



UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis para optar el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Tesis de Grado

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA EN LAS FRECUENCIAS DE VIBRAR EN UN PUENTE
METÁLICO**

Autor

Verónica Céspedes Álvarez

Tutor

Alejandro Carvajal Soto

Lector

Gerardo Chacón Rojas

Heredia, agosto 2022



CARTA SEGMENTADA DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

Estimados señores:

En mi calidad de tutor, como miembro del Tribunal Examinador, confirmo la aprobación del siguiente Trabajo Final de Graduación para optar por Licenciatura en Ingeniería Civil.

- Determinación Experimental del Efecto de la Temperatura en las Frecuencias de Vibrar en un Puente Metálico
- Tesis
- Verónica Céspedes Álvarez
- 31/08/2022

LUIS ALEJANDRO
CARVAJAL SOTO
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
LUIS ALEJANDRO CARVAJAL
SOTO (FIRMA)
Fecha: 2022.09.01 11:48:06
-06'00'

Alejandro Carvajal Soto



CARTA SEGMENTADA DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

Estimados señores:

En mi calidad de lector, como miembro del Tribunal Examinador, confirmo la aprobación del siguiente Trabajo Final de Graduación para optar por Licenciatura en Ingeniería Civil.

- Determinación Experimental del Efecto de la Temperatura en las Frecuencias de Vibrar en un Puente Metálico
- Tesis
- Verónica Céspedes Álvarez
- 31/08/2022

GERARDO
ENRIQUE
CHACÓN
ROJAS (FIRMA)

Firmado digitalmente
por GERARDO
ENRIQUE CHACÓN
ROJAS (FIRMA)
Fecha: 2022.09.01
18:04:47 -06'00

Gerardo Chacón Rojas

San Carlos, 6 de setiembre de 2022

Señores:

Departamento de registro

Universidad Latina De Costa Rica

Facultad De Ingeniería Y Tecnologías De Información

Escuela De Ingeniería Civil

Estimados señores:

La estudiante, Verónica Céspedes Álvarez, cédula de identidad número 208100786, me ha presentado para efectos de corrección de estilo, el trabajo de investigación denominado: "Determinación experimental del efecto de la temperatura en las frecuencias de vibrar en un puente metálico".

El cual sea elaborado para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

He revisado, de acuerdo con los lineamientos de corrección de estilo señalados por la Universidad, los aspectos de estructura gramatical, acentuación, ortografía, puntuación y los vicios de dicción que se trasladan al escrito, y he verificado que se han realizado las correcciones indicadas al documento.

Por lo tanto, doy fe de que este trabajo se encuentra listo para ser presentado oficialmente a la Universidad.

Atentamente,



Monserrath Céspedes Morera

Cédula de identidad n° 207080270

Carné Colegio de Licenciados y profesores n° 0896822

Carné Asociación de filólogos de Costa Rica n° 336

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Verónica Céspedes Álvarez estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual del Tesis titulado:

Determinación experimental del efecto de la temperatura en las frecuencias de vibrar en un puente metálico.

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Heredia, 31/08/2022



Verónica Céspedes

Álvarez

**Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso
didáctico)Universidad Latina de Costa Rica**

Yo (Nosotros):	Verónica Céspedes Álvarez
De la Carrera / Programa:	Ingeniería Civil Licenciatura
Modalidad de TFG:	Tesis
Titulado:	Determinación experimental del efecto de la temperatura en las frecuencias de vibrar en un puente metálico.

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el “**AUTOR**”), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la “**OBRA**”). **SEGUNDO:** El **AUTOR** autoriza y cede a favor de la **UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L.** concédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la “**UNIVERSIDAD**”), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la **OBRA** necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la **OBRA** con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El **AUTOR** acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la **UNIVERSIDAD** no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El **AUTOR** garantiza la originalidad de la **OBRA**, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la **OBRA**, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del **AUTOR** y este garantiza mantener indemne a la **UNIVERSIDAD** ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El **AUTOR** se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la **UNIVERSIDAD**. **SEXTO:** La presente autorización y cesión se regirá por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la

República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el **AUTOR** y la **UNIVERSIDAD**, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El **AUTOR** acepta que la **UNIVERSIDAD**, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO:** El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD.**, el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD.** puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO:** El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO:** El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO.**
La presente autorización se extiende el día

31

Agosto

2022

18:00

Firma del estudiante(s):



Dedicatoria

El proyecto se lo dedico a Dios por guiarme en estos años de estudio y darme la fuerza para culminar mi carrera universitaria, por la sabiduría que he obtenido en este proceso y por permitirme sonreír ante cada logro que he obtenido.

A mi madre Marta Álvarez Gamboa y mi tía Xinia Álvarez Gamboa por ser un pilar en mi vida y siempre estar a mi lado desde pequeña inculcándome la disciplina de estudiar y obtener grandes logros en la vida, a mis hermanos por su compañía en este proceso universitario siempre motivándome a luchar por lo sueños y no rendirme fácilmente.

Agradecimientos

Primeramente, le agradezco a Dios por la oportunidad de tener una experiencia universitaria tan exitosa y permitirme concluir esta etapa de mi vida. Gracias a la universidad por la formación académica y por convertirme en una profesional, a mis seres queridos por la confianza brindada en este proceso.

A cada profesor que me aportó de sus conocimientos durante estos años para formarme como profesional y en especial al ingeniero Alejandro Carvajal Soto por guiarme en este proyecto de graduación y su disposición en ayudarme. Agradezco al ingeniero Gerardo Chacón Rojas por su apoyo en este proceso y brindarme de sus conocimientos, también al ingeniero Giovanni Arguedas Morales por estar presente a lo largo de la carrera apoyándome y confiando en mis proyectos.

Agradezco a Globalvía por otorgarme los permisos necesarios para llevar a cabo este trabajo de investigación.

Resumen

A través de esta investigación se determinarán las variaciones del comportamiento dinámico de un puente metálico vehicular, a distintas temperaturas ambientales. El puente seleccionado se ubica sobre la Ruta Nacional 27 y se encuentra sobre la Quebrada Salitral.

Los monitoreos de salud estructural son útiles para la identificación de las variaciones en el comportamiento dinámico de las estructuras los cuales son una herramienta valiosa para lograr evaluar las condiciones de las estructuras civiles.

La ocurrencia de daño en estructuras puede identificarse por medio de las variaciones de las frecuencias de los distintos modos de vibrar; Considerando que la masa permanece constante durante la vida útil de una obra, la rigidez vendría a ser el factor más sensible a variar, la cual es el parámetro que el daño puede afectar, ya que el daño puede flexibilizar a la estructura, provocando cambios en los modos de vibrar correspondientes.

La razón de variación de las frecuencias (frecuencia sin daño/frecuencia con daño) producto de daño en las estructuras es aún no clara; razón por la cual, es importante saber qué otros agentes pueden provocar variaciones en estas frecuencias y que sean considerados a la hora de la determinación de ocurrencia, o no, de daño.

A través de esta investigación se va a identificar las variaciones en frecuencia de un puente metálico debido a los cambios de la temperatura ambiental a distintas horas del día.

Se utiliza una metodología con enfoque cuantitativo para tomar datos experimentales de aceleración del puente, a través de un acelerómetro; realizar un análisis matemático con los datos obtenidos y obtener las frecuencias de los modos principales a distintas temperaturas tomadas desde horas de la madrugada, hasta la tarde. Dicho procedimiento permite considerar un barrido de la condición ambiental sobre el puente.

El análisis de los datos de aceleración fue llevado a frecuencias mediante la herramienta informática ADDA la cual trabaja a través del programa Matlab.

Se logró determinar que las variaciones de temperatura provocaron cambios en las frecuencias de vibrar en el puente que van desde los 0,16% hasta 0,81%, estos resultados deben ser considerados al determinarse cualquier daño en la estructura producto de cualquier tipo evento (terremotos, huracanes, impactos a la estructura, entre otros).

Palabras claves: temperatura- frecuencias- monitoreo-vibraciones-ambiental-estructuras.

Abstract

This research will determine the variations in the dynamic behavior of a metallic vehicular bridge at different environmental temperatures. The selected bridge is located on National Route 27 and is over the Salitral Ravine.

Structural health monitoring is useful for identifying variations in the dynamic behavior of structures, which is a valuable tool for evaluating the condition of civil structures.

The occurrence of damage in structures can be identified by means of the variations in the frequencies of the different modes of vibration; considering that the mass remains constant during the useful life of a structure, the stiffness would be the most sensitive factor to vary, which is the parameter that damage can affect, since damage can make the structure more flexible, causing changes in the corresponding modes of vibration.

The frequency variation ratio (frequency without damage/frequency with damage) resulting from damage in structures is still not clear; therefore, it is important to know which other agents can cause variations in these frequencies and to be considered when determining whether or not damage occurs.

This research will identify the frequency variations of a steel bridge due to changes in ambient temperature at different times of the day.

A methodology with a quantitative approach is used to take experimental acceleration data of the bridge, through an accelerometer; perform a mathematical analysis with the data obtained and obtain the frequencies of the main modes at different temperatures taken from early morning to late afternoon. This procedure allows considering a sweep of the environmental condition on the bridge.

The analysis of the acceleration data was carried out using the ADDA software tool, which works through the Matlab program.

It was determined that the temperature variations caused changes in the vibration frequencies of the bridge ranging from 0,16% to 0,81%. These results should be considered when determining any damage to the structure as a result of any type of event (earthquakes, hurricanes, impacts to the structure, among others).

Keywords: temperature-frequency-monitoring-vibration-environmental-structures.

Tabla de contenido

Dedicatoria.....	vii
Agradecimientos.....	viii
Resumen.....	ix
Abstract.....	xi
Índice de Figuras.....	xvi
Índice de Tablas	xviii
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Objetivo General.....	5
1.4 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Justificación.....	5
1.6 Alcances y limitaciones	7
1.6.1 Alcances	7
1.6.2 Limitaciones.....	7
1.7 Impacto	8
1.7 Hipótesis.....	8
2 Fundamentación teórica.....	9
2.1 Puentes metálicos.....	9
2.1.1 Superestructura	10
2.1.2 Subestructura.....	10
2.2 Puentes metálicos en Costa Rica.....	10

2.3 Inspecciones de puentes.....	12
2.3.1 Inspecciones en el puente río Quebrada Salitral ruta N°27	14
2.4 Acelerómetros para monitoreo estructural del puente	17
2.4.1 Monitoreos con acelerómetros en el puente Quebrada Salitral N°27	18
2.5 Frecuencias a vibrar	23
2.6 Modo de Vibrar.....	24
2.7 Efecto de la temperatura en estructuras metálicas	25
2.8 Dominio del tiempo y la frecuencia.....	26
2.9 Procedimiento de análisis	28
2.9.1 Filtro paso bajo	28
2.9.2 Hanning.....	29
2.9.3 Transformada de Fourier.....	30
2.9.3.1 Transformada Discreta de Fourier (TDF).....	32
2.9.3.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	33
2.9.4 Smothing	34
3 Marco Metodológico	35
3.1 Paradigma	35
3.2 Enfoque metodológico.....	35
3.3 Métodos de investigación	36
3.4 Categorías de análisis de investigación.....	37
3.4.1 Comprobaciones	37
3.5 Técnicas de muestreo.....	37
3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	38

3.7 Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de los datos	40
4 Análisis de resultados	41
4.1 Monitoreo.....	41
4.1.1 Espectro de Fourier	41
4.1.2 Espectrogramas	49
4.1.3 Modos y temperatura	56
4.1.4 Variaciones de temperatura con respecto a las frecuencias de vibrar	61
4.2 Discusiones	63
4.2.1 Variaciones de temperatura.....	63
4.2.2 Condiciones de Contorno.....	63
4.2.3 Tramos adyacentes.....	63
5 Conclusiones	64
6 Recomendaciones	65
7 Referencias bibliográficas	66
8 Anexos	71
6 Glosario.....	74

Índice de Figuras

Figura 1 Cantidad de superestructuras por tipo	11
Figura 2 Estructuras por prioridad de reparación	13
Figura 3 Planos del puente de Quebrada Salitral.....	14
Figura 4 Vista lateral del puente de Quebrada Salitral	15
Figura 5 Estructuras de puentes por Prioridad de Reparación en el Distrito de Hacienda Vieja, Orotina, Alajuela.	16
Figura 6 Registros de aceleración vertical del primer bloque de datos en el puente del río Quebrada Salitral.	19
Figura 7 Diagramas del promedio de frecuencias en el puente Quebrada Salitral ruta nacional N°27	21
Figura 8 Dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia	27
Figura 9 Filtro paso bajo.....	28
Figura 10 Ventana de Hanning	29
Figura 11 Formula de la Transformada de Fourier.....	31
Figura 12 Método de la Transformada de Fourier.....	31
Figura 13 Ecuaciones de la Transformada de Fourier Discreta (TDF).....	32
Figura 14 Ecuaciones de la Transformada Rápida de Fourier (FFT)	33
Figura 15 Gráfico con smothing	34
Figura 16 Punto medio donde se va realizar el monitoreo.	37
Figura 17 Equipo para monitoreo	38
Figura 18 Sensor GP2 X USB marca SENSR	39
Figura 19 Espectro de Fourier con dos smothing	42

Figura 20 Espectro de Fourier en la prueba 1	43
Figura 21 Espectro de Fourier en la prueba 2	43
Figura 22 Espectro de Fourier en la prueba 3	44
Figura 23 Espectro de Fourier en la prueba 4	45
Figura 24 Espectro de Fourier en la prueba 5	45
Figura 25 Espectro de Fourier en la prueba 6	46
Figura 26 Espectro de Fourier en la prueba 7	47
Figura 27 Espectro de Fourier en la prueba 8	47
Figura 28 Espectro de Fourier en la prueba 9	48
Figura 29 Espectrograma en la prueba 1	49
Figura 30 Espectrograma en la prueba 2	50
Figura 31 Espectrograma en la prueba 3	51
Figura 32 Espectrograma en la prueba 4	51
Figura 33 Espectrograma en la prueba 5	52
Figura 34 Espectrograma en la prueba 6	53
Figura 35 Espectrograma en la prueba 7	53
Figura 36 Espectrograma en la prueba 8	54
Figura 37 Espectrograma en la prueba 9	55
Figura 38 Frecuencias naturales y temperatura	57
Figura 39 Frecuencias naturales y temperatura del modo A	58
Figura 40 Frecuencias naturales y temperatura del modo B	58
Figura 41 Frecuencias naturales y temperatura del modo C	59
Figura 42 Frecuencias naturales y temperatura del modo D	59

Figura 43 Frecuencias naturales y temperatura del modo E.....	60
Figura 44 Frecuencias naturales y temperatura del modo F	60
Figura 45 Variación lineal de frecuencia vs temperatura	61
Figura 46 Máximas variaciones en frecuencia durante el día de monitoreo	62
Figura 47 Sensor GP2 x USB	71
Figura 48 Monitoreo en el puente Quebrada Salitral ruta 27	71
Figura 49 Pruebas de monitoreo en el puente Quebrada Salitral ruta 27	72
Figura 50 Costado del puente Quebrada Salitral ruta 27.....	72
Figura 51 Puente Quebrada Salitral ruta 27.....	73
Figura 52 Obstáculo físico.....	73

Índice de Tablas

Tabla 1 Formas modales identificadas en el puente de Quebrada Salitral	20
Tabla 2 Tabla resumen de la cantidad de modos y la frecuencia promedio	22
Tabla 3 Tabla de mediciones	56
Tabla 4 Tabla de temperaturas	57
Tabla 5 Tabla de máximas variaciones en frecuencia durante el día de monitoreo.....	62

1 Introducción

La ocurrencia de daño en cualquier estructura puede identificarse por medio de las variaciones de las frecuencias de los distintos modos de vibrar; Considerando que la masa permanece constante durante la vida útil de una obra, la rigidez vendría a ser el factor más sensible a variar, la cual es el parámetro que el daño puede afectar, ya que el daño puede flexibilizar a la estructura, provocando cambios en los modos de vibrar correspondientes.

La razón de variación de las frecuencias (frecuencia sin daño/frecuencia con daño) producto de daño en las estructuras es aún un tema que demanda mucha investigación; razón por la cual, es importante identificar qué otros agentes pueden provocar variaciones en estas frecuencias, y los mismos sean considerados a la hora de la determinación de ocurrencia, o no, de daño.

A través de esta investigación se va a identificar las variaciones en frecuencia de un puente metálico debido a los cambios de la temperatura ambiental a distintas horas del día. El puente seleccionado se ubica sobre la Ruta Nacional 27 y se encuentra sobre la Quebrada Salitral.

Las frecuencias de las estructuras son obtenidas por medio sistemas de monitoreo, ya sean discretos o continuos, los cuales obtienen, principalmente, valores de aceleración en el dominio del tiempo, y son llevados mediante procesamientos matemáticos al dominio de la frecuencia.

Los registros de aceleración del puente han sido captados gracias a la excitación de la estructura provocada por el paso de camiones y vehículos sobre el puente, y vibraciones ambientales como las generadas por el viento, principalmente.

1.1 Antecedentes

El desarrollo de la tecnología en la última década ha demostrado que puede facilitar las mediciones de parámetros dinámicos en estructuras tipo puente, a través de la utilización de sensores para captar vibraciones, y de esta manera inferir en qué condiciones se encuentra la estructura.

Los puentes pueden presentar variaciones de su geometría con los cambios de temperatura, de tal manera que estos cambios pueden provocar cambios en la rigidez de los puentes, por ende, de sus modos de vibrar.

El proyecto de investigación realizado por Rodríguez (2021), con el nombre de “Efectividad del uso de un sensor para la obtención de frecuencias de vibrar en los puentes río Virilla ruta N°27 y N°3, Quebrada Salitral ruta N°27, Costa Rica” demuestra que la utilización de un solo sensor es suficiente para obtener, con mucha precisión, valores de frecuencia de vibrar en puentes. Este estudio demostró que con un acelerómetro instalado estratégicamente en el puente se obtienen resultados similares a los estudios desarrollados anteriormente con el uso de múltiples sensores por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

El trabajo de investigación de Rodríguez (2021) se enfocó en los puentes mencionados, todos ellos, puentes de la red vial nacional. Al igual que en la presente investigación, se obtuvieron datos de aceleración en el dominio del tiempo. La obtención de datos se realizó en tres tramos de los puentes, en donde en cada tramo se realizaron mediciones cada 5 minutos. En cada segmento se realizó dos pruebas, logrando obtener las frecuencias con mayor claridad con el mayor flujo de vehículos pesados atravesando sobre la estructura. Los datos obtenidos en dominio del tiempo se transformaron a frecuencia y se obtuvo un promedio general por puente.

Dicha investigación tenía como objetivo, comparar los resultados logrados con los obtenidos por el monitoreo de esos mismos puentes realizado previamente por el Lanamme-UCR.

La comparación de las de frecuencias obtenidas por Rodríguez (2021) y el Lanamme-UCR, reflejan diferencias muy bajas, siendo en el puente río Virilla Ruta N°3 hasta un máximo de 6%; en el puente río Virilla Ruta N°27 hasta un máximo de 1%; y en el puente de quebrada Salitral Ruta N° 27 con un máximo de hasta 7%.

Evidentemente, al monitorear estructuras tipo puente con el uso de un solo sensor, se logran menores costos en las evaluaciones de las infraestructuras, asegurándose a la vez que los resultados en frecuencia son precisos.

Dichas pequeñas diferencias pueden no ser sólo dependientes de la cantidad de sensores instalados, sino también, de la temperatura ambiental a la hora de realizar las mediciones.

Así mismo, la investigación de Casares (2014), con el nombre de “Muestreo comprimido en red inalámbrica de sensores para la monitorización de vibración de puentes”, buscó la integridad en los datos y reducir el consumo energético mediante redes inalámbricas de sensores, y de igual manera, obtener datos en la monitorización de vibración en puentes a través de medios más eficientes.

También en Costa Rica, en el 2011, el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) hace uso de predicciones remotas de daños en puentes, acompañadas de inspecciones visuales para complementar los análisis.

En un estudio realizado por Navarro y Ureña (2015) denominado “Mediciones y análisis de vibraciones en el puente Virilla, ruta nacional N°1”, se realizó un análisis de tipo experimental y otro mediante un modelo analítico. Dicho estudio comparó las frecuencias obtenidas experimentalmente con las obtenidas analíticamente y los resultados marcaron diferencias de entre el 4% y 20%.

Un trabajo investigativo de Zolghadri (2015) basado en tres puentes en los Estados Unidos de América, con el nombre “Effects of Temperature on Bridge Dynamic Properties” [Efectos de la temperatura en las propiedades dinámicas de los puentes], concluye que los parámetros dinámicos de puentes están sujetos a cambios no sólo por daños estructurales, sino también por las condiciones ambientales, siendo la de mayor influencia, la temperatura.

Los puentes estudiados en Zolghadri (2015) son: el puente Perry, conformado por una viga prefabricada de concreto; un puente de California con vigas tipo cajón de concreto; y un puente en Salt Lake City, construido por medio de vigas de acero. Sobre dichos puentes se realizó primeramente una inspección visual, de tal manera que se pueda detectar los daños condiciones en que se encontraban, y se utilizó un equipo con sistema de monitoreo de salud estructural para la recopilación de los datos de vibración y de temperatura de forma periódica.

En el puente Perry las frecuencias fueron identificadas en un periodo de seis meses lo cual mostro que la variabilidad de los parámetros modales identificados puede ser tan grande como 19% en una temperatura promedio de 41 centígrados. En el puente de California las frecuencias se obtuvieron en un periodo de un mes, mostrando variaciones de los parámetros modales hasta 20%

en una temperatura promedio de 26,7 centígrados; las frecuencias de este puente aumentaron cuando la temperatura aumentó. Y por último, en el puente de Salt Lake City se realizó el monitoreo por un periodo de seis meses, y se demostró que la variación de los parámetros modales llegaron a ser tan grande como 22.5% en una temperatura promedio de 42,7 centígrados.

