabela-Gallegos et al. alteración de la rigidez y de la frecuencia de vibración debida a corrosión en vigas de concreto reforzado. pages 989–997, 2002.
- [13] Matteo Frigo and Steven G. Johnson. The design and implementation of FFTW3. *Proceedings of the IEEE*, 93(2):216–231, 2005. Special issue on “Program Generation, Optimization, and Platform Adaptation”.
- [14] GF Galindo. Construcción y validación de un sensor de vibraciones usando un sistema micro-electro-mecánico (mems), 2010.
- [15] Marcela Guzmán. Proyecto ebridge [online]. 2012. URL <http://www.conicit.go.cr/boletin/boletin119/Proyecto-eBridge.html>.
- [16] Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory. *Trans. AIEE*, 47(1):617–644, 1928.
- [17] Francisco Navarro Henríquez and Daniel Ureña Muñoz. Mediciones y análisis de vibraciones en el puente del virilla. *Investiga. TEC*, (22):16, 2015.
- [18] E Douglas Jensen, C Douglas Locke, and Hideyuki Tokuda. A time-driven scheduling model for real-time operating systems. In *RTSS*, volume 85, pages 112–122, 1985.
- [19] J. Jia. *Essentials of Applied Dynamic Analysis*. Risk Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2014. URL <https://books.google.co.cr/books?id=ACbomAEACAAJ>.
- [20] Sukun Kim, Shamim Pakzad, David Culler, James Demmel, Gregory Fennes, Steven Glaser, and Martin Turon. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on*, pages 254–263. IEEE, 2007.
- [21] Qing Li and Caroline Yao. *Real-time concepts for embedded systems*. CRC Press, 2003.
- [22] Nicolas A Londono. *Use of vibration data for structural health monitoring of bridges*. PhD thesis, University of Ottawa, 2006.
- [23] F Magalhães, A Cunha, and E Caetano. Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated oma to damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28:212–228, 2012.
- [24] Grant Martin, H Chang, L Cooke, M Hunt, A McNelly, and L Todd. *Surviving the SOC Revolution: A Guide to Platform-Based Design*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [25] Daniel Monje Centeno. Conceptos electrónicos en la medida de la aceleración y la vibración, 2010.
- [26] Isabel Cristina Morera Rojas. Análisis dinámico y propuesta de instrumentación del puente sobre el río grande en el proyecto ciudad colón-orotina. 2004.

- [27] Instituto Meteorológico Nacional. Datos climáticos [online]. 2013 [visitado el 21 de abril de 2017]. URL <http://www.imn.ac.cr>.
- [28] Shamim N Pakzad, Sukun Kim, Gregory L Fenves, Steven D Glaser, David E Culler, and James W Demmel. Multi-purpose wireless accelerometers for civil infrastructure monitoring. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM 2005)*, 2005.
- [29] John G Proakis and Dimitris G Manolakis. *Tratamiento digital de señales*. Pearson Educación, 4 edition, 2007.
- [30] Yocto Project. About | Yocto Project [online]. 2013. URL <https://www.yoctoproject.org/about>.
- [31] Giannina Ortiz Quesada. Proyecto ebridge: Predicción remota de fallas en puentes. *Revista Ingeniería en Construcción*, 1(1):8–11, 2014.
- [32] Wind River. Vxworks, the real-time operating system [online]. 2015. URL <http://www.windriver.com/products/vxworks>.
- [33] Otavio Salvador and Daiane Angolini. *Embedded Linux Development with Yocto Project*. Packt Publishing Ltd, 2014.
- [34] Enrique Sanchís. *Sistemas electrónicos digitales: fundamentos y diseño de aplicaciones*, volume 61. Universitat de València, 2002.
- [35] Guillermo Santana. Respuesta dinámica de la superestructura del puente virilla rn-1. 2011.
- [36] John A Stankovic et al. Real-time computing. *Byte*, *pág*, pages 155–162, 1992.
- [37] Nader Nabil Aziz Tadros. Structural damage detection using ambient vibrations, 2014.
- [38] Troglia D. Troglia G. and Godoy B. Tablas perfiles laminados y tubos estructurales [online]. 2005. URL <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/tablas.pdf>.
- [39] Narseo Vallina-Rodriguez, Christos Efstratiou, Geoffrey Xie, and Jon Crowcroft. Enabling opportunistic resources sharing on mobile operating systems: Benefits and challenges. In *Proceedings of the 3rd ACM workshop on Wireless of the students, by the students, for the students*, pages 29–32. ACM, 2011.
- [40] Gabriel Vargas Morales. Análisis modal de sección atirantada del puente sobre el río tempisque. 2004.
- [41] Helmut Wenzel. *Health monitoring of bridges*. John Wiley & Sons, 2008.

- [42] Stana Živanović, ALEKSANDAR Pavić, and Paul Reynolds. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of sound and vibration*, 279(1):1–74, 2005.

Apéndice A

Periódicos de muestreo

Como parte la validación del determinismo en la frecuencia de muestreo del equipo, se realizaron las mediciones de la siguiente tabla. Estas muestran el tiempo transcurrido entre cada una de las lecturas del acelerómetro.

Tabla A.1: Mediciones del periodo de muestreo.

Sin calendarización de tiempo real (μs)	Con calendarización de tiempo real FIFO (μs)
1618	1597
1589	1599
1575	1596
1591	1599
1607	1599
1589	1597
1588	1598
1611	1596
1593	1589
1737	1609
1604	1598
1591	1599
1629	1598
1574	1598
1589	1598
1618	1598
1592	1598
1587	1597
1609	1600
1691	1599
1584	1597
1611	1598

1607	1598
1580	1598
1595	1598
1593	1599
1617	1598
1616	1598
1626	1597
1809	1600
1625	1597
1632	1615
1592	1582
1623	1597
1617	1598
1585	1598
1610	1598
1614	1597
1690	1616
1585	1582
1613	1598
1599	1598
1610	1597
1574	1599
1608	1598
1576	1598
1588	1599
1613	1596
1641	1599
1597	1597
1579	1599
1588	1599
1614	1596
1578	1600
1604	1598
1577	1597
1619	1599
1581	1596
1651	1600
1602	1599
1625	1597
1589	1598
1595	1599

1623	1597
1593	1598
1591	1599
1630	1599
1591	1596
1715	1606
1613	1597