1.2 Planteamiento del problema

Los puentes normalmente están sometidos a cargas dinámicas durante toda su operación, lo cual hace que se produzcan efectos dinámicos de tipo vibratorios continuamente. Las características dinámicas de los puentes, y de toda estructura, dependen, principalmente, de la masa y la rigidez, por lo cual, la frecuencia correspondiente a cada uno de los modos de vibrar de las mismas, se ve afectada ante cualquier cambio de estos dos parámetros; si aumenta la masa, disminuye la frecuencia, y si la rigidez disminuye, las frecuencias también disminuyen.

Considerando que la masa de un puente generalmente permanece constante durante toda su vida útil, la rigidez vendría a ser el factor más sensible a variar, la cual es el parámetro que el daño puede afectar, ya que el daño puede flexibilizar a la estructura, provocando cambios en los modos de vibrar correspondientes.

La rigidez de las superestructuras de los puentes puede variar ante cambios de su momento de inercia (provocada por daños estructurales), así como a cambios de la longitud (como la provocada por la dilatación o contracción provocada por cambios de temperatura ambiental).

Según García, Garrido (2020). “Cuando los elementos estructurales sufren daño (fisuras, pandeo) se provoca una reducción en su rigidez, la estructura puede presentar cambios en su frecuencia o modo de vibración.” (p. 2).

En Costa Rica las labores de inspección periódica de puentes son muy limitadas respecto a recurso económicos y personal. Esto se refleja en los niveles de deterioro que tienen muchos de los puentes dentro del inventario nacional de puentes. Claro está, si existiera una rutina de inspección sobre esta estructura, se lograría identificar rápidamente los problemas o factores que producen daños, de tal forma que se implemente más rápido y a menor costo la solución.

A la fecha, en el país se han realizado monitoreos sobre varios puentes mediante sensores, pero estos monitoreos se han realizado en sólo muy pocos puentes de la red vial nacional; muchos

de ellos únicamente con una connotación más de investigación, que da seguimiento de la salud estructural.

Es evidente que, la cultura de monitoreo de puentes en Costa Rica no es común, sin embargo, si el proceso de monitorear puentes se realizara progresivamente en más estructuras, se tendría un banco de información amplio de las propiedades dinámicas de estas estructuras para el control y seguimiento de su salud estructural.

A partir de las recomendaciones dadas en el trabajo de investigación de Rodríguez (2021), se ha buscado producir en el presente trabajo, una base de datos de monitoreo a diferentes horas del día, con el fin de conocer el comportamiento dinámico del puente sobre la Quebrada Salitral a distintas temperaturas ambientales, y así determinar la razón de variación en frecuencia de vibrar de sus modos más representativos según los cambios de temperatura.

∴ ¿Qué margen de variación en la frecuencia de los principales modos de vibrar pueden ser resultado a los cambios de temperatura ambiental en el puente sobre la Quebrada Salitral?

1.3 Objetivo General

Determinar la variación del comportamiento dinámico del puente metálico Quebrada Salitral ruta N°27 a distintas temperaturas ambientales.

1.4 Objetivos Específicos

- Obtener valores de aceleración en el dominio del tiempo con solo un sensor en el puente Quebrada Salitral ruta N°27.
- Procesar los datos obtenidos en dominio de tiempo y convertirlos al dominio de la frecuencia por medio del programa ADDA.
- Identificar los cambios en el dominio de la frecuencia de los distintos modos de vibrar de los puentes a distintas temperaturas.
- Determinar el margen de variación en frecuencia producto a los cambios de temperatura para así considerarlo en momentos de verificación de cambios dinámicos en puentes metálicos producto a eventos de daño.

1.5 Justificación

La infraestructura vial en nuestro país es importante porque permite la comunicación y transporte de bienes y servicios, e impacta directamente en las actividades económicas y sociales de los distintos sectores geográficos y sociales.

El deterioro de la infraestructura ocasiona que el desarrollo local se vea afectada, del cual, dependiendo su grado de degradación, origina pérdidas considerables y su objetivo principal de garantizar el acceso, competitividad local.

La carencia de una infraestructura adecuada de transporte no solo afecta el desarrollo local y genera pérdidas económicas al comercio de bienes y servicios, también deteriora la calidad de vida de los habitantes; Por ello, disponer de infraestructuras de calidad y debidamente atendida por parte del gobierno central o local, fortalece la sostenibilidad en el sector vial de Costa Rica.

Con el aprovechamiento de la tecnología de los sistemas de monitoreo, como lo son los acelerómetros cuya función es obtener datos de aceleración en el dominio del tiempo, es posible determinar experimentalmente el comportamiento dinámico de los puentes y otro tipo de estructuras.

En un futuro cercano, se estará usando con mayor frecuencia las variaciones de los parámetros dinámicos de los puentes como método de determinación de daño; Sin embargo, ¿qué influencia podría tener la variación de temperatura entre los monitoreos comparativos?

Este tipo de estudio no ha sido realizado en Costa Rica con anterioridad; se han hecho monitoreos, pero sin importar la influencia de los cambios de temperatura ambiental y sus repercusiones en el comportamiento dinámico de los puentes.

Debido a que la brecha entre la máxima temperatura promedio y la mínima temperatura promedio en Costa Rica es relativamente uniforme en todo el año (comparada con las condiciones existentes en otros países como las presentes en Zolghadri (2015)), se han realizado en este estudio las mediciones en un solo día, procurando monitorear un rango típico y representativo de temperatura dentro del promedio anual de Costa Rica

La presente investigación viene a demostrar si la variación de las temperaturas ambientales típicas en Costa Rica, puede producir cambios considerables en las frecuencias de los modos de

vibrar del puente sobre la Quebrada Salitral, y por ende, en los puentes metálicos del inventario nacional de puentes de Costa Rica.

Conociendo los posibles cambios en el comportamiento dinámico de este puente producto a los cambios de temperatura, se podrá considerar tales variaciones en la comprobación de futuros daños producto a eventos especiales sobre la estructura, como terremotos, impactos vehiculares, huracanes, entre otros.

1.6 Alcances y limitaciones

1.6.1 Alcances

- Se ha tomado registros de monitoreo de aceleración sobre el puente Quebrada Salitral en la Ruta Nacional N°27.
- Se ha contado con permisos de la empresa concesionaria de la Ruta Nacional N°27 Globalvía para realizar el monitoreo en el puente Quebrada Salitral.
- Se ha utilizado un sensor GP2X de la marca SENSR para obtención de los datos de aceleración en el dominio del tiempo.
- Se ha utilizado un solo sensor para la obtención de los datos de aceleración del puente a diferentes temperaturas.
- Se ha utilizado el programa ADDA, desarrollado por el Profesor Luis Alejandro Carvajal Soto, para el análisis y procesamiento matemático de los datos de aceleración del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

1.6.2 Limitaciones

- No se cuenta con los recursos económicos necesarios para realizar monitoreos periódicos sobre el puente en distintas épocas del año, y captar información a temperaturas menores y mayores a las presentes durante el monitoreo realizado.
- La información relativa al puente existente en el Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP) es escasa y de poca información respecto al estado actual de la estructura.

- Las variaciones de temperatura en Costa Rica están dentro de una pequeña brecha, lo que hace que los rangos de variación de las frecuencias de los modos de vibrar del puente sean pequeños.

1.7 Impacto

Las mediciones de monitoreo e inspecciones en puentes deben ser realizadas continuamente para verificar el comportamiento y su estado estructural. Si en Costa Rica se realizaran más monitoreos sobre los puentes, se obtendría mayor información de la infraestructura vial, y podría identificarse, con mayor precisión, cuándo actuar para el conservar en buen estado de operación nuestros puentes.

El presente estudio, pretende influenciar a instituciones públicas administradoras del inventario de puentes de Costa Rica, a hacer uso de sistemas de monitoreo para el seguimiento de la salud estructural de estas obras, y considerar los posibles cambios en los parámetros dinámicos provocados por variaciones de la temperatura ambiental, y descartar con ello, datos erróneos en la identificación de daño de los puentes.

Así mismo, el presente estudio pretende alimentar y consolidar la línea de investigación llevada en la Universidad Latina de Costa Rica de análisis experimental de estructuras, y motivar la realización de futuras investigaciones sobre este amplio tema que sin duda seguirá contribuyendo al conocimiento técnico del estado de nuestras estructuras.

1.7 Hipótesis

Las variaciones de temperatura ambiental en Costa Rica podrían provocar variaciones en las frecuencias de los principales modos de vibrar de los puentes metálicos, las cuales podrían confundir los análisis de determinación de daño en estas estructuras.

2 Fundamentación teórica

2.1 Puentes metálicos

Los puentes son estructuras viales importantes que comunican dos sectores, interponiéndose a ríos, lagos, mar, vías férreas o carreteras.

Aunque los puentes son más de uso particular para paso vehicular, también hay puentes para peatones, tuberías, entre otros, son estructuras que se utilizan con mucha frecuencia para poder llegar a un punto en específico.

Un material muy común en los puentes es el acero, es cual es considerado como un material muy versátil por rapidez constructiva, aunque su costo en la actualidad es alto.

Según Serna (2020), estructuras metálicas son de las más utilizados en la construcción de puentes. Las propiedades mecánicas que tienen este material son muchas, a mencionar: es un material resistente, muy dúctil y de poco peso en comparación con el concreto. Así mismo, presenta las siguientes ventajas:

- Uniformidad: con prácticas de mantenimiento adecuadas, el acero es un material en el cual las propiedades no se modifican con el paso del tiempo.
- Durabilidad: así también con las prácticas de mantenimiento adecuadas, el acero puede durar mucho tiempo y cumplir la con la vida útil que normalmente se especifica para este tipo de estructuras.
- Ductilidad: soporta deformaciones y varios ciclos de carga, atrasando el fallo, lo cual es ideal para zonas con alta amenaza sísmica presente.
- Resistencia: Es un material cuya capacidad ante los esfuerzos es relativamente alta, lo cual permite tener elementos menos volumétricos, y por ende menos pesados.

De manera general, los puentes se subdividen en dos componentes estructurales, estas son: la superestructura y la subestructura.

2.1.1 Superestructura

La superestructura son los elementos que están sobre los apoyos de los puentes; se conforman por elementos principales tipo losas, vigas, arcos o cerchas, cuya función es transferir las cargas propias y aquellas de operación del puente (vivas) a la subestructura, y tiene elementos secundarios como diafragmas, rigidizadores, entre otros.

En resumen, los elementos principales de las superestructuras son:

- Vigas
- Losas (tableros)
- Cerchas
- Arcos
- Sistemas de suspensión
- Los elementos principales de las superestructuras son: Diafragmas
- Prelosas
- Sistema de arriostramiento
- Rigidizadores (atiesadores)

2.1.2 Subestructura

La subestructura son los elementos que soportan la superestructura y transmiten las cargas a nivel de suelos. La cantidad de subestructuras de un puente depende del número de tramos del puente. La tipología y dimensionamientos de las subestructuras dependen principalmente de las características geotécnicas de los suelos. Algunos tipos de subestructuras son:

- Bastiones
- Pilas
- Cimentaciones profundas

2.2 Puentes metálicos en Costa Rica

A pesar que existe un Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP), en Costa Rica no se tiene con exactitud cuántos puentes metálicos hay en todo el país. Lamentablemente, aún hoy en día las bases de datos de información de los inventarios existentes de puentes son incompletas. Existen muchos puentes (especialmente cantonales) que no han sido

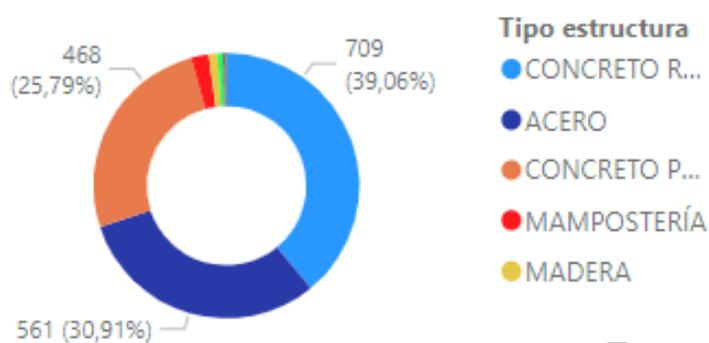
inventariados, y entre de los que sí existe inventario carecen de información de sus condiciones actuales.

De acuerdo con Gutiérrez y Muñoz (2016), el SAEP es el único programa oficial para la realización de levantamiento de inventarios en la red vial nacional, sin embargo, a pesar que tiene más de una década de existencia, está incompleto.

La clasificación de cantidad de superestructuras es por el tipo de estructura, de acuerdo con el siguiente gráfico y con la base que tiene el SAEP, cabe recalcar, que no son todos los puentes del país. Se obtiene que, de un total de 1693 puentes registrados, 561 son puentes de acero esto equivale a un (30,91%).

Figura 1

Cantidad de superestructuras por tipo



Nota. El gráfico demuestra los porcentajes de los tipos de estructura de los puentes en inventarios en la plataforma del SAEP. *Indicadores de inventario del Sistema de Administración de Puentes (SAEP)*, por CONAVI (s.f). https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagIdentificarPuede.faces

Del registro del SAEP en conjunto con los gobiernos locales, actualmente la provincia de Alajuela es la que cuenta con la mayoría de recuentos en la red vial nacional y la red vial cantonal, la provincia de Heredia con el menor recuento de puentes.

De los indicadores que se brindan con respecto a la longitud de los puentes, la mayoría de los puentes tienen longitudes menores a 18 metros, los cuales representan un 61,31% del total registrados, un 11,4 % corresponde a puentes mayores a 50 metros, y entre 18 m y 50 metros corresponden un total de 27,29%.

2.3 Inspecciones de puentes

En Costa Rica el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) es la institución encargada de la formulación de políticas para la ejecución de la construcción y mantenimiento de carreteras y puentes nacionales. El MOPT lo hace por medio de instituciones como el Consejo Nacional de Viabilidad (CONAVI) y el Consejo Nacional de Concesiones (CNC).

El Consejo Nacional de Viabilidad (CONAVI) es una institución que planea, programa, administra, financia, ejecuta, controla la conservación y construcción de las rutas nacionales, y vela por el mantenimiento a los puentes.

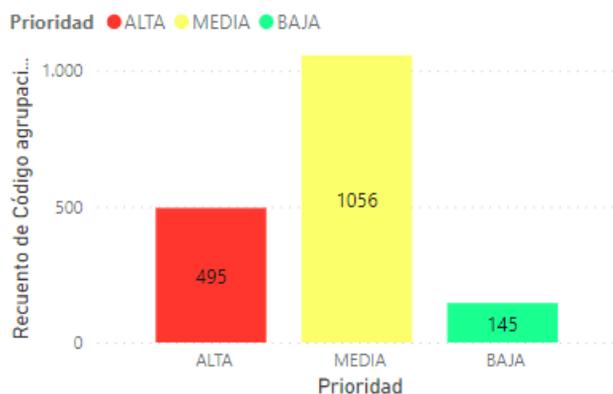
Por su parte, el Consejo Nacional de Concesiones (CNC) es una institución que establece reglas para la concesión de proyectos de infraestructura, para mantener, rehabilitar y reparar carreteras y puentes, a través de protocolos para proyectos que están en concesión.

Las inspecciones de puentes son parte de una adecuada administración de bienes. Al realizar inspecciones sobre los puentes, se pueden detectar oportunamente daños críticos en la infraestructura vial, reduciendo la realización de cierres parciales o totales, y por supuesto, previniendo tragedias en carretera. Al ser los puentes parte de la infraestructura vial que se encuentra en operación diariamente, si ocurren cierres generan, sin duda, pérdidas económicas a muchos sectores económicos y sociales del país.

Mantener los puentes en buenas condiciones hace que la vida útil de estas estructuras sea mayor y a menor costo. No tener reparaciones costosas contribuye a que el dinero sea utilizado eficientemente para otros elementos claves dentro de la infraestructura vial.

El SAEP en el siguiente gráfico muestra la contabilización de 1693 puentes en rutas nacionales como cantonales, se observa que la mayoría de los puentes está en una prioridad media de reparación, lo cual es un indicador importante de la necesidad presente en el país de las labores de mantenimiento. Se aprecia que muy pocas infraestructuras viales están en buen estado, lo cual significa que muchos de nuestros puentes que por su ubicación y flujo diario son vitales, se encuentran en prioridad media o alta y puede llegar a fallar en cualquier momento.

Figura 2

Estructuras por prioridad de reparación

Nota. El gráfico demuestra las cantidades de puentes que tienen prioridad de reparación clasificando desde alto, media y baja. *Indicadores de inventario del Sistema de Administración de Puentes (SAEP), por CONAVI (s.f).*
https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagIdentificarPuente.faces

Los sistemas de monitoreo funcionan como sistemas de inspección, sean estos utilizados de forma discreta en el tiempo, o de forma continua. Los sistemas de monitoreo basados en toma de datos de aceleración (como los utilizados en el presente trabajo) permiten ser utilizados para comparar el comportamiento de la estructura del puente en distintos momentos; por ejemplo, periódicamente por control, o antes y después de eventos extraordinarios como terremotos o impactados de vehículos en la estructura. Al procesarse los datos de aceleración en el dominio del tiempo, y llevarse al dominio de la frecuencia, es posible conocer el comportamiento dinámico de una estructura.

Si en el análisis comparativo de monitoreo en el dominio de la frecuencia (en dos momentos distintos), uno o varios modos de la estructura presentan variaciones en tales frecuencias de vibrar, estas diferencias podrían estar asociadas a algún nivel de daño en la estructura. Por tal razón, estos sistemas son utilizados en la actualidad para llevar control de la salud estructural de puentes y demás estructuras.

2.3.1 Inspecciones en el puente río Quebrada Salitral ruta N°27

El puente sobre la Quebrada Salitral está ubicado en la provincia de Alajuela, cantón Orotina, distrito Hacienda vieja, y sobre la Ruta Nacional No. 27. El diseño de la estructura fue completado en el año 1994, pero su construcción se ejecutó hasta el año 2000. En total, el puente tiene una longitud de 160 m, comprendida en 2 tramos de 48 metros, y un tramo de 60 metros.

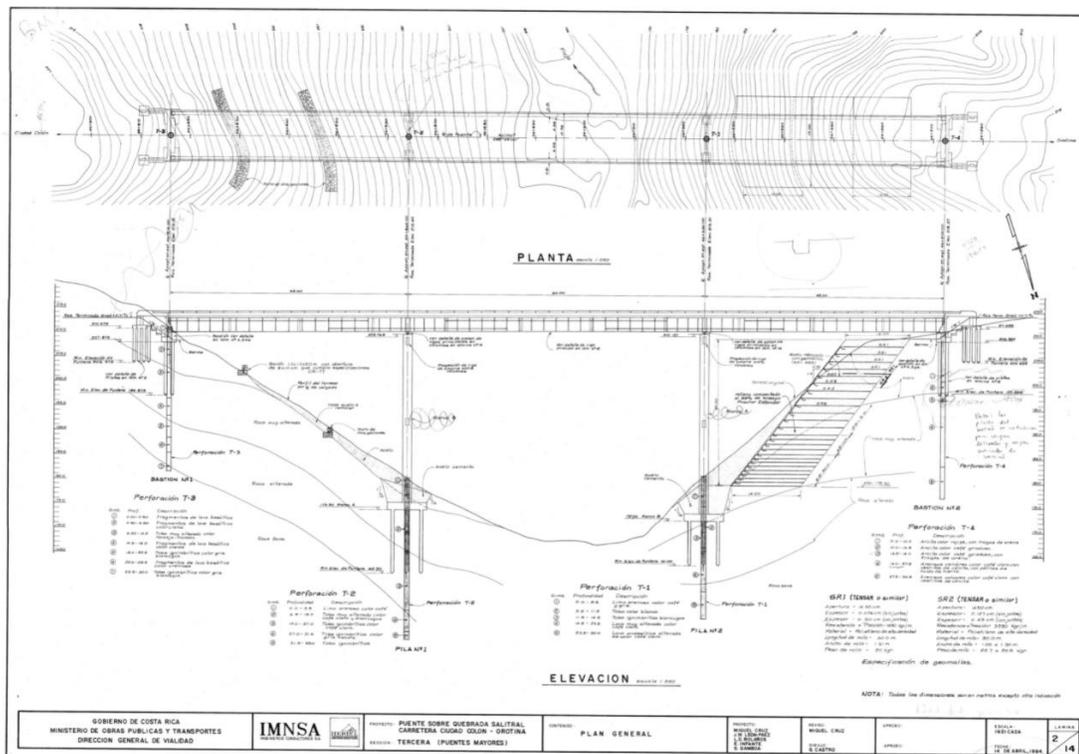
La ruta en la que se encuentra este puente es considerada como una ruta primaria de Costa Rica, y la misma cuenta con estudios de control de tránsito promedio diario en la ubicación donde se encuentra el puente. Según el Anuario de Transito (2015), la ruta tiene un tránsito promedio diario (TPD) de 16457, un 90,83% corresponden a vehículos livianos y en vehículos pesados un 9,17%.

La superestructura de este puente está conforma por 3 vigas principales de acero, que trabajan de manera continua a lo largo de toda la longitud del puente. Cuenta con una losa de concreto como tablero principal, y barreras vehiculares y peatonales como sistemas de seguridad.

Por su parte, la subestructura de este puente está conformado por 2 bastiones tipo cabezal de concreto, fundaciones construidas por cimentaciones profundas de pilotes de concreto reforzado. Así mismo, este puente tiene a nivel de subestructura dos pilas de tipo marcos rígidos de concreto, y fundaciones sobre sistemas de cimentaciones profundas de pilotes.

Figura 3

Planos del puente de Quebrada Salitral



Nota. El plano es del puente actual de Quebrada Salitral. Información del Puente. (SAEP),
 por CONAVI (s.f).
https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagInformacionPuente.faces

Figura 4
 Vista lateral del puente de Quebrada Salitral

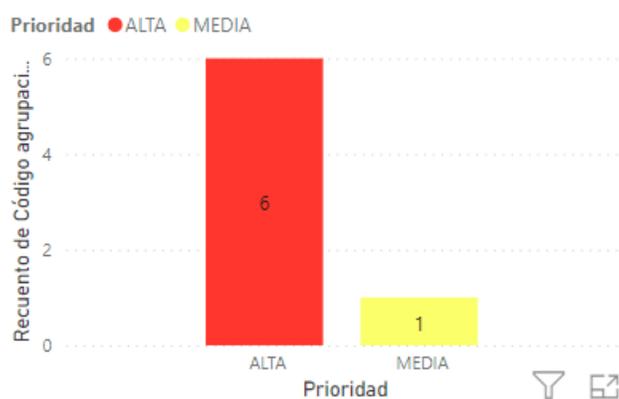


Nota. Vista lateral de sentido Ciudad Colón a Orotina. Elaboración propia.

El SAEP contabilizan siete puentes en el cantón de Orotina con prioridad de reparación alta; estando dentro de esta categoría el puente sobre la Quebrada Salitral.

Figura 5

Estructuras de puentes por Prioridad de Reparación en el Distrito de Hacienda Vieja, Orotina, Alajuela.



Nota. El gráfico demuestra las cantidades de puentes que tienen prioridad de reparación clasificando desde alto, media y baja en el distrito de Hacienda Vieja, Orotina, Alajuela.

Indicadores de inventario del Sistema de Administración de Puentes (SAEP), por CONAVI (s.f). https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagIdentificarPuente.faces

La más reciente inspección reportada sobre esta estructura fue en el 2020. Esta última inspección se categorizó como especial en el puente, ya que tuvo como propósito principal evaluar la condición de la losa, ya que parte del tablero presentaba desprendimientos del concreto. Tales desprendimientos estaban permitiendo el ingreso de agua a los elementos de acero de la superestructura, lo cual estaba causando corrosión en estos elementos. (Unidad de Puentes Lanamme UCR, 2020, p. 12)

Posteriormente, Rodríguez (2021) realizó monitoreos sobre este puente y determinó las frecuencias de distintos modos de vibrar de esta estructura. Los resultados obtenidos por Rodríguez (2021) demostraron que el uso de un sensor fue efectivo para determinar el comportamiento dinámico del puente, dando una base firme para la realización de este estudio.

2.4 Acelerómetros para monitoreo estructural del puente

Los monitoreos de la salud estructural de distintos tipos de estructuras y la detección de daños ha sido un tema de interés entre ingenieros civiles. A través de sistemas de monitoreo se puede detectar el daño en puentes o edificaciones.

Estos sistemas permiten crear y dar seguimiento a una base de datos que a partir de la cual se pueden obtener las características dinámicas de los puentes. Según Marulanda et al. (2000) el Monitoreo de Salud Estructural identifica los daños en las estructuras con base a los cambios en parámetros estáticos y dinámicos mediante interpretación de datos; los equipos que se implementan para la obtención de datos son de tipo transductores como los son los acelerómetros.

Los monitoreos instrumentales de puentes vienen a tomar un papel importante en el seguimiento de la salud estructural de estas estructuras, ya que las inspecciones visuales permiten crear un criterio de valoración principalmente cualitativo, ya que únicamente puede reportarse aquellas anomalías que pueden palparse acercándose a los elementos estructurales, lo cual en muchos puentes es difícil y costoso.

Al existir tales limitaciones en las inspecciones visuales, se plantea la necesidad de formular métodos que permitan saber el estado local y global en forma cuantitativa, incluso de forma continua y en tiempo real. Es así que han surgido la metodología denominada “Monitoreo

de Salud Estructural Basado en Vibraciones”, que subyace en la hipótesis que, si la estructura presenta daños, analítica y experimentalmente estos daños modificarían las propiedades mecánicas de tipo dinámicas, como la masa, rigidez, amortiguamiento, las frecuencias de vibración, los cuales afectarían las características vibratorias en las estructuras. (Unidad de Puentes, 2013, p. 13).

Tal como se ha indicado, los monitoreos se llevan a cabo por medio de acelerómetros. Estos instrumentos tienen la capacidad de percibir aceleraciones que son generadas por los vehículos que transitan sobre la estructura, o incluso otras fuentes de ruido ambiental como lo son: el viento, microsismos, vibraciones de origen antropológico. La utilización de acelerómetros en los monitoreos es de gran relevancia para el control y continuidad de operación de los puentes, ya que con los datos recolectados se pueden obtener parámetros cuyo seguimiento ofrece una guía a los ingenieros o administradores de la red vial nacional y cantonal a la toma de decisiones en la gestión de la administración pública.

La recolección de datos a través los sistemas de monitoreo facilita el seguimiento del estado de la estructura para aplicar mejor o planear programas de mantenimiento para la seguridad de las personas. Al dar mantenimientos periódicos a las estructuras se logra detectar con anticipación deterioro perjudiciales a los puentes, lo que puede traer beneficios económicos para las instituciones que deben enfrentar tales problemas.

Un sistema de monitoreo puede generar cambios importantes en un sistema de infraestructura vial, en cuanto a conocimiento en el ciclo de vida de una estructura, prever fallas, identificar momento para mantenimiento preventivo y no correctivo; además, evitar situaciones que comprometan la infraestructura.

Los monitoreos de puentes en Costa Rica han sido realizados por el Lanamme-UCR, aunque también por universidades como el Tecnológico de Costa Rica y la Universidad Latina de Costa Rica. Actualmente, los monitoreos son considerados costosos, por lo cual se han implementado en muy pocos puentes de la red vial nacional.

2.4.1 Monitoreos con acelerómetros en el puente Quebrada Salitral N°27

El puente de Quebrada Salitral N°27 cuenta con dos estudios de monitoreo estructural, uno realizado por Lanamme-UCR y otro en una tesis de grado de la Universidad Latina de Costa Rica. La principal diferencia entre los estudios ejecutados por el Lanamme-UCR y la Universidad Latina de Costa Rica, se basan en la cantidad de sensores disponibles en cada estudio. El Lanamme-UCR utilizó múltiples sensores para la obtención de datos, mientras que la tesis de la Universidad Latina de Costa Rica se utilizó únicamente monitoreo con solo un sensor. Los datos obtenidos de los monitoreos muestran las aceleraciones/frecuencia en diferentes tramos, inducidas por el tránsito vehicular y características dinámicas.

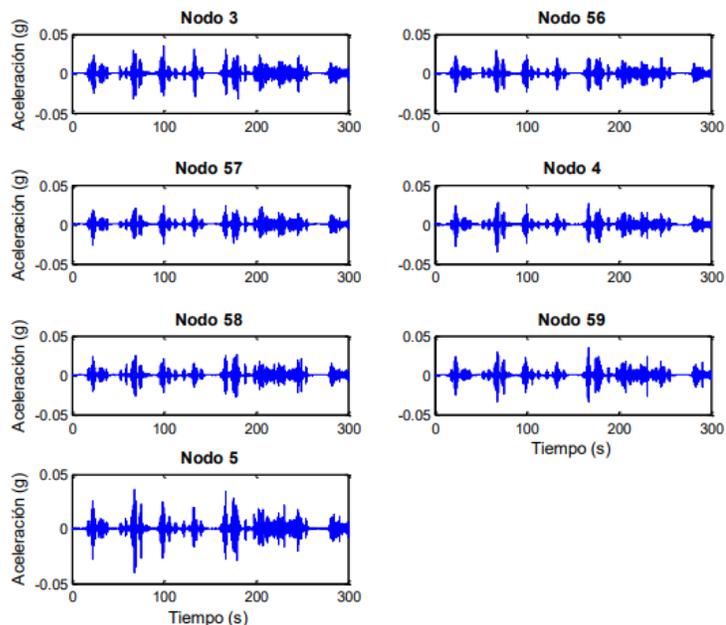
En el monitoreo realizado por la Unidad de Puentes de LanammeUCR en el 2018 tenían como objetivos saber la condición de la estructura y si se detectaba daños localizar en que parte de los elementos del puente se podían encontrar. Para dicho monitoreo se contaba con estudios hechos anteriormente donde se habían identificado anomalías en dos puntos del puente.

De acuerdo con Unidad de Puentes (2018), se utilizó el método de identificación de parámetros modales para obtener registros de aclaraciones inducidas por las cargas operacionales sobre la dirección vertical, mediante la utilización de sensores de aceleración a lo largo del puente. (p.18).

En la figura 6 se puede observar el registro de siete sensores donde están las aceleraciones en vertical y el horizontal en el dominio del tiempo. Se realizaron lapsos de medición de 5 minutos, con una tasa de muestreo de 1652 Hz.

Figura 6

Registros de aceleración vertical del primer bloque de datos en el puente del río Quebrada Salitral.



Nota. Son los registros de aceleración vertical en el primer bloque de datos de la primera configuración de sensores, en el eje vertical esta la aceleración y en el horizontal el tiempo La tasa de muestra es de 1652 Hz. *Verificación del monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales: Superestructura del puente Quebrada Salitral sobre la ruta nacional N°27,* por LanammeUCR, Unidad de Puentes (2018). https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1432/LM_PIE_UP_M02_2018_Monitoreo_Puente_Queb%20Salitral_RN27.pdf?sequence=1&isAllowed=y

A partir de la recolección de datos, el Lanamme-UCR elaboró una tabla resumen de las frecuencias de los distintos modos de vibrar identificados en el puente sobre Quebrada Salitral. Los modos identificados en ese monitoreo van desde 1,923 Hz hasta 5,040 Hz.

Tabla 1

Formas modales identificadas en el puente de Quebrada Salitral

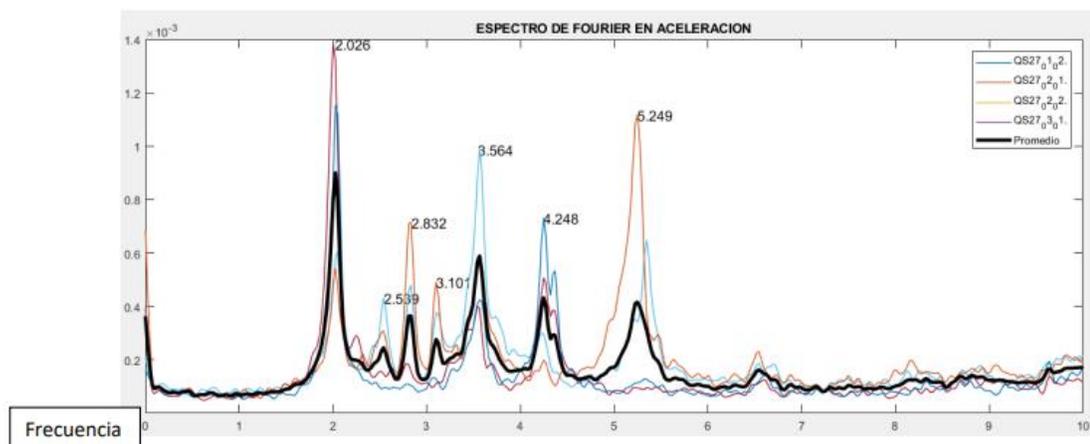
Modo	Frecuencia (Hz)			Cantidad de veces identificado	Cantidad de bloques en que se identificó
	Mínimo	Promedio	Máximo		
Flexión vertical 1	1,904	1,923	1,944	8	7
Flexión vertical 2	2,632	2,739	2,801	3	3
Flexión vertical 3	2,839	2,856	2,880	5	5
Flexión vertical 4	3,369	3,369	3,369	1	1
Torsión 1	4,115	4,138	4,164	9	8
Torsión 2	5,010	5,040	5,103	4	3

Nota. Tabla de la información recolectada de los gráficos se divide por puente, frecuencias y la cantidad de veces que se identificó la frecuencia. *Verificación del monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales: Superestructura del puente Quebrada Salitral sobre la ruta nacional N°27*, por LanammeUCR, Unidad de Puentes (2018). https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1432/LM_PIE_UP_M02_2018_Monitoreo_Puente_Queb%20Salitral_RN27.pdf?sequence=1&isAllowed=y

En Rodríguez (2021), se monitoreo el puente sobre la Quebrada Salitral con el uso de un único sensor. Este monitoreo se realizó colocando el sensor a la mitad de cada uno de los tramos del puente (conformado con tres tramos), con lapsos de medición de cinco minutos. Las aceleraciones obtenidas son producto principalmente del flujo vehicular pasando por la estructura, y en menor grado provocadas por el viento.

Figura 7

Diagramas del promedio de frecuencias en el puente Quebrada Salitral ruta nacional N°27



Nota. Gráfico de frecuencias promedio del puente *Quebrada Salitral ruta nacional N°27*, las curvas de colores son las frecuencias analizadas y el número resaltado las el promedio máximo del análisis. *Efectividad del uso de un sensor para la obtención de frecuencias de vibrar en los puentes río Virilla ruta N°27 y N°3, Quebrada Salitral ruta N°27, Costa Rica*, por M.F. Rodríguez, (2021), Universidad Latina de Costa Rica.

Respecto a la figura anterior, dada en el dominio de la frecuencia, hay seis datos importantes de las frecuencias de los modos de vibración identificados, con frecuencias que van desde 2,026 Hz hasta 5,249 Hz.

Tabla 2

Tabla resumen de la cantidad de modos y la frecuencia promedio

Puente	Quebrada Salitral Ruta 27
Modos	Frecuencia (Hz)
Modo 1	2.026
Modo 2	2.539
Modo 3	2.832
Modo 4	3.101
Modo 5	3.564
Modo 6	4.248
Modo 7	5.249

Nota. Tabla de las frecuencias promedios de la obtención de datos de los tramos con respecto a los siete modos realizados en la gráfica. *Efectividad del uso de un sensor para la*

obtención de frecuencias de vibrar en los puentes río Virilla ruta N°27 y N°3, Quebrada Salitral ruta N°27, Costa Rica, por M.F. Rodríguez, (2021), Universidad Latina de Costa Rica.

2.5 Frecuencias a vibrar

Las estructuras civiles pasan sometidas a distintas acciones dinámicas, lo cual implica que estén constantemente vibrando.

Las frecuencias de vibrar en estructuras dependen principalmente de la masa, rigidez y geometría de sus elementos, por lo que es de esperar que, si la temperatura modifica levemente la longitud y sección de sus elementos, tendrán que cambiar por ende sus frecuencias de vibrar.

Las frecuencias de vibrar son de relevancia porque describen el comportamiento dinámico de una estructura (Jaimés et al, 2017, p. 2).

Según Esfarjani et al. (2017) los cambios que puede experimentar una estructura en sus características dinámicas debido al daño pueden ser de menor grado que los cambios de las características dinámicas debido a las variaciones que puede generar la temperatura sobre ellas.

Los puentes normalmente están sometidos a cargas dinámicas durante toda su vida útil, lo cual hace que se den los efectos vibratorios en ellos. Como en toda estructura, las vibraciones en los puentes dependen también de la masa, la rigidez y su geometría. Al haber mayor masa hay menor frecuencia y cuando hay mayor rigidez las frecuencias aumenta. A diferencia de la masa, la rigidez de los puentes puede variar al depender esta de la longitud y del momento de inercia de sus elementos estructurales.

De acuerdo con Orrego (1934) para el dimensionamiento de los elementos de un puente metálico, debe considerarse los efectos que producirán las cargas del tráfico y sus velocidades. Los efectos dinámicos sobre los puentes llegan a tener gran relevancia en su conservación y operación, y evidentemente varían naturalmente de un puente a otro ya que cada puente tiene su determinada masa, rigidez y geometría. (p.1).

Las mediciones de vibraciones en los puentes se logran mediante el uso de los sistemas de monitoreo de salud estructural, con los cuales se analizan las vibraciones matemáticamente y se identifican las características modales de la estructura. La detección de daño por medio de la

comparación de respuesta dinámica es hoy en día una práctica cada vez más frecuente en países desarrollados.

Según Araujo et al. (2010) las pruebas de vibración ambiental (monitoreo) identifican la dinámica de los puentes y permite identificar daños, además:

- Controlar la calidad de la obra realizada; hacer mediciones en puentes recién construidos se puede comparar los valores teóricos en el diseño con los datos obtenidos en las pruebas de vibración.
- Intuir niveles de daños causado en la estructura mediante mediciones de vibración ambiental.
- Controlar la estructura durante la vida útil, ya que las mediciones constantes pueden determinar con anticipación deterioro en la estructura debido a envejecimiento de los materiales, daños ocasionados por distintos agentes, asentamientos, entre otros.

Cuando se realizan pruebas de vibración ambientales hay diferentes tipos de métodos para determinar las características dinámicas de las estructuras, tales como:

- Método no paramétrico en el dominio de la frecuencia: Este método “transforma la señal de salida de los sensores al dominio de la frecuencia para trabajar con las frecuencias predominantes que aparecen” (Castillo et al, s.f, p.2).
- Métodos paramétricos en el dominio del tiempo: Para Vásquez (2017) este método es caracterizado en “aplicaciones más avanzadas que puede haber necesidad del uso de modelos que relacione entre variables de sistema mediante expresiones matemáticas” (como se cita en López, 2016, p.2).

2.6 Modo de Vibrar

En estructuras el estudio de la dinámica ha conllevado a desarrollar grandes conocimientos en el área de la ingeniería civil y específicamente ante cargas dinámicas como los sismos, principalmente sobre estructuras tipo edificación y puentes.

En el estudio de la dinámica estructural, el principal parámetro que se quiere obtener (analíticamente o experimentalmente) son las frecuencias en los modos de vibración y los coeficientes de amortiguación que les corresponde.

Los modos de vibración son formas características en las cuales vibrará una estructura. Toda estructura tiene distintos modos de vibrar y la importancia de cada uno de ellos depende de la cantidad de masa participativa durante su ocurrencia.

Según Hormazábal (2018) los métodos que se han desarrollado para la identificación modal, funcionan para identificar y dosificar señales que han sido aplicados para identificar periodos o modos normales de vibración de estructuras y edificios, principalmente a partir de registros de vibraciones. Entre los métodos más antiguos para el análisis modal está el de la descomposición del dominio de la frecuencia, la mayor parte de este método es basado en la suposición de que se encontrara mayor concentración de energía entorno a las frecuencias naturales (p.41).

2.7 Efecto de la temperatura en estructuras metálicas

Los parámetros modales están sujetos a cambios significativos no sólo por daños, sino también pueden variar ante variaciones de los efectos ambientales, principalmente de la temperatura.

Al aplicarse técnicas de detección de daños por medio del monitoreo, podría erróneamente concluirse la ocurrencia de daño si se evidencian cambios en frecuencia en los modos de vibrar de un puente, ya que la temperatura podría incidir en diferencias entre las frecuencias obtenidas en dos monitoreos distintos.

El efecto de la temperatura puede cambiar las características dinámicas de un puente o estructura, y considerarse erróneamente como un nivel de daño. Por tal razón, es necesario determinar qué nivel de variación en las frecuencias de la estructura es producto a los cambios de la temperatura.

La temperatura puede incidir considerablemente en los puentes metálicos, debido a que la temperatura produce elongación o contracción de la estructura.

Los puentes se encuentran a exposición constante a las condiciones ambientales, las superestructuras metálicas experimentan variaciones con la temperatura, encontrándose gradientes de temperatura en cada una de las direcciones principales (longitudinal, transversal y vertical) (Hagedorn, 2016).

Según Sohn et al. (1999) en las pruebas de vibración a través de la adquisición de datos, la detección de daños se basa en la premisa de que los daños en las estructuras provocaran cambios en los datos de vibración medidos, sin embargo, se ignoran los cambios por efectos importantes ocasionados por cambios ambientales en los puentes. Los cambios de temperatura tienen un efecto en las frecuencias naturales de las estructuras, lo cual se demuestra en el presente estudio.

De acuerdo con Esfarjani et al. (2017) las variaciones de las frecuencias son causadas principalmente por un cambio en el módulo del material bajo diferentes temperaturas. Las frecuencias modales de las estructuras de acero varían aproximadamente hasta 0,15% cuando la temperatura aumenta un grado Celsius.

2.8 Dominio del tiempo y la frecuencia

El registro de las aceleraciones del puente tomado con el sensor es dado en el dominio del tiempo, es decir, que se registra discretamente con un muestreo de 400 datos por segundos valores de aceleración en una escala de tiempo en segundos. Gráficamente, los datos de aceleración en este dominio son mostrados en una gráfica plana en donde las abscisas representan la escala de tiempo y las ordenadas la aceleración experimentada correspondiente a cada instante.

Por su parte, a través de un análisis de Fourier, es posible pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, en donde a partir de la descomposición de múltiples funciones periódicas las más características representan las de mayor contribución en los registros analizados. Gráficamente, los datos de amplitud de aceleración en este dominio son mostrados en una gráfica plana en donde las abscisas representan un barrido de frecuencias y las ordenadas la amplitud de aceleración.

La determinación de modos de vibrar en el dominio de la frecuencia no es compleja, En el dominio de la frecuencia se logran resultados más certeros. Los parámetros más comunes son: frecuencias propias de modos de vibración y razones de amortiguamiento.

Específicamente, el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia son representaciones de señales, con la diferencia que en el dominio del tiempo se representa la amplitud y el tiempo; sin embargo, en el dominio de las frecuencias se da por señales senoidales que se conforman por la magnitud o potencias de señales y las frecuencias. La suma de cosenos y senos es la conocida

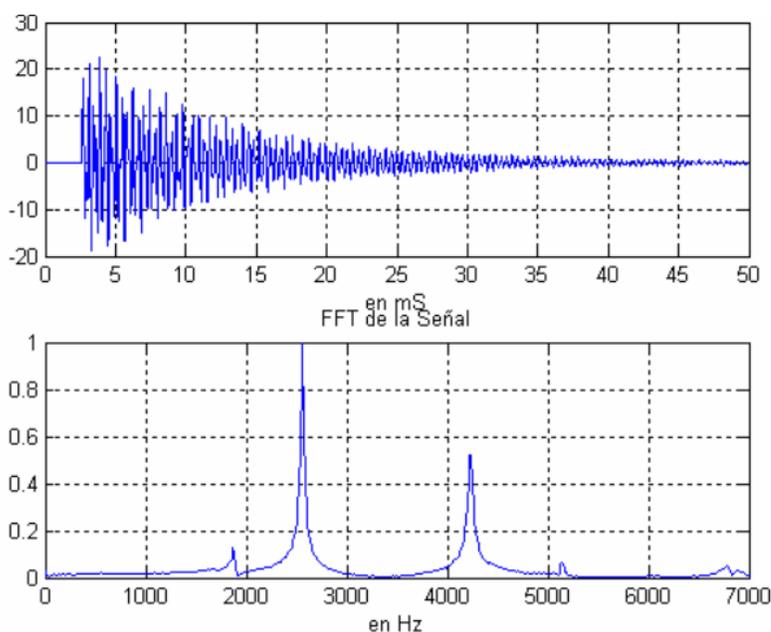
transformada de Fourier, la representación de la frecuencia es lo que se conoce como espectro de la señal.

La transformación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia es debido a que la interpretación de las frecuencias de vibrar de las estructuras en el dominio del tiempo es más compleja, mientras que en el dominio de la frecuencia resulta ser más simple. Los cambios de dominio a dominio se realizan con la transformada de Fourier.

A continuación, en la figura 8 se muestra en la parte superior una representación en el dominio del tiempo (dada en aceleración vs tiempo), en la parte inferior de la figura, mediante la transformada de Fourier, muestra su equivalencia en el dominio de la frecuencia (amplitud de aceleración vs frecuencia).

Figura 8

Dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia



Nota. Dominio del tiempo (aceleración/ tiempo) y el dominio de la frecuencia (aceleración/ frecuencia). *Determinación de las frecuencias fundamentales mediante análisis de frecuencia por impacto*, por E. Moreno et al, (2005). https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Analisis-de-Frecuencia-en-el-Modo-Torsion-a-Senal-en-el-dominio-del-tiempo_fig1_268434228.

2.9 Procedimiento de análisis

2.9.1 Filtro paso bajo

El filtro paso bajo es ideal para permitir el paso de señales por debajo de las frecuencias de corte y atenúa señales por encima de la misma.

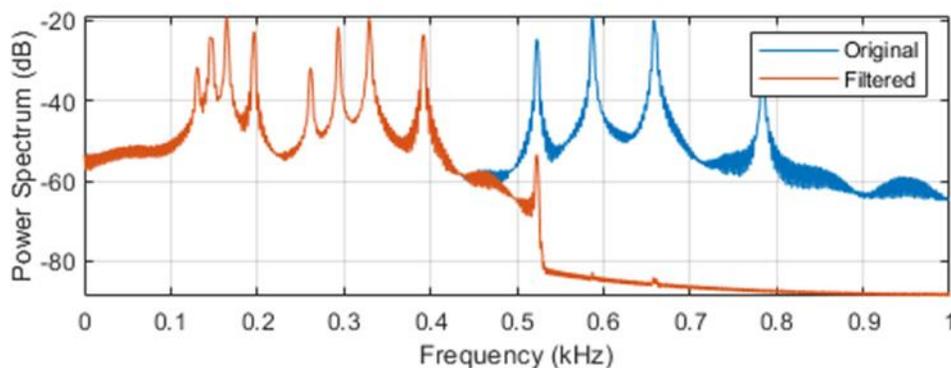
En los monitoreos se registran vibraciones o señales de ruido ambiental que no son propias de la estructura, o bien, pertenecen a la estructura, pero el porcentaje de masa participativa en el modo correspondiente es despreciable. Por tal razón, es práctico eliminar dicho ruido a través de filtros de señal.

La tasa de muestreo de los acelerómetros para el monitoreo de estructuras, generalmente son superiores a 100 datos por segundo. Por ejemplo, en este estudio se utilizó una tasa de muestreo de 400 datos por segundo, lo que significa que la frecuencia de Nyquist en el dominio de la frecuencia es de 200 Hz (la mitad). Sin embargo, las frecuencias predominantes en las estructuras civiles rara vez son superiores a 20 Hz, lo que significa que, frecuencias superiores a 20 Hz son de poca utilidad en los análisis. Por tal razón, es conveniente aplicar un filtro paso bajo para dejar únicamente las frecuencias inferiores a 20Hz y su registro equivalente en el dominio del tiempo.

A continuación, en la figura 9 se muestra la aplicación de un filtro paso bajo para eliminar las señales de ruidos y crear un efecto más limpio en la señal.

Figura 9

Filtro paso bajo



Nota. Filtro paso bajo, mostrando la eliminación de datos y suavizado. *Diseño de filtro paso bajo con Matlab*, por Matlab, (s.f). <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/lowpass.html>.

2.9.2 Hanning

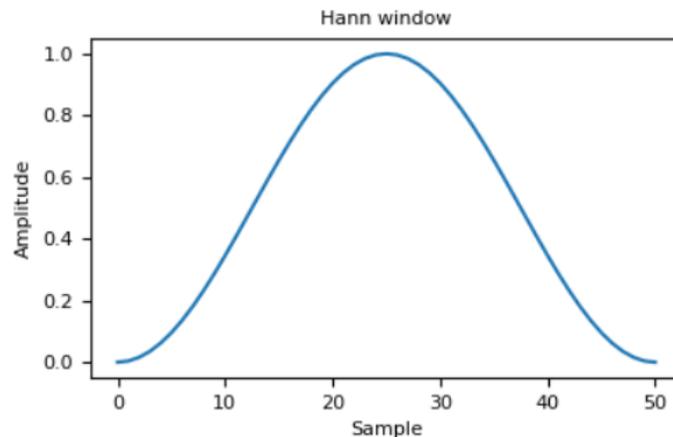
La ventana de Hanning tiene forma de una campana de forma ciclo cosenoidal, la cual tiene un valor unitario en su punto más alto, y cero en los extremos. Los valores de las señales registradas durante los monitoreos se multiplican por dicha función de Hanning permitiendo de esta manera neutralizar el inicio y el final de la señal, lo cual es útil en el análisis de Fourier.

Al utilizar esta función de ventana de Hanning, se suavizan los valores de discontinuidades al principio y al final de la señal de muestreo.

A continuación, en la figura 10 se muestra en la parte superior los datos sin la ventana de Hanning y en la parte inferior aplicada la ventana de Hanning.

Figura 10

Ventana de Hanning



Nota. Ventana de Hanning, mostrando el suavizado de datos cuando se aplica. *Devuelve la ventana de Hanning*, por Runebook.dev, (s.f). <https://runebook.dev/es/docs/numpy/reference/generated/numpy.hanning>.

2.9.3 Transformada de Fourier

Los datos en aceleración obtenidos durante los monitoreos se encuentran en el dominio del tiempo. De tal manera, que para procesar y comparar los datos en el dominio de la frecuencia se utiliza el software MATLAB mediante la transformada de Fourier y posterior a la aplicación de filtros y ventanas de Hanning.

En el año de 1805 el matemático Gauss fue el primero que creó un algoritmo que se basó en calcular la ahora llamada transformada de Fourier discreta, pero en 1985 hubo científicos norteamericanos que realizaron un nuevo cálculo el cual es más eficiente, lo cual ahora se le llama la transformada rápida de Fourier, ha sido un gran descubrimiento porque ha ayudado a investigaciones que se han realizado y a futuras.

De acuerdo con la teoría propuesta por el matemático francés Baptiste Joseph Fourier en 1822, ha sido un análisis que se ha usado ampliamente para el estudio de señales continuas y periódicas, métodos numéricos y en resolución de ecuaciones. El matemático planteó dos principios, los cuales son:

- a) Toda función periódica compuesta se puede llegar a descomponer de una sumatoria infinita de armónicos.
- b) Toda función periódica se puede llegar a presentar en el dominio de la frecuencia mediante la ecuación propuesta de la transformada de Fourier.

Según García et al (2019) para el estudio del comportamiento dinámico de las estructuras, existe un método matemático que se puede utilizar, como lo es el análisis de Fourier, el método permite la identificación de las frecuencias a vibrar propias del sistema, es basada en la función del tiempo es periódica y supone que el análisis dinámico es un sistema lineal (p.2).

Cuando se trata de determinar el espectro de una función se puede realizar mediante la fórmula de la transformada de Fourier, la cual da la información en relación al tiempo, indica los eventos importantes. De acuerdo con Cortés et al (2007) el concepto del análisis de Fourier es utilizado en programación lineal y en estudio de ondas de espectro electromagnético. La transformada se da en secciones de señal, lo cual produce la técnica de ventaneado, en ocasiones se debe efectuar análisis detallados de todas las frecuencias (p.2).

La transformada está compuesta por un procedimiento matemático de una función de frecuencias, en el cual se forma por primas de distintos colores y longitudes de ondas, la función inicial se define con el tiempo y es la transformada en el dominio de la frecuencia (Cortés et al 2007).

La transformada de Fourier está compuesta por una formulación básica, en lo cual se va mostrar en la figura 11.

Figura 11

Formula de la Transformada de Fourier

$$F\left(\frac{n}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} m(kT) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

Nota. Transformada de Fourier. *De la transformada de Fourier. Una visión pedagógica.* Bobadilla, 1999, Universidad Politécnica de Madrid. <http://www.raco.cat/index.php/EFE/article/view/144488>

Según Bobadilla (1999) la 'N' es el número de muestras de la venta que se va realizar el análisis, la 'T' es el periodo de muestreo (inverso a la frecuencia de muestreo que domina 'f'), 'n' es el índice de la frecuencia cuyo valor se quiere obtener y la 'm(kT)' indica la muestra tomada en el instante de 'kT' de la ventana (p.49).

Con la transformada de Fourier, mediante un análisis se puede realizar registros de datos en el dominio del tiempo y convertirlos en el dominio de la frecuencia o viceversa, para obtener este método se puede aplicar como en la figura 12.

Figura 12

Método de la Transformada de Fourier.

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df; j = \sqrt{-1}$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-j2\pi ft} df; j = \sqrt{-1}$$

Nota. Método de la transformada de Fourier. *Determinación de la capacidad resistente de puentes viga-losa en concreto postensado mediante pruebas de vibración ambiental: Caso de estudio Puente El Ramo.* Jaimes et al, 2017. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.13.1.2017.03>

La función S(f) se denomina espectro de S(t) y representa la manera como la medida de amplitud relativa de la señal se distribuye con la frecuencia.

2.9.3.1 Transformada Discreta de Fourier (TDF). La transformada de Fourier se basa de una descomposición de senos y cosenos en distintas frecuencias y amplitudes, por lo tanto, la transformada realiza soluciones con base a integrales que se hace un análisis del tiempo.

De acuerdo con Cortés et al 2007 en la ingeniería y tratamientos de señales, es de mejor manera considerar procesos discretos y no continua, porque en los sistemas que adquieren los datos no llegan a analizar la totalidad de la información (p.154).

Una secuencia periódica de las series de Fourier, con una correcta interpretación, de la misma manera puede ser aplicada a secuencias de duración finita. La representación de Fourier es la resultante para secuencias de duración finita y es lo mismo que se llega a conocer como la transformada discreta de Fourier. La transformada se puede representar de una secuencia de duración finita de largo N por una secuencia con periodo N, el periodo es idéntica a la secuencia de duración finita x(n) (De la Fraga, 2001, p.13).

Para conocer la transformada discreta de Fourier representando la transformada de análisis y transformada de síntesis, en las siguientes ecuaciones involucran intervalos desde 0 y N-1.

Figura 13

Ecuaciones de la Transformada de Fourier Discreta (TDF).

$$X(k) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}, & 0 \leq k \leq N-1 \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

$$x(n) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W_N^{-kn}, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

Nota. Transformada de Fourier Discreta. *La transformada discreta de Fourier y la transformada rápida de Fourier.* De la Fraga, 2001. <http://delta.cs.cinvestav.mx/~fraga/Cursos/PDI/tdf.pdf>

2.9.3.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT). La transformada rápida de Fourier juega un papel importante porque es la evaluación directa de la transformada discreta de Fourier requiere operaciones aritméticas, la TDF es importante en los análisis de diseño y los algoritmos.

La FFT es un algoritmo utilizado para realizar la transformada discreta de Fourier de una forma eficiente y rápida, con este algoritmo se llega a simplificar enormemente el cálculo de TDF matemáticos para reducir drásticamente el número de operaciones. La idea de esta optimización es la descomposición de la transformada a tratar en otras más simples y así llegar a transformar de 2 elementos donde k puede tomar los valores de 0 y 1 (Cortés et al 2007, p.154).

La FFT beneficia considerablemente a las aplicaciones de procesamiento de señales no solo de forma genérica al brindar una forma más eficiente que elimina cálculos redundantes, también permite las resoluciones de la TDF para números grandes de muestras en situaciones en las que el método directo no es aplicable, la FFT es un algoritmo esencial para aplicaciones sensibles al tiempo y los recursos limitados (Schmidt 2013 p.3)

A continuación, se mostrará la ecuación de la transformada rápida de Fourier.

Figura 14

Ecuaciones de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

$$X[k] = \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r] \cdot (W_{N/2})^{rk} + W_N^K \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r+1] \cdot (W_{N/2})^{rk}$$

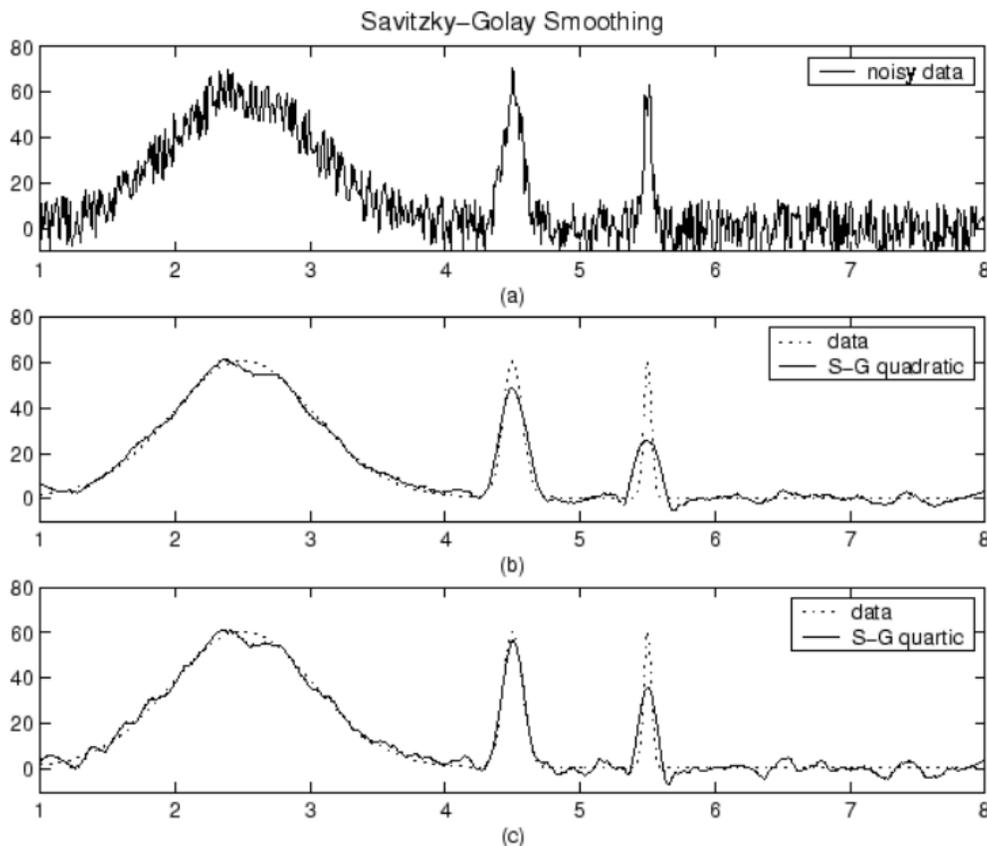
Nota. Transformada de Rápida de Fourier. FFT: *Transformada Rápida de Fourier*. Schmidt, 2013. <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-Schmidt%20Ana%20Luc%C3%ADa.pdf>

2.9.4 Smoothing

El smoothing o suavizado, es un procedimiento de reducción de ruido o comportamientos no deseados dentro de un conjunto de datos. Lo cual permite suavizar datos con métodos como el promedio móvil.

Figura 15

Gráfico con smoothing



Nota. En el grafío a) se observa los datos de ruidos y en el b) y c) son datos suavizados. *Filtrar y suavizar datos*, por Matlab, (s.f). <https://la.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-data.html>.

3 Marco Metodológico

3.1 Paradigma

Los puentes son estructuras esenciales para comunicar sectores de una manera segura y eficiente. Estas estructuras se han convertido en aptas para investigar su comportamiento ante cargas mayores, cargas sísmicas o de viento, o frente a condiciones ambiental. Lamentablemente los puentes no son sometidos a valoraciones continuas para evaluar su condición o el comportamiento que tiene ante dichas demandas.

Para saber el efecto dinámico de un puente es importante someterlo a monitoreos. Estos monitoreos permiten una descripción de su comportamiento dinámico ante el paso de vehículos o los efectos que puede generar la temperatura.

En Costa Rica los estudios de monitoreos basados en el comportamiento ambiental sobre los puentes son nulos por parte de las entidades gubernamentales. El paradigma es que los monitoreos son importantes para saber los efectos que puede causar las demandas de carga o la temperatura en frecuencias de vibrar, y comprender la salud estructural.

Sin embargo, erróneamente podría considerarse que las labores de monitoreo son caras y demandan de mucho personal y tecnología. Rodríguez (2021) demostró que con un único sensor es posible, con mucha efectividad, conocer el comportamiento dinámico de un puente, y el presente estudio ratifica su aplicación para la determinación de los cambios dinámicos de estas estructuras ante las variaciones de temperatura.

3.2 Enfoque metodológico

Dado que se busca comprobar la hipótesis previamente establecida, así como los objetivos propuestos en dicha investigación, el presente trabajo será elaborado bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo. Debido a que el estudio va ser basado en análisis

numéricos, los análisis de los datos obtenidos van a ser de monitoreos en un puente de la Red Vial Nacional.

En el monitoreo del puente se van a obtener datos de aceleración en el tiempo. El monitoreo se realiza en el punto medio del puente.

El objetivo de la investigación es obtener datos en el dominio de la frecuencia los cuales se obtienen mediante la Transformada de Fourier. Al realizarse dichos análisis a distintas horas del día y bajo distintas temperaturas, se determina el margen de variación en frecuencia producto a los cambios de temperatura, y así considerarlos en momentos de verificación de cambios dinámicos en puentes metálicos producto a eventos de daño.

3.3 Métodos de investigación

Mediante la utilización de un solo sensor en el punto medio del puente se obtendrán datos de aceleración en el tiempo. Estos datos son transformados al dominio de la frecuencia mediante el software Matlab y el programa ADDA elaborado por el profesor Luis Alejandro Carvajal Soto. También se recolectará las diferentes temperaturas en cada medición realizada (distanciadas a cada hora) durante lapsos de monitoreo de aproximadamente 5 minutos en diferentes horas del día.

Obteniendo los datos en el dominio de la frecuencia, se procede a determinar el promedio mediante ventaneo en el software ADDA. Con los resultados en el dominio de la frecuencia, se procede a realizar una comparación con respecto a la temperatura mediante la herramienta Excel. Tal procedimiento permite analizarlos cambios de las frecuencias de los distintos modos de vibrar en relación a las variaciones de la temperatura ambiental.

Estas variaciones en frecuencia producto a los cambios de temperatura deben ser consideradas en momentos de evaluación de cambios dinámicos en puentes metálicos producto a eventos de daños. De tal manera, que pueda descartarse que una posible variación no sea por daño sino más bien por los efectos de temperatura en el puente.

3.4 Categorías de análisis de investigación

3.4.1 Comprobaciones

El puente que se va realizar el monitoreo es en el puente Quebrada Salitral Ruta N°27 ubicado en Orotina.

Se van comparar las frecuencias para cada modo de vibrar del puente a distintas temperaturas, esto permitirá conocer el margen de variación de las frecuencias del puente debido a los cambios de temperatura ambiental.

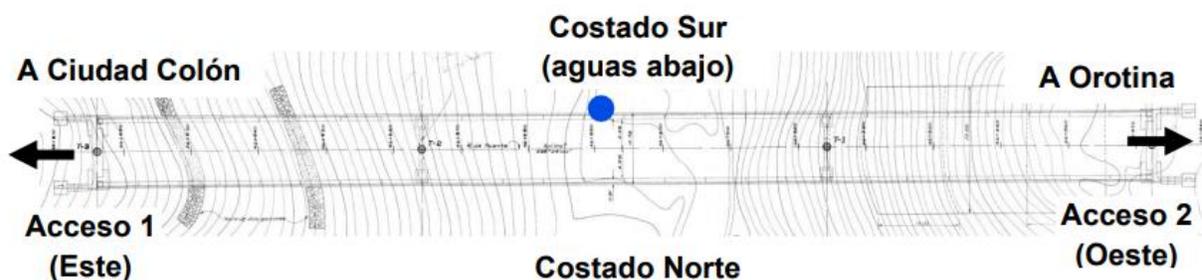
3.5 Técnicas de muestreo

Para el puente en Quebrada Salitral Ruta N°27 se tomarán muestras en el punto medio del puente. Se elige este único punto sobre la estructura por motivos de logística y tiempo ya que se realizan mediciones en horarios extensos; sin embargo, la consideración de puntos adicionales es válida para futuras investigaciones.

El Puente del Río Quebrada Salitral Nacional N°27 tiene una longitud total de 160 m, por lo tanto, el punto de medición se localiza a 80m de ambos extremos del puente.

Figura 16

Punto medio donde se va realizar el monitoreo.



Nota. Punto donde se va realizar el monitoreo. *Verificación del monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales: Superestructura del puente Quebrada Salitral sobre la ruta nacional N°27*, por LanammeUCR, Unidad de Puentes (2018). https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1432/LM_PIE_UP_M02_2018_Monitoreo_Puente_Queb%20Salitral_RN27.pdf?sequence=1&isAllowed=y

3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se han realizado los monitoreos en el puente mediante la utilización de un acelerómetro de tres componentes (X, Y, y Z), a partir del cual se obtendrá datos de aceleración en dominio del tiempo. Para obtener las temperaturas ambientales el acelerómetro capta la temperatura en el momento de la medición de vibraciones.

Para los monitoreos se va utilizar:

Sensor GP2 X USB marca SENSR que detecta movimientos en tres ejes y que permite monitorear, registrar y evaluar los movimientos, impactos y temperatura.

Tiene un rango de aceleración programable por el usuario de ± 2.5 , ± 3.3 , ± 6.7 y $\pm 10G$ DC, en este estudio se ha elegido ± 2.5 ya que las aceleraciones estarán dentro de ese rango.

Tiene un rango de temperatura de hasta: $+70$ °C (158 °F).

Es un acelerómetro de alta sensibilidad que tiene 4 rangos programables: 1,5 g, 2 g, 4 g y 6 g.

El acelerómetro se fija a la barrera del puente, a través de un dispositivo que tiene un imán de alta adherencia a estructuras de metal.

Se ha utilizado computadoras portátiles, cintas métricas, celulares y conos de tránsito, chalecos, cascos de seguridad, entre otros.

Figura 17

Equipo para monitoreo



Nota: Computadora y Sensor GP2x USB. Elaboración propia.

Una vez recolectados los datos se han analizado los mismos mediante el software Matlab con el programa ADDA. El programa ADDA permite obtener los datos en el dominio de la frecuencia para realizar un análisis del comportamiento vibratorio del puente con respecto a la temperatura.

Figura 18

Sensor GP2 X USB marca SENSR



Nota: Sensor que se va utilizar para la toma de datos en los monitoreos: *GP2x USB Accelerometer User Guide*, por SENSR (2010). <https://sensr.com/downloads/R001-421-V1.0%20GP2-X%20USB%20Accelerometer%20User%20Guide.pdf>.

3.7 Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de los datos

Las vibraciones del puente se van a obtener mediante el sensor descrito, que va estar conectado a la computadora a través del cable USB. El sensor cuenta con un programa llamado SensView que toma las lecturas discretas de los datos con un muestreo de 400 datos/segundo.

Los archivos generados por el programa SensView son de tipo csv, los cuales son exportados por hojas de Excel. De igual manera, se obtienen los datos de temperatura mediante el acelerómetro.

Aunque el sensor permite la lectura de las tres componentes espaciales (X, Y, y Z), en el presente estudio se trabaja con la componente X, dirigida por la posición de instalación del acelerómetro, en el sentido gravitacional. Es gravitacionalmente donde se producen las principales vibraciones del puente; las otras direcciones los efectos son menores por las condiciones de contorno del puente.

Con los archivos obtenidos del acelerómetro se procede a utilizar el software MATLAB con el programa ADDA creado por el profesor Luis Alejandro Carvajal Soto. Con la utilización del programa ADDA se obtiene la Transformada de Fourier que lleva los datos de aceleración del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Cuando se realiza la conversión de datos se verifica la aparición de frecuencias de los distintos modos de vibrar del puente. Estas frecuencias se verifican por medio de múltiples ventanas de análisis y se promedian para compararlas entre ellas a distintas temperaturas ambientales y saber en qué rangos se encuentran las variaciones de estas frecuencias con respecto a las temperaturas experimentadas durante el monitoreo mediante la herramienta de Microsoft Excel.

4 Análisis de resultados

Utilizando el software Matlab con el programa ADDA se procesaron los datos obtenidos en el punto medio del puente de Quebrada Salitral en la dirección del eje X. Los registros de aceleración obtenidos en el dominio del tiempo se convirtieron al dominio de la frecuencia.

En cada registro de monitoreo, para cada temperatura, se realizaron 20 ventanas de análisis, a las cuales se les aplicó un filtro pase bajo y ventanas Hanning para el correcto cálculo del espectro de Fourier con un procesamiento en 16384 (2 a la potencia 14).

4.1 Monitoreo

En el puente se tomaron registros cada hora a través de lapsos de monitoreo de aproximadamente de 5 minutos cada uno y durante aproximadamente 10 horas. El primer monitoreo se realizó a las 3:30 a.m. con temperatura de 22 °C, y el último la 1:30 p.m. con temperatura a 36 °C. Ese rango de temperatura permitió tener un excelente barrido de las distintas condiciones ambientales a las que frecuentemente se encuentran nuestros puentes en Costa Rica.

El tránsito de vehículos pesados aporta mayor energía para la provocación de aceleraciones en la estructura, y por ende de vibración, eso permite que se logren mayores amplitudes de aceleración, logrando obtener datos más claros y menos afectados por señales ruidosas.

En cada monitoreo con el sensor se captan 400 datos por segundo, lo que significa que, en rangos de medición de 5 min, se logra recopilar 120.000 datos de aceleración.

Las frecuencias de los modos de vibrar más significativos son el parámetro dinámico más importante extraídos del análisis realizado en este estudio.

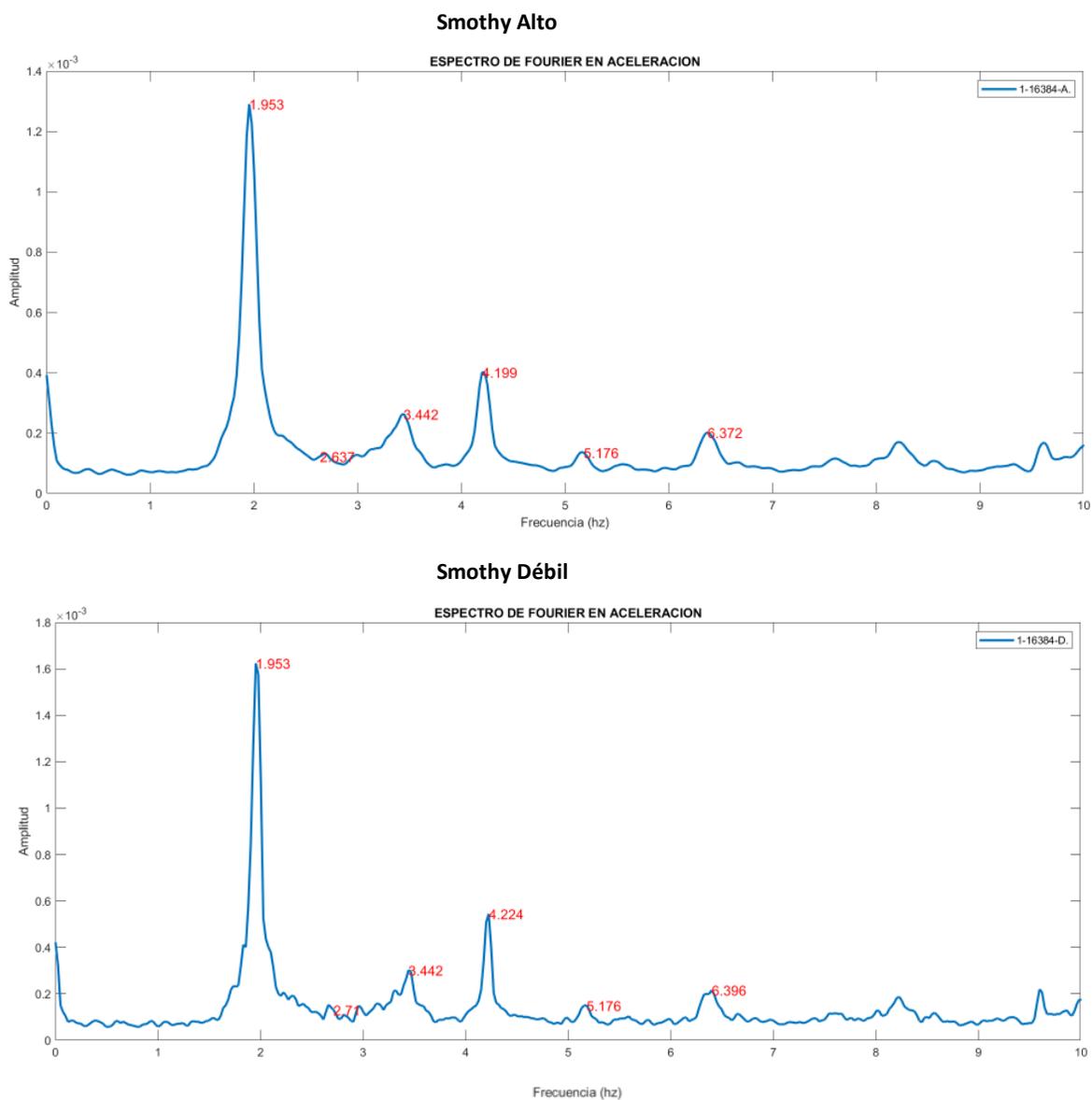
4.1.1 Espectro de Fourier

A continuación, se mostrarán los espectros de Fourier de aceleración en donde se aprecian las frecuencias más notables identificadas en la primera medición. El número de puntos de en la transformada de Fourier esta discretizada de 16384 puntos, mostrando mayor discretización para el análisis, lo cual hace que sea más exacto. Se han limitado las frecuencias hasta un máximo de 10 Hz.

En la figura 21 en el gráfico superior se realizó con smoothing alto y en la parte inferior un smoothing débil, en el alto se llega a tener un exceso de suavizado respecto a la gráfica del débil. Al suavizar los picos de la frecuencia natural puede afectar la ubicación real, por lo se adoptado en esta investigación un nivel de smoothing débil para lograr apreciar más los picos de frecuencia y optimizar su comparación.

Figura 19

Espectro de Fourier con dos smoothing



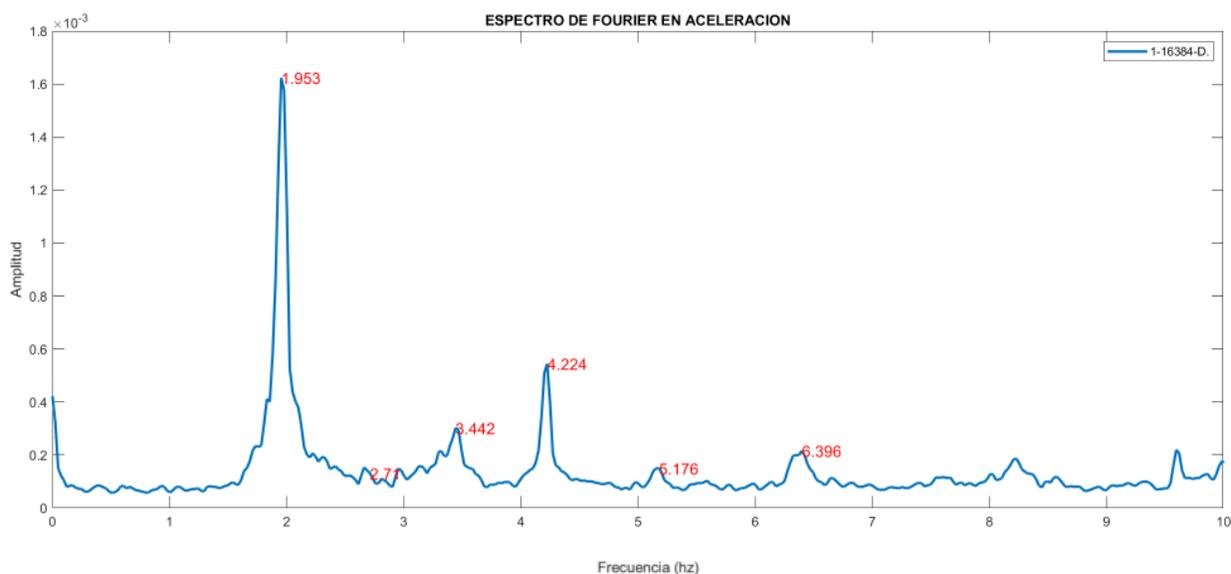
Nota: Registros de frecuencia en la primera medición con diferentes Smothing. Elaboración propia.

En resumen, cada espectro de Fourier se realizó el procesamiento de los datos de las mediciones en el punto medio del puente, teniendo en cuenta la cantidad de ventanas de Hanning (20 ventanas), 16384 puntos en la representación de la transformada de Fourier, y un nivel de suavizado bajo. Con ello, los espectros lograr una mejor apreciación de las frecuencias.

A continuación, se mostrará los espectros de Fourier en aceleración de las nueve mediciones con seis modos.

Figura 20

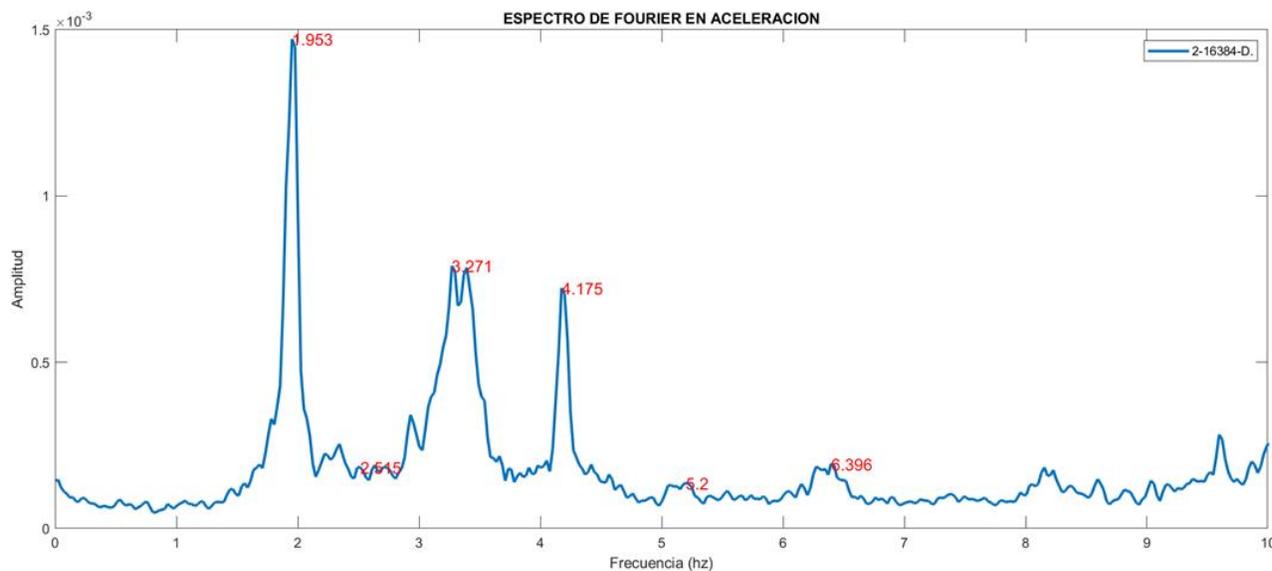
Espectro de Fourier en la prueba 1



Nota: Registros de frecuencia en la primera medición en el punto medio del puente en seis modos de vibrar, el número resaltado en cada curva representa el promedio máximo de análisis. Elaboración propia.

Figura 21

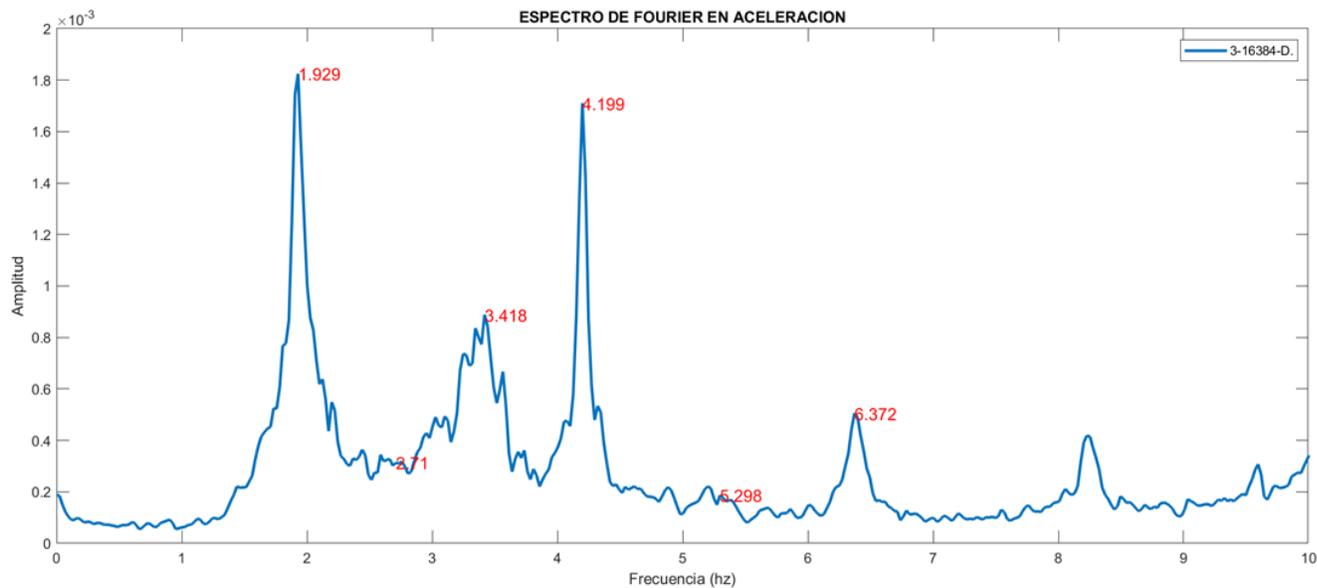
Espectro de Fourier en la prueba 2



Nota: Registros de frecuencia en la segunda medición en el punto medio del puente en seis modos de vibrar, el número resaltado en cada curva representa el promedio máximo de análisis. Elaboración propia.

Figura 22

Espectro de Fourier en la prueba 3



Nota: Registros de frecuencia en la tercera medición en el punto medio del puente en seis modos de vibrar, el número resaltado en cada curva representa el promedio máximo de análisis. Elaboración propia.

Figura 23

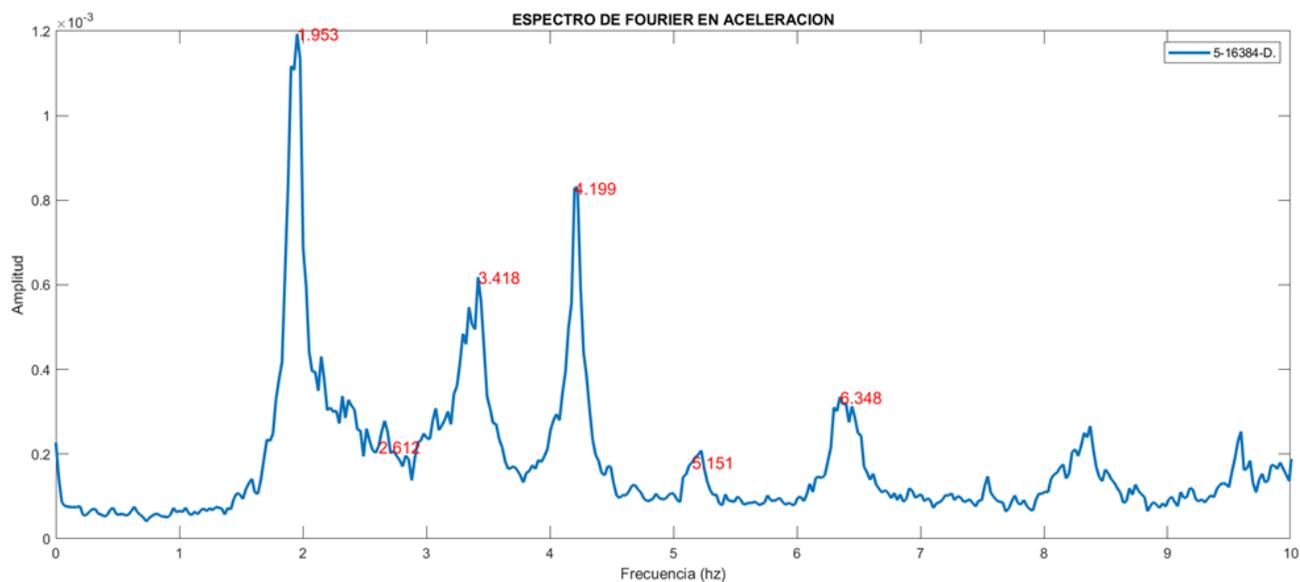
Espectro de Fourier en la prueba 4



Nota: Registros de frecuencia en la cuarta medición en seis modos de vibrar, el número resaltado en cada curva representa el promedio máximo de análisis. Elaboración propia.

Figura 24

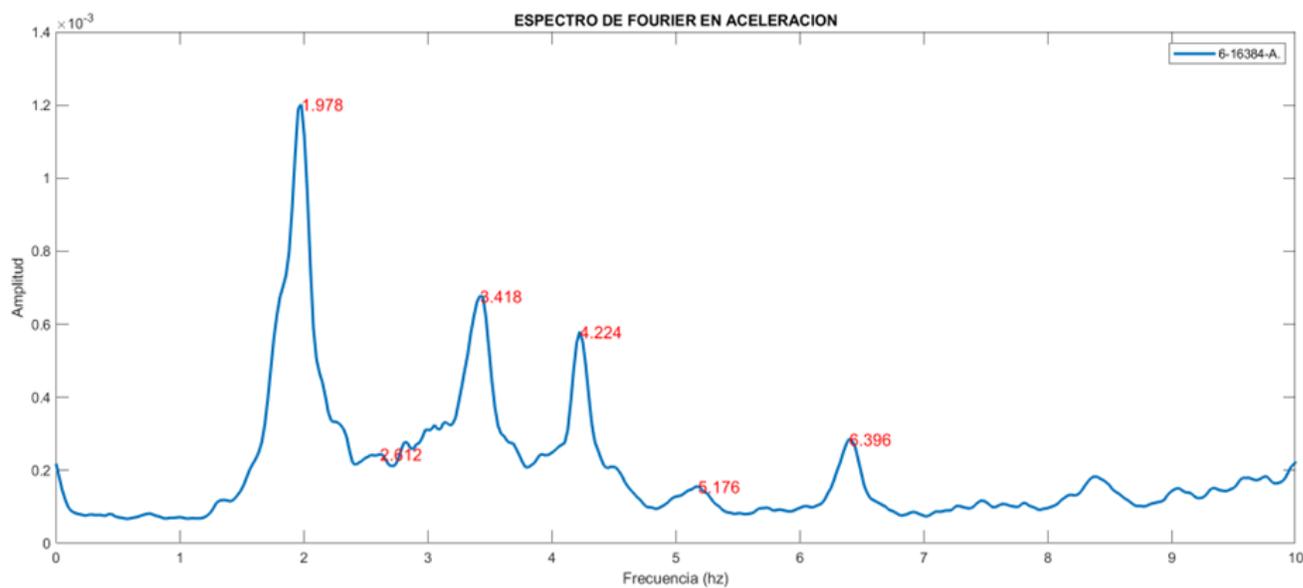
Espectro de Fourier en la prueba 5



Nota: Registros de frecuencia en la quinta medición en el punto medio del puente en seis modos de vibrar, el número resaltado en cada curva representa el promedio máximo de análisis. Elaboración propia.

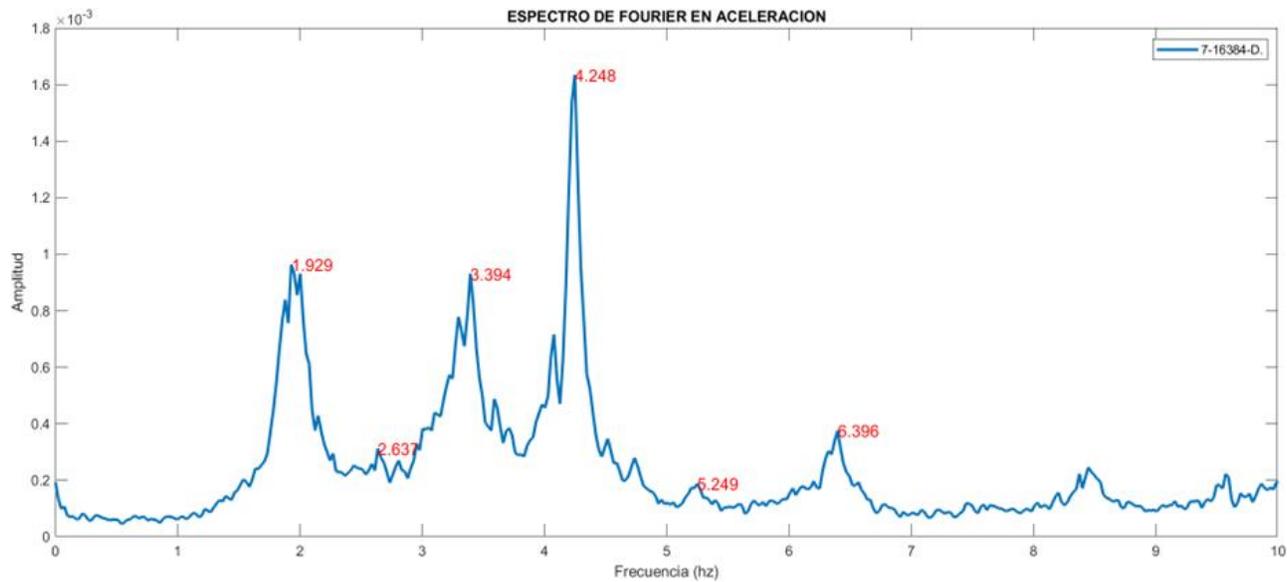
Figura 25

Espectro de Fourier en la prueba 6



Nota: Registros de frecuencia en la sexta medición en el punto medio del puente en seis modos de vibrar, el número resaltado en cada curva representa el promedio máximo de análisis. Elaboración propia.

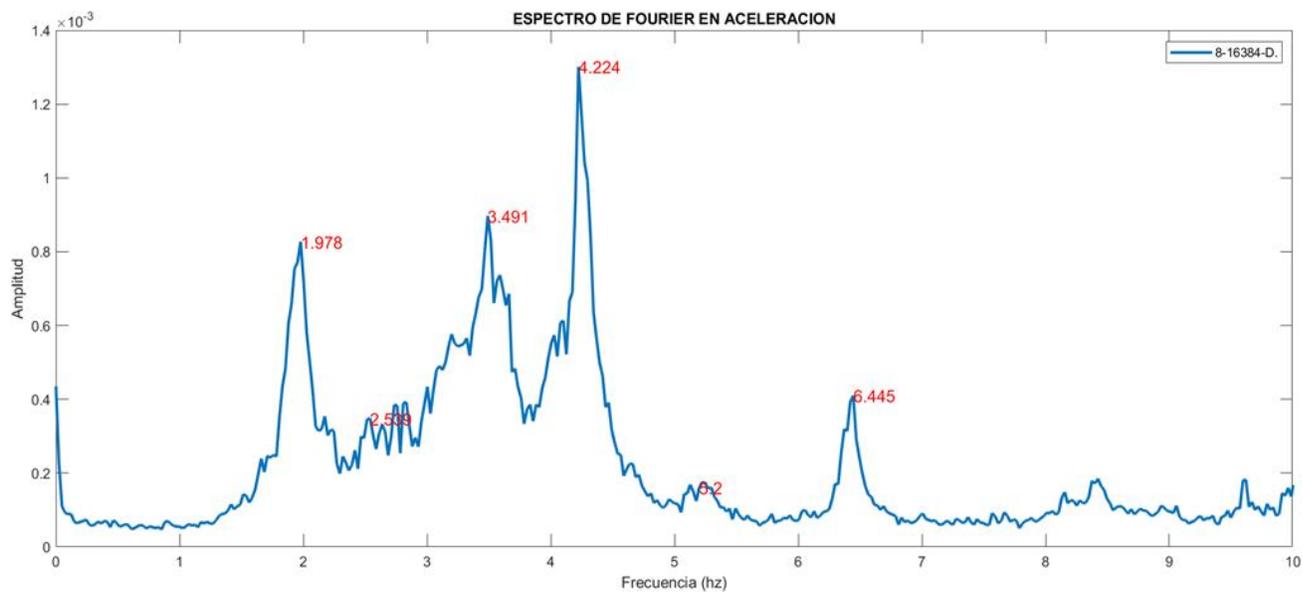
Figura 26

Espectro de Fourier en la prueba 7

Nota: Registros de frecuencia en la séptima medición en el punto medio del puente en seis modos de vibrar, el número resaltado en cada curva representa el promedio máximo de análisis. Elaboración propia.

Figura 27

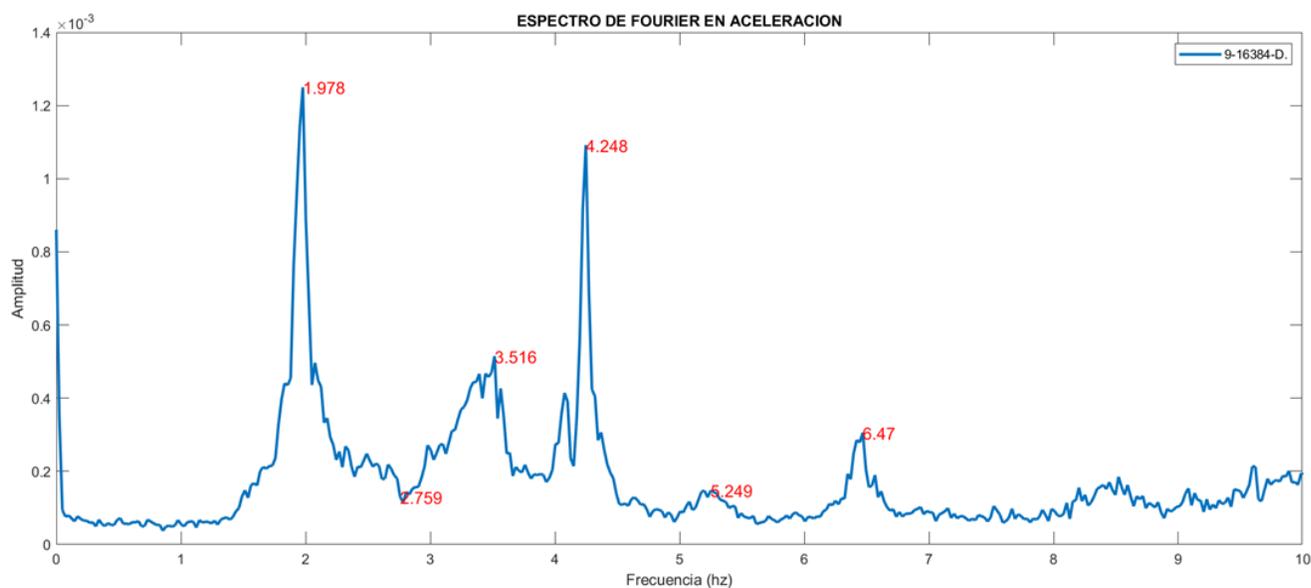
Espectro de Fourier en la prueba 8



Nota: Registros de frecuencia en la octava medición en el punto medio del puente en seis modos de vibrar, el número resaltado en cada curva representa el promedio máximo de análisis. Elaboración propia.

Figura 28

Espectro de Fourier en la prueba 9



Nota: Registros de frecuencia en la novena medición en el punto medio del puente en seis modos de vibrar, el número resaltado en cada curva representa el promedio máximo de análisis. Elaboración propia.

4.1.2 Espectrogramas

En los espectrogramas de cada medición del puente representan de manera conjunta los dos dominios de análisis de los datos del monitoreo, es decir, la representación del dominio del tiempo y la representación del dominio de la frecuencia.

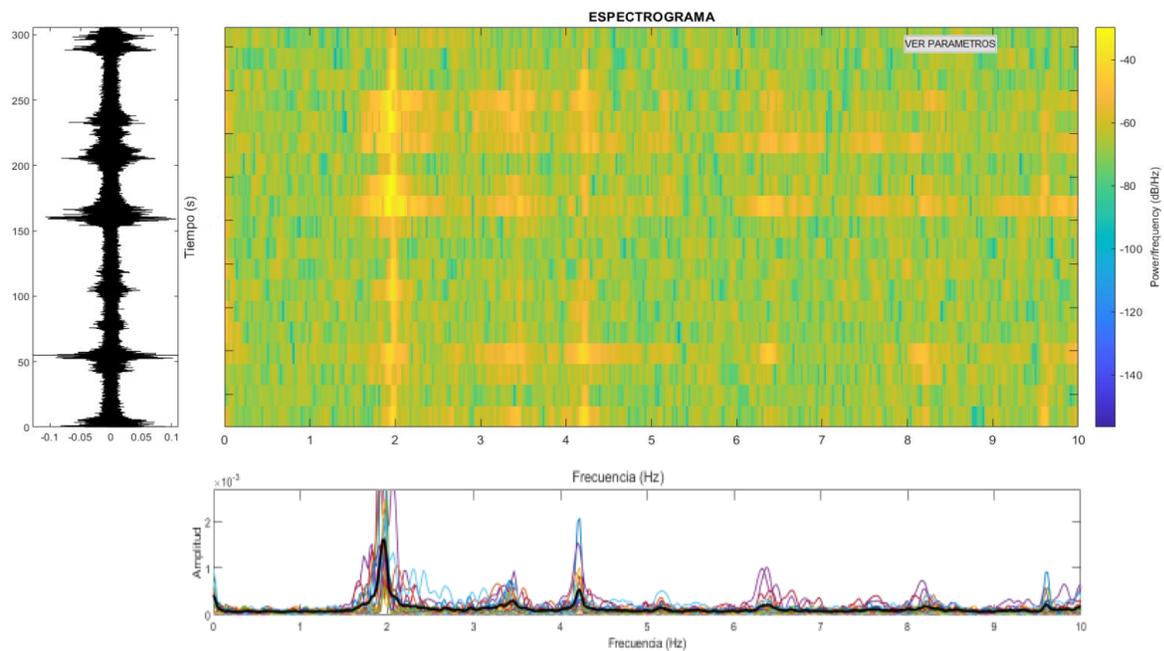
En el espectrograma se aprecia la permanencia en el tiempo de las frecuencias reales identificadas en el puente, indistintamente si el mismo esté con un niveles altos o bajos de excitación. Esto se logra ver con las zonas de mayor energía (en color amarillo) en el espectrograma en los valores de frecuencia de los modos identificados en los monitoreos del puente.

En el grafico inferior de las figuras se observa curvas de colores que representan las ventanas de análisis. La curva negra que se encuentra en cada procesamiento de datos es la frecuencia promedio de todas las ventanas.

En los siguientes espectrogramas se observan las frecuencias con respecto al tiempo de prueba, aproximadamente andan entre los 300 s o tiempos mayores. Se observa que hay frecuencias que siempre se encuentran en la estructura, las cuales son propias de sus modos de vibrar.

Figura 29

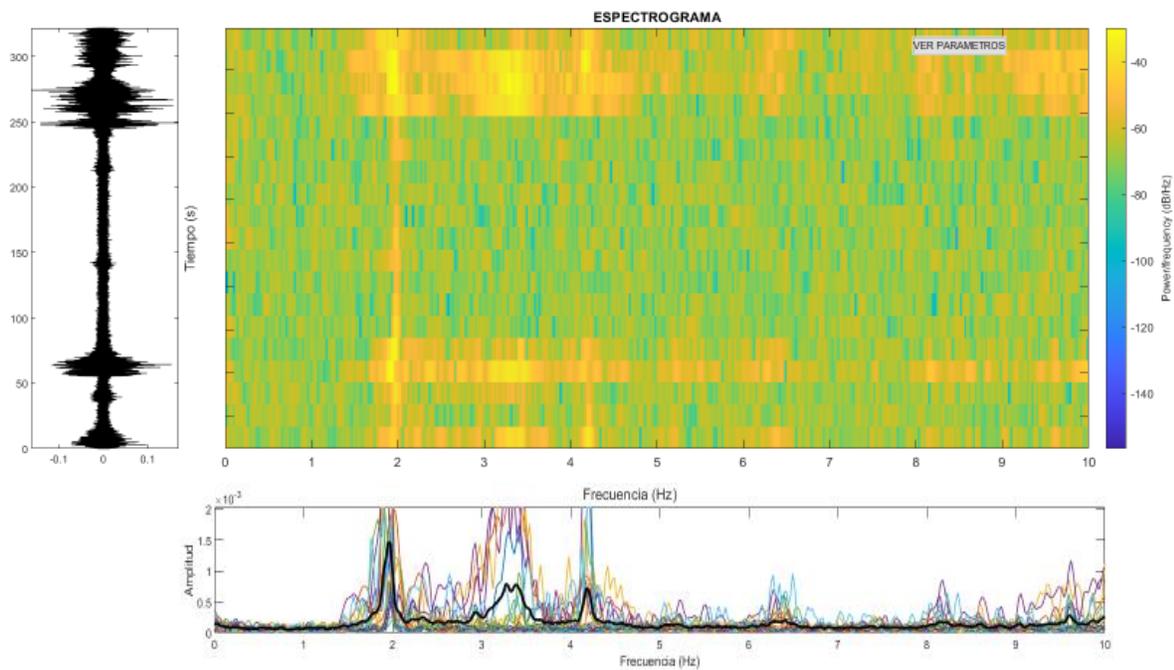
Espectrograma en la prueba 1



Nota: Registros de frecuencia con respecto al tiempo de medición en la medición 1.
Elaboración propia.

Figura 30

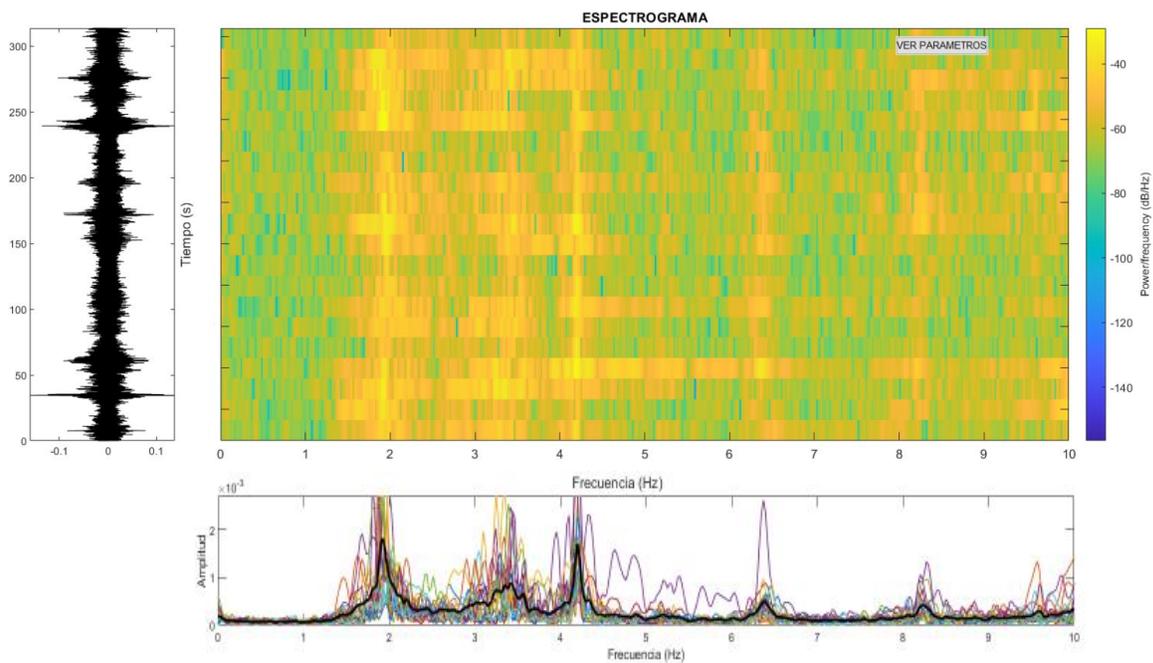
Espectrograma en la prueba 2



Nota: Registros de frecuencia con respecto al tiempo de medición en la medición 2.
Elaboración propia.

Figura 31

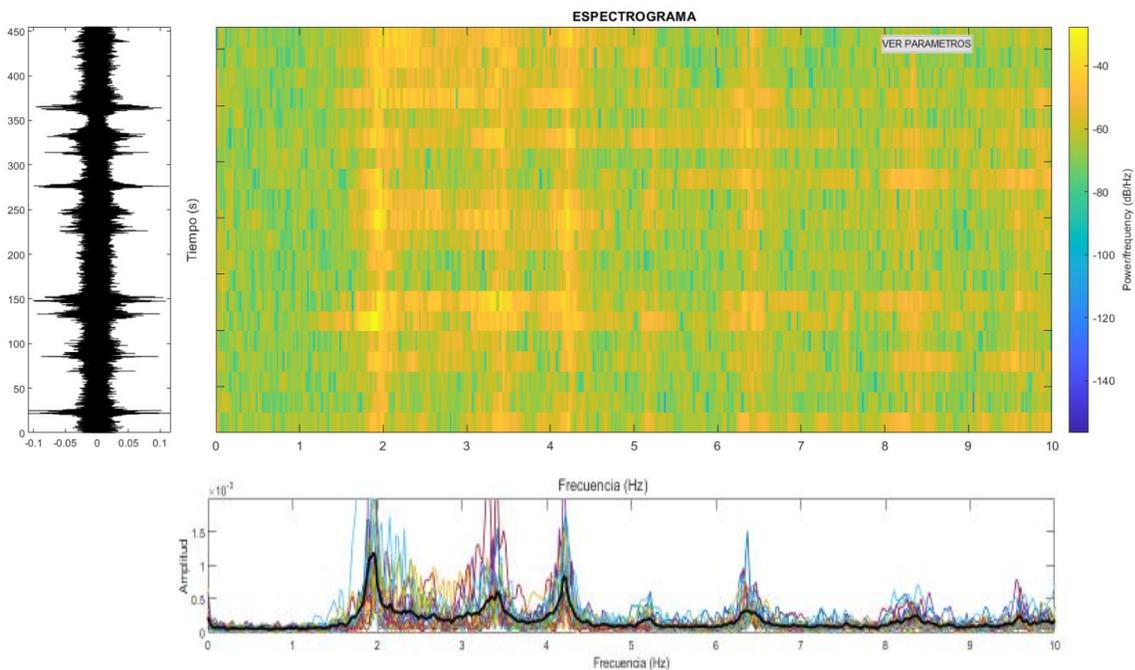
Espectrograma en la prueba 3



Nota: Registros de frecuencia con respecto al tiempo de medición en la medición 3.
Elaboración propia.

Figura 32

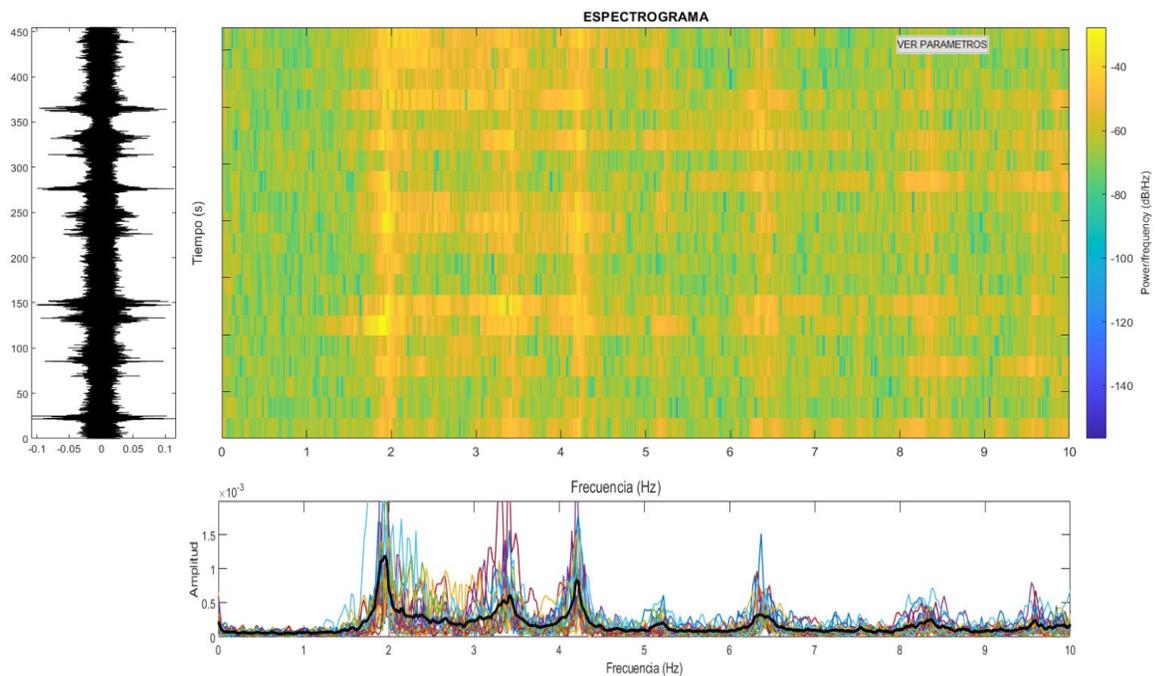
Espectrograma en la prueba 4



Nota: Registros de frecuencia con respecto al tiempo de medición en la medición 4.
Elaboración propia.

Figura 33

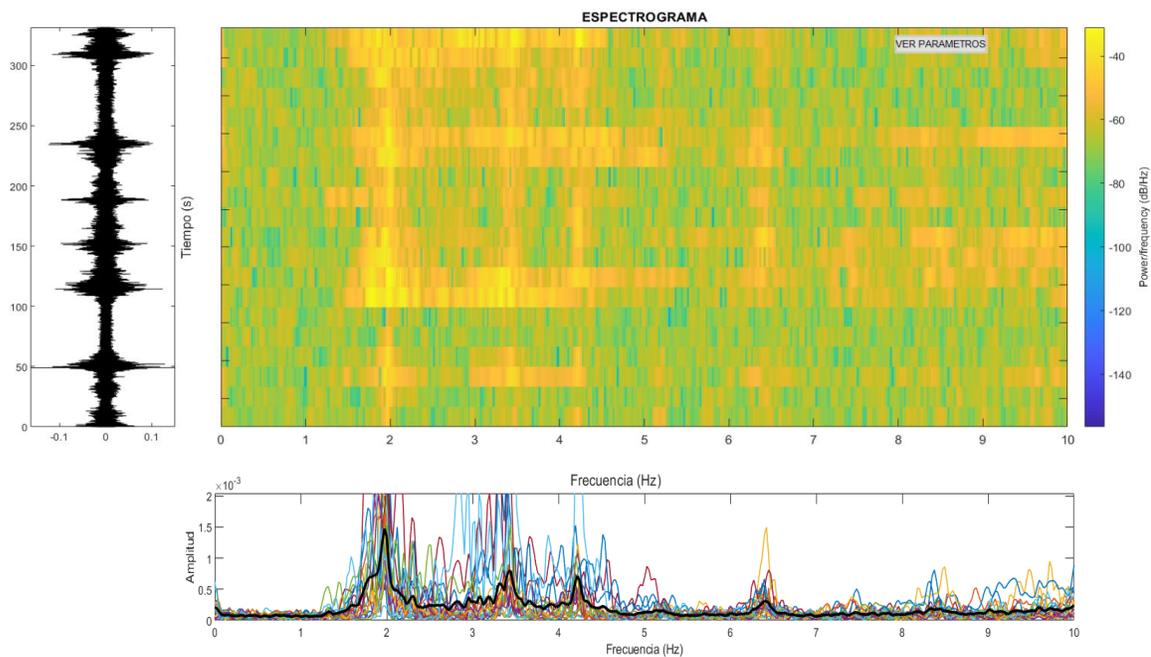
Espectrograma en la prueba 5



Nota: Registros de frecuencia con respecto al tiempo de medición en la medición 5.
Elaboración propia.

Figura 34

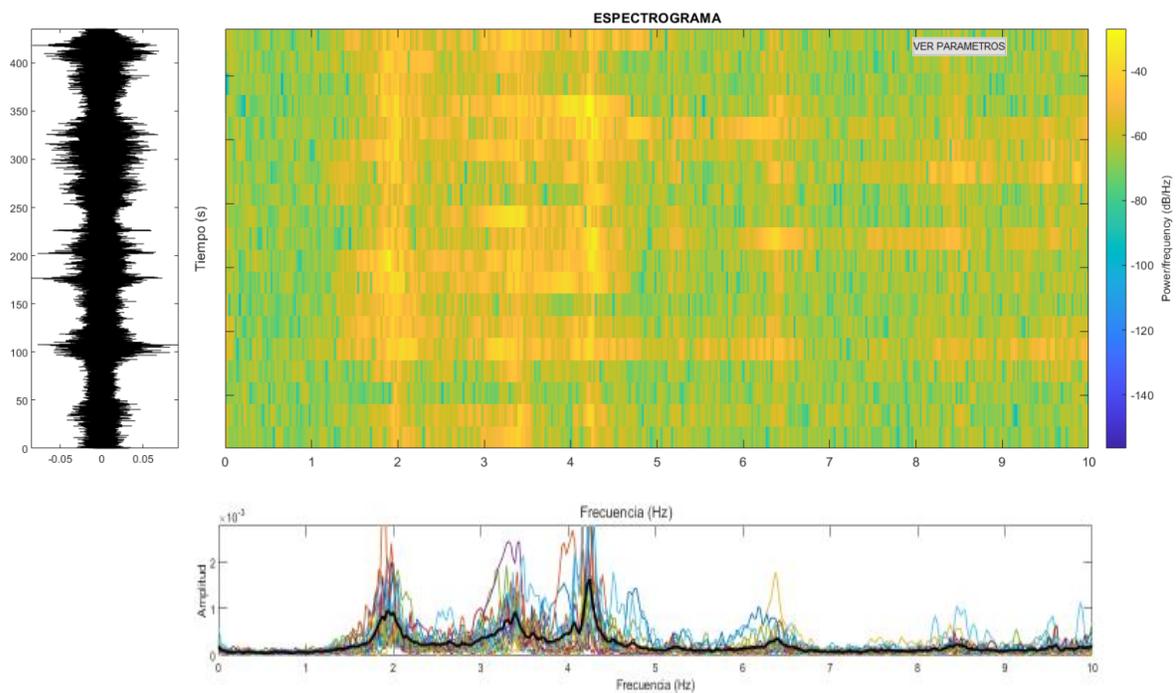
Espectrograma en la prueba 6



Nota: Registros de frecuencia con respecto al tiempo de medición en la medición 6.
Elaboración propia.

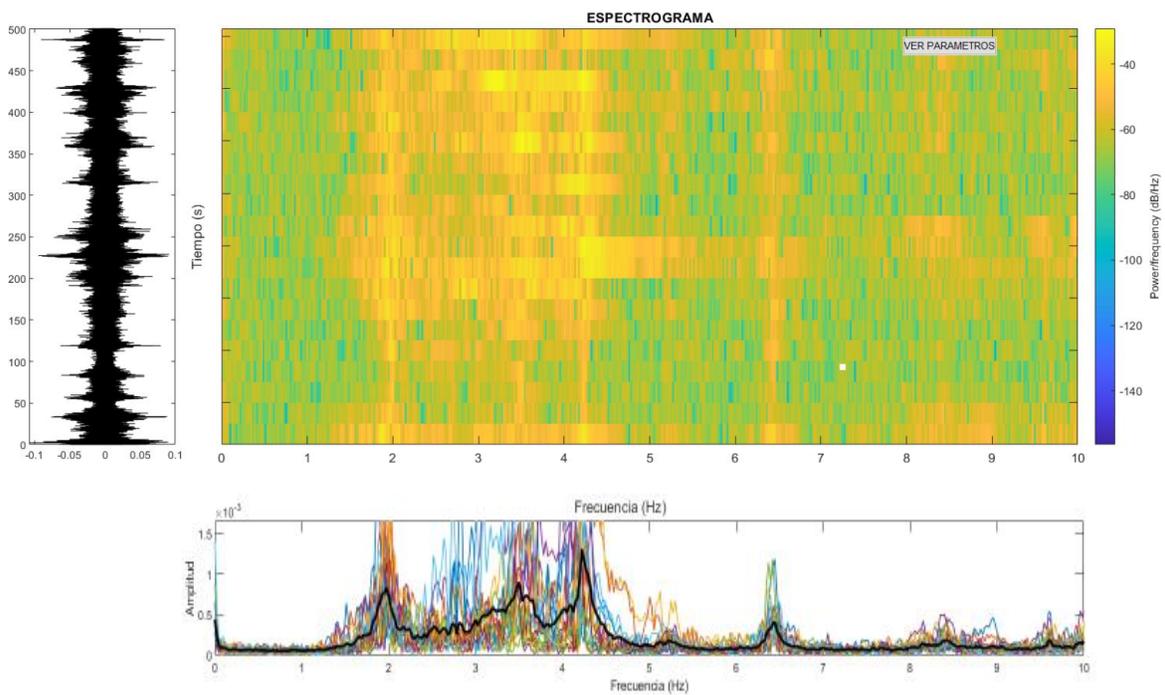
Figura 35

Espectrograma en la prueba 7



Nota: Registros de frecuencia con respecto al tiempo de medición en la medición 7.
Elaboración propia.

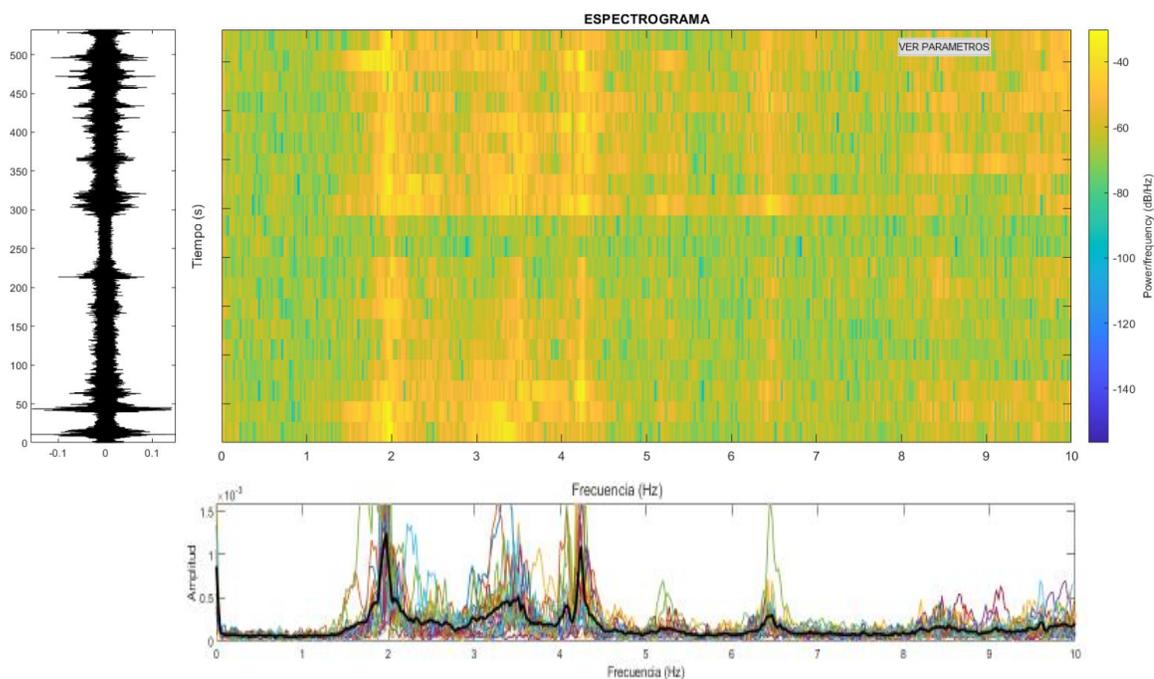
Figura 36

Espectrograma en la prueba 8

Nota: Registros de frecuencia con respecto al tiempo de medición en la medición 8.
Elaboración propia.

Figura 37

Espectrograma en la prueba 9



Nota: Registros de frecuencia con respecto al tiempo de medición en la medición 9. Elaboración propia.

4.1.3 Modos y temperatura

En la siguiente tabla se resume seis modos identificados en el análisis de la estructura. Los datos permiten ser comparados entre las distintas temperaturas experimentadas en el momento de cada prueba. Con ello se logra determinar las variaciones.

Tabla 3

Tabla de mediciones

Puente	Frecuencias (Hz)								
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Medición 6	Medición 7	Medición 8	Medición 9
Modo A	1,953	1,953	1,929	1,953	1,953	1,978	1,929	1,978	1,978
Modo B	2,661	2,515	2,71	2,661	2,612	2,661	2,637	2,539	2,759
Modo C	3,442	3,271	3,418	3,394	3,418	3,442	3,394	3,491	3,516
Modo D	4,224	4,175	4,199	4,224	4,199	4,224	4,248	4,224	4,248
Modo E	5,151	5,2	5,298	5,176	5,151	5,151	5,249	5,2	5,249
Modo F	6,396	6,396	6,372	6,372	6,348	6,396	6,396	6,445	6,47

Nota: Registros de frecuencia en cada prueba y cada modo. Elaboración propia.

Para cada medición en las distintas horas se tomaron datos de temperatura en la estructura para ser comparados con las frecuencias. Obteniendo temperaturas desde los 22,28°C hasta los 36°C. En la siguiente tabla se resumen las temperaturas promedias de cada monitoreo, durante aproximadamente diez horas.

Tabla 4

Tabla de temperaturas

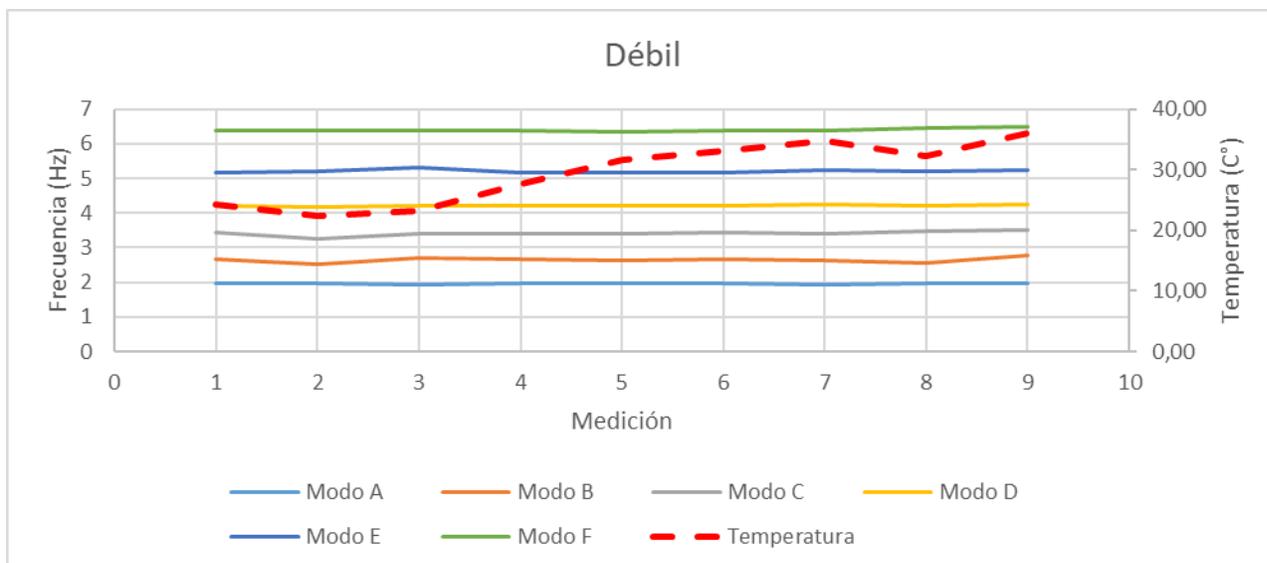
Temperatura °C	
Medición 1	24,22
Medición 2	22,28
Medición 3	23,16
Medición 4	27,63
Medición 5	31,63
Medición 6	33,03
Medición 7	34,84
Medición 8	32,22
Medición 9	36,00

Nota: Registros de temperatura en cada prueba, con diferentes variaciones por las horas de medición. Elaboración propia.

Para lograr entender mejor la relación que tienen las frecuencias naturales de la estructura con respecto a la temperatura, se creó un gráfico de los nueve registros. En la figura 40 se muestra una relación entre ambos parámetros, y se muestra el cálculo de una tendencia lineal para todas las frecuencias.

Figura 38

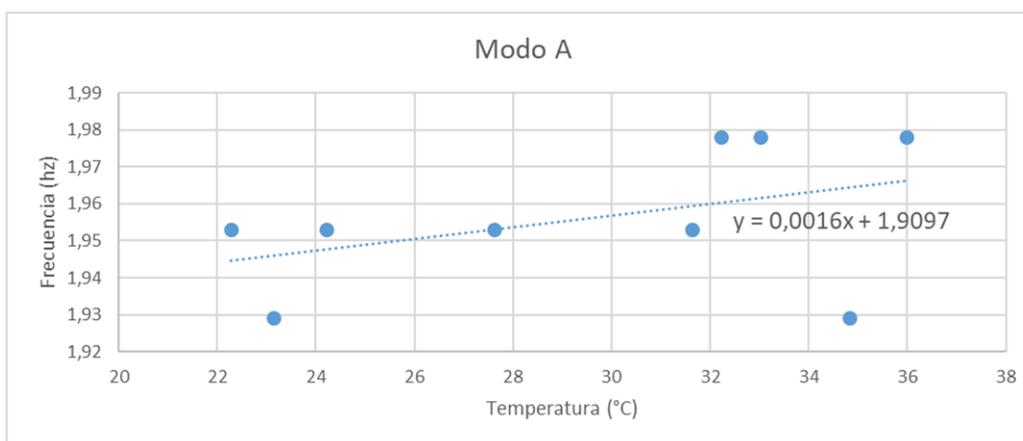
Frecuencias naturales y temperatura



Nota: Registros de temperatura y frecuencias naturales durante las nueve mediciones.
Elaboración propia.

Figura 39

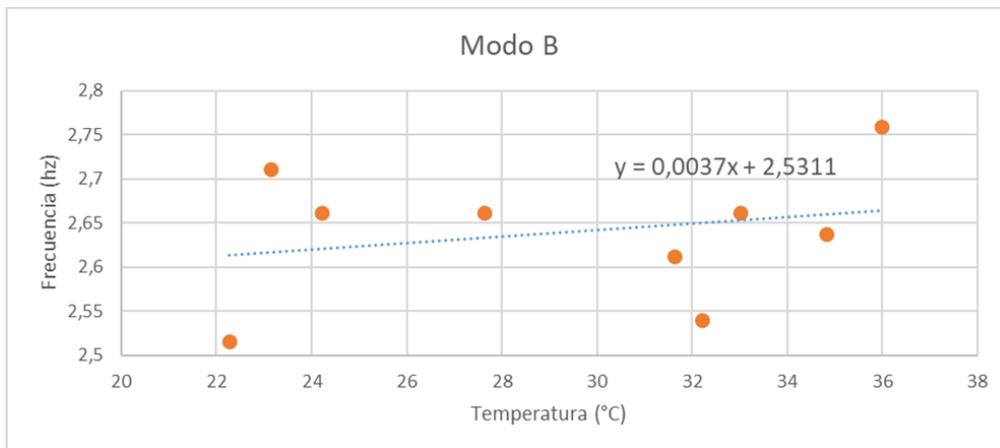
Frecuencias naturales y temperatura del modo A



Nota: Registros de temperatura y frecuencias naturales en el modo A. Elaboración propia.

Figura 40

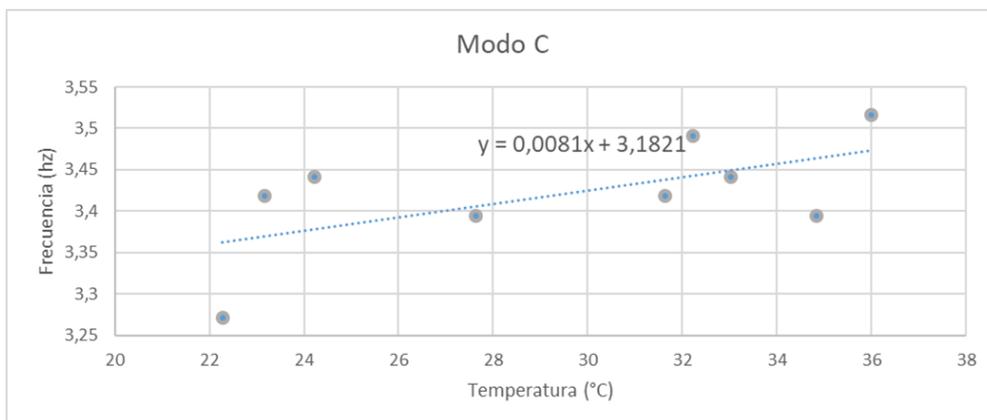
Frecuencias naturales y temperatura del modo B



Nota: Registros de temperatura y frecuencias naturales en el modo B. Elaboración propia.

Figura 41

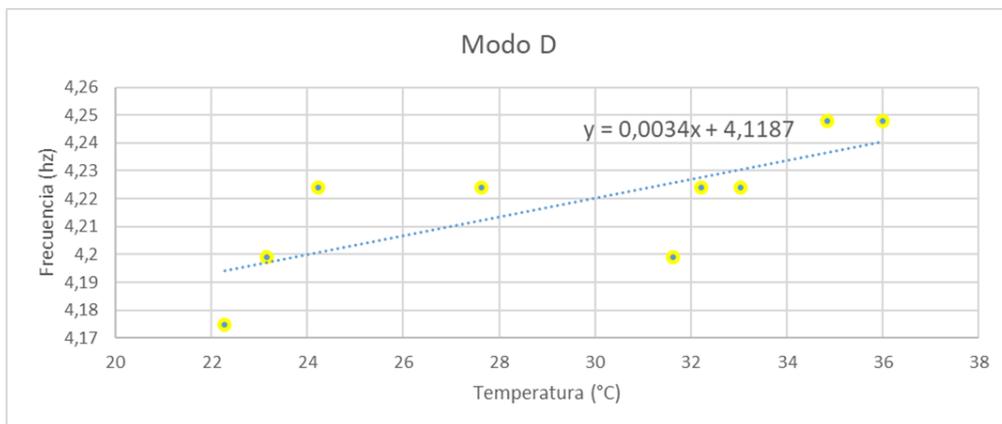
Frecuencias naturales y temperatura del modo C



Nota: Registros de temperatura y frecuencias naturales en el modo C. Elaboración propia.

Figura 42

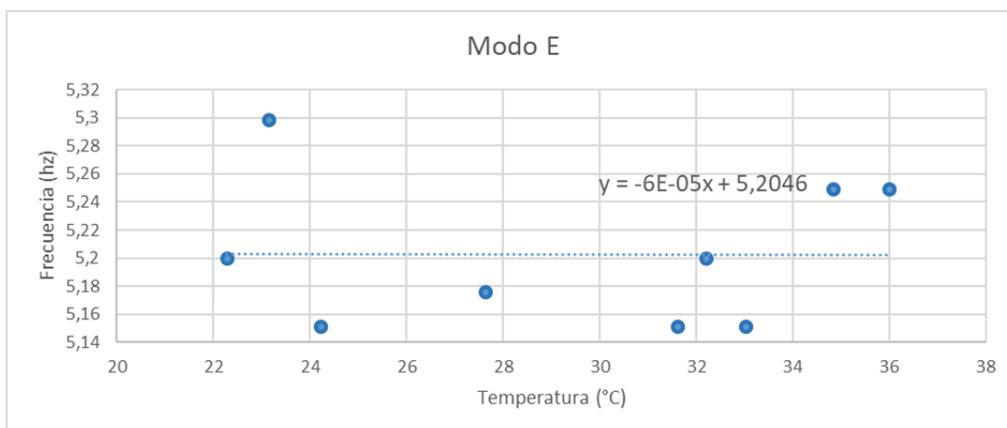
Frecuencias naturales y temperatura del modo D



Nota: Registros de temperatura y frecuencias naturales en el modo D. Elaboración propia.

Figura 43

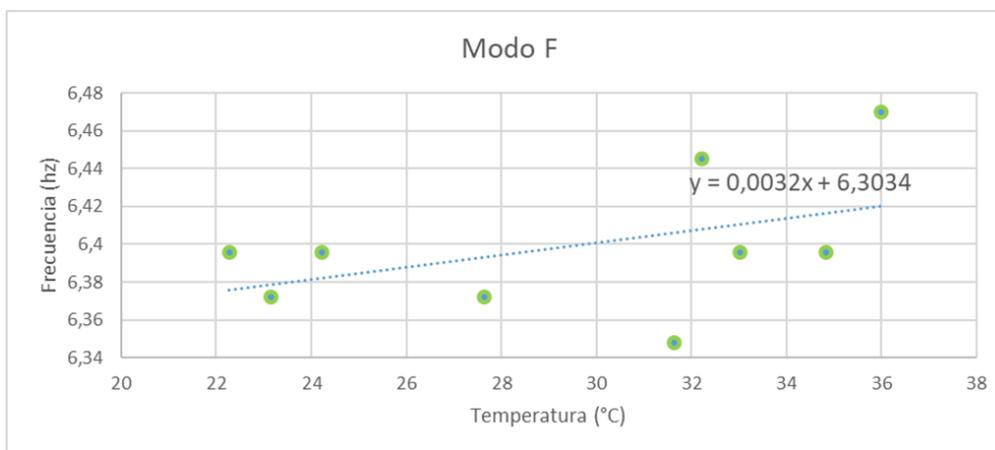
Frecuencias naturales y temperatura del modo E



Nota: Registros de temperatura y frecuencias naturales en el modo E. Elaboración propia.

Figura 44

Frecuencias naturales y temperatura del modo F



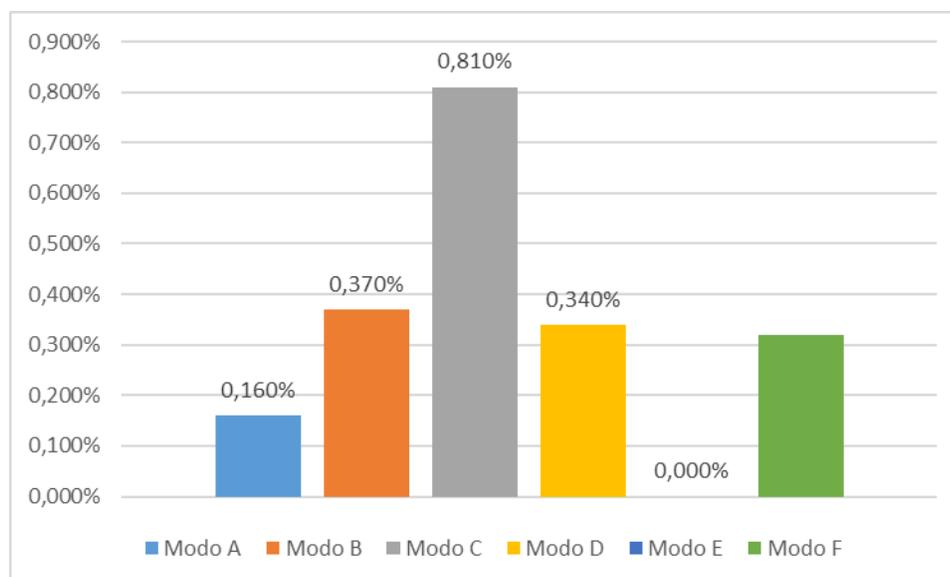
Nota: Registros de temperatura y frecuencias naturales en el modo F. Elaboración propia.

4.1.4 Variaciones de temperatura con respecto a las frecuencias de vibrar

A continuación, se observa los cambios en las frecuencias para cada modo de vibrar producto a una variación de un grado Celsius.

Figura 45

Variación lineal de frecuencia vs temperatura



Nota: Variaciones que deben ser tomadas en cuenta para la determinación de cualquier daño estructural. Elaboración propia.

A continuación, en la tabla siguiente se muestran las variaciones ocurridas en frecuencia de cada uno de los modos de vibrar identificados productos a los cambios experimentados en temperaturas ambiental durante el día del monitoreo.

Tabla 5

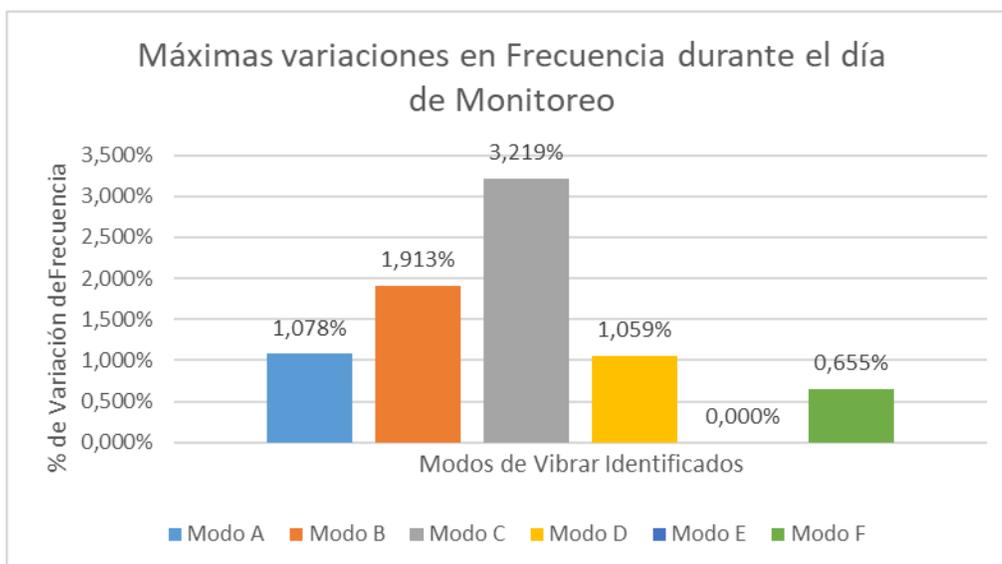
Tabla de máximas variaciones en frecuencia durante el día de monitoreo

Modo	Frecuencia mínima (Hz)	Tasa de Variación (Hz/°C)	Diferencial Máximo (°C)	Variación en Frecuencia (Hz)	% de Variación
Modo A	1,929	0,160%	13	0,0208	1,078%
Modo B	2,515	0,370%	13	0,0481	1,913%
Modo C	3,271	0,810%	13	0,1053	3,219%
Modo D	4,175	0,340%	13	0,0442	1,059%
Modo E	5,151	0,000%	13	0	0,000%
Modo F	6,348	0,320%	13	0,0416	0,655%

Nota Variaciones máximas de frecuencias durante el día de monitoreo. Elaboración propia.

Figura 46

Máximas variaciones en frecuencia durante el día de monitoreo



Nota: Porcentajes de las variaciones máximas de frecuencias en el monitoreo. Elaboración propia.

4.2 Discusiones

4.2.1 Variaciones de temperatura

Las variaciones de temperatura en Costa Rica no son tan cambiantes como en otros países donde en un día se pueden experimentar temperaturas muy bajas y luego temperaturas mucho mayores.

En Costa Rica, al presentarse variaciones tan bajas, produce que los cambios en frecuencias no sean tan significativos como los que se pueden experimentar en otros países.

4.2.2 Condiciones de Contorno

Los rangos de variación en frecuencia debido a los cambios de temperatura, pueden estar siendo influenciados por las condiciones de contorno, ya de cierta forma, las elongaciones o contracciones del puente pueden estar sido restringidas por los apoyos.

4.2.3 Tramos adyacentes

Al aplicar monitoreos en los tramos adyacentes de la estructura se puede verificar si hay diferencias en las frecuencias de vibrar distintas, ya que este puente tiene una superestructura continua y su libertad de deformación es controlada por esta continuidad.

5 Conclusiones

- Se obtuvieron con éxito datos de aceleración en el dominio del tiempo mediante el monitoreo con tan solo un sensor en el puente de Quebrada Salitral ruta N° 27.
- Con el software Matlab y el programa ADDA se procesaron los datos del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias para ser analizados con éxito.
- Se identificaron las frecuencias de vibrar en el puente y se comparó con respecto a la temperatura de cada medición del puente, mostrando pendiente positiva entre la temperatura y las frecuencias.
- La temperatura en Costa Rica no tiene grandes variaciones como en otros países donde se pueden analizar cambios de frecuencias mayores con respecto a la temperatura.
- Las tasas de variación de frecuencia para los modos de vibración identificados son: Para el Modo A igual a 0.16%; para el Modo B igual a 0.37%; para el Modo C igual a 0.81%; y para modos superiores inferiores a 0.11%, todas ellas en Hz/°C.
- El modo que sufrió más variación es el modo C con respecto a los cambios de temperatura ambiental, equivalente a 0.37%.
- El modo que sufrió menos variación es el modo E con respecto a los cambios de temperatura ambiental, el cual se mantuvo sin variación.
- Las variaciones máximas en frecuencias identificadas durante el día que se realizó el monitoreo, en donde la temperatura mínima fue de 22,28 °C y la máxima 36 °C tienen diferencias que van desde los 0,808% hasta 3,219%. Esto significa que en momentos de verificación de cambios dinámicos producto a eventos de daño (terremotos, huracanes, impactos de estructura, entre otros) se debe considerar los márgenes encontrados producto a los cambios térmicos del puente para así no sobreestimar, o bien descartar, la ocurrencia de daño en la estructura.

6 Recomendaciones

- Realizar monitoreos en los claros adyacentes al tramo central, con el propósito de determinar si hay diferencias las tasas de variación de la frecuencia debido a la temperatura entre los distintos tramos, o bien, para promediar el comportamiento global del puente.
- Se recomienda realizar estas pruebas de monitoreos en diferentes puentes metálicos ubicados en distintas zonas del país y distintas temporadas del año para ampliar el espacio físico/temporal de los análisis.
- En los análisis de datos se recomienda aplicar ajustes a los espectros de Fourier, evaluando la cantidad de ventanas de Hanning, o el número de puntos continuos usados en el cálculo del espectro, lo que puede influir en la precisión de los resultados.
- Aplicar este método de monitoreo en otros puentes con tipologías similares, para determinar si las variaciones entre frecuencias y las temperaturas son ascendentes, y determinar si en puentes de un solo tramo este comportamiento se revierte (descendente).

7 Referencias bibliográficas

- Alvandi, A., Cremona, C. (2006). *Assessment of vibration- based damage identification techniques*. ELSEVIER, vol. 292, 179-202.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022460X05004980>
- Araujo, I. G., Rondón, E. M., & Cho, G. C. (2010). Pruebas de vibración ambiental en puentes. *Revista UIS Ingenierías*, 9(1), 55-68.
<https://www.redalyc.org/pdf/5537/553756877004.pdf>
- Bobadilla, J., Gómez, P., & Bernal, J. (1999). *La transformada de Fourier. Una visión pedagógica*. Estudios de fonética experimental, 41-74.
<http://www.raco.cat/index.php/EFE/article/view/144488>
- Casares, O. (2014). *Muestreo comprimido en red inalámbrica de sensores para monitorización de vibración en puentes*. Tecnología en Marcha. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014.
- Castillo, A. E., & Boroschek, R. L (s.f) CÓDIGO NA14-11 USO DEL MÉTODO DE FRECUENCIA NO PARAMETRICA Y SSI PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES MODALES DE EDIFICIOS.
https://boroschek.files.wordpress.com/2013/01/2005_achisinassi.pdf
- CONAVI (s.f). *Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP)*.
https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagIdentificarPuente.faces
- Cortés, J. A., Medina, F. A., & Chaves, J. A. (2007). *Del análisis de fourier a las wavelets análisis de fourier*. *Scientia et technica*, 1(34).
<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5563>
- De la Fraga, L. (2001). *La transformada discreta de Fourier y la transformada rápida de Fourier*.
<http://delta.cs.cinvestav.mx/~fraga/Cursos/PDI/tdf.pdf>
- Díaz, F., Reyes, A. (2012). *Aceros, estructuras y tratamientos térmicos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/aceros%20estructuras%20y%20tratamientos%20termicos.pdf

- E. Moreno et al. (2005). *Determinación de las frecuencias fundamentales mediante análisis de frecuencia por impacto*. https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Analisis-de-Frecuencia-en-el-Modo-Torsion-a-Senal-en-el-dominio-del-tiempo_fig1_268434228.
- Esfarjani, S. M., Salehi, M., & Ghassemi, A. (2017). *Effect of the multiple damages and temperature changes on the natural frequency*. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 55(3), 813-822.
- Fernández, M. J., Manguan, M. C., Simón, F., Díez, J. L., & Riobóo, J. L. (2009). *Influencia de la masa sobre la vibración inducida por ruido en placas*. In *Tecniacústica 2009*.
- García, A.E, Garrido, F.H, Gallardo, J.M. (2019). *Estudio del período de vibración de puentes con vigas de acero en Panamá* *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 1, pp. (12-21).
- Gutiérrez, Y., y Muñoz, G. (2016). *Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP)*. *Revista del Centro de Transferencia y Tecnología*. MOPT. Vol. 23-24 (2015-2016). <https://revista.mopt.go.cr/revista/index.php/revista/article/view/31/30>
- Hagedorn, R. (2016). *Impact of Extreme Summer Temperatures on Bridge Structures*. University of Arkansas.
- Hormazábal, M. (2018). *Análisis de modos de vibración en estructuras mediante registro de vibraciones de ruido ambiente*. <http://hdl.handle.net/10498/21095>
- Información de inventario para puentes en la red vial nacional de Costa Rica*. [JPG]. No. Oficio: LM-PI-UP-02-2016. (marzo, 2016). San José, Costa Rica. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1035/LM-PI-UP-02-2016%20Informaci%c3%b3n%20de%20inventario%20para%20puentes%20de%20la%20Red%20Vial%20Nacional%20de%20CR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Jaimés, Á. V., Rey, L. H., & Páez, S. A. (2017). *Determinación de la capacidad resistente de puentes viga-losa en concreto postensado mediante pruebas de vibración ambiental: Caso de estudio Puente El Ramo*. *Inge Cuc*, 13(1), 32-41. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.13.1.2017.03>

La ventana de Hanning. <https://azimadli.com/vibman-spanish/laventanahanning.htm#:~:text=La%20ventana%20Hanning%20llamada%20por,se%20ve%20en%20la%20gr%C3%A1fica>.

Martínez, A. (2018). *Transformada Rápida de Fourier Implementación y algunas Aplicaciones*. Universidad de Murcia. https://www.um.es/documents/118351/9850722/Mart%C3%ADnez+Manzano+TF_48705250_v2.pdf/c44507c8-e990-4aac-b282-927acadcedd1

Marulanda, J., Thomson, P., & Marulanda, J. (2000). Monitoreo de salud estructural. *Ingeniería y Competitividad*, 2(2), 40-46. https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2342

Matlab. (s.f). *Diseño de filtro paso bajo con Matlab.* <https://la.mathworks.com/discovery/low-pass-filter.html#:~:text=Los%20filtros%20paso%20bajo%20producen,el%20filtro%20de%20media%20m%C3%B3vil>.

Matlab. (s.f). *Filtrar y suavizar datos.* <https://la.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-data.html>.

Matlab. (s.f). *Suavizado.* <https://la.mathworks.com/help/curvefit/smoothing.html>.

Miguel Tejada, A. D. (2011). *Análisis dinámico de estructuras en el dominio de la frecuencia* (Doctoral dissertation, Caminos). https://oa.upm.es/9546/1/Alejandro_de_Miguel_Tejada.pdf

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2007). *Manual de inspección de puentes.* https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/31625228-76c4-44cf-963e-8d8b31540a79/manual_inspeccion2007.pdf?MOD=AJPERES

Moorty, S., Roeder, C.W. (1992). *Temperature- Dependent Bridge Movements*. ASCE, vol. 118. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:4\(1090\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:4(1090))

Orrego, J. L. (1934). Efectos dinámicos en los puentes. In *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* (No. 11, pp. ág-525).

- Presidencia. (2017). *MOPT inicia detallado proceso de inspección de puentes de rutas nacionales*. Comunicados de infraestructura Transporte. <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2017/09/mopt-inicia-detallado-proceso-de-inspeccion-de-puentes-de-rutas-nacionales/>.
- Proceso de Planificación Estrategia Multimodal de Servicios de Infraestructura y de Transporte, (2016). *Anuario de Información de Transito 2015*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. <https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/877d6952-d297-4678-9ce7-575a35e7791f/AnuarioTransito2015.pdf?MOD=AJPERES>
- Rodríguez, M.F (2021). *Efectividad del uso de un sensor para la obtención de frecuencias de vibrar en los puentes río Virilla ruta N°27 y N°3, Quebrada Salitral ruta N°27, Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura no publicada]. Universidad Latina de Costa Rica.
- Runebook.dev. (s.f). *Devuelve la ventana de Hanning*. <https://runebook.dev/es/docs/numpy/reference/generated/numpy.hanning>.
- Saavedra, P. (2011). *La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación*. Facultad de Ingeniería- Universidad de Concepción, Chile.
- Schmidt, A. L. (2013). *Fft: Transformada rápida de fourier*. Estudiante de Ingeniería en Sistemas de Computación. Universidad Nacional de Sur. Bahia Blanca, Argentina. <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-Schmidt%20Ana%20Luc%C3%ADa.pdf>
- SENSR (2010). *GP2x USB Accelerometer User Guide*. <https://sensr.com/downloads/R001-421-V1.0%20GP2-X%20USB%20Accelerometer%20User%20Guide.pdf>.
- Serna, D. (2020). *Tipos de puentes metálicos*. <https://domingoserna.com/news/tipos-puentes-metalicos/>
- Sohn, H., Dzwonczyk, M., Straser, E. G., Kiremidjian, A. S., Law, K. H., & Meng, T. (1999). *An experimental study of temperature effect on modal parameters of the Alamosa Canyon Bridge*. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 28(8), 879-897.

- Unidad de Puentes (2013). *Monitoreo y Evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de instrumentación inalámbrico*. Programa de Infraestructuras del Transporte (PITRA). <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1382/LM-PI-UP-02-2013Monitoreo%20y%20evaluaci%3%adon%20estructural%20de%20puentes%20utilizando%20un%20sistema%20de%20instrumentaci%3%b3n%20inal%3%a1mbrico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Unidad de Puentes (2018). *Verificación del monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales*. Superestructura del puente Quebrada Salitral sobre la ruta nacional N°27. LanammeUCR. https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1432/LM_PIE_UP_M02_2018_Monitoreo_Puente_Queb%20Salitral_RN27.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Unidad de Puentes LanammeUCR (2020). *Inspección especial del puente sobre la Quebrada Salitral Ruta Nacional N.º 27: Evaluación de la condición del tablero del puente debido a los desprendimientos de concreto en las juntas de construcción*. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/medios/documentos/2021/informe-especial-lanammeucr-puente-salitral-rn-27.pdf>
- Vázquez Rey, D. (2017). *Estudio y aplicación de métodos de identificación paramétrica en sistemas de tiempo discreto y su validación en equipos didácticos de laboratorio* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/108827>
- Zolghadri, N. (2015). *Effects of Temperature on Bridge Dynamic Properties*. The State University of New Jersey. <https://cait.rutgers.edu/wp-content/uploads/2018/05/cait-utc-050-final.pdf>

8 Anexos

Figura 47

Sensor GP2 x USB



Nota: Sensor ubicado en la dirección del eje x. Elaboración propia.

Figura 48

Monitoreo en el puente Quebrada Salitral ruta 27.



Nota: Toma de datos. Elaboración propia.

Figura 49

Pruebas de monitoreo en el puente Quebrada Salitral ruta 27.



Nota: Toma de datos. Elaboración propia.

Figura 50

Costado del puente Quebrada Salitral ruta 27.



Nota: Sentido ciudad Colón - Orotina. Elaboración propia.

Figura 51

Puente Quebrada Salitral ruta 27.



Nota: Circulación de vehículos. Elaboración propia.

Figura 52

Obstáculo físico



Nota: Obstáculo físico que genera un impacto en el puente y da mejor excitación para la determinación de los registros de vibración. Elaboración propia.

6 Glosario

Sensor: Los sensores que se utiliza para monitoreos se encargan de recopilar datos que se necesitan medir para mantener el control de variables para la seguridad, la gestión de riesgos, para la productividad y reducir costos.

Temperatura: La temperatura es una magnitud física que permite medir la cantidad de calor que hace en un cuerpo, objeto o ambiente.

Monitoreo: Un monitoreo estructural determina las vibraciones de las estructuras para evaluar la solidez y determinar si hay daños que requieres reparaciones o evacuaciones en estructuras civiles.

Frecuencias: Las frecuencias naturales son sistemas de baja vibración libre son las frecuencias naturales de un sistema. Depende de propiedad como la distribución de la masa y la rigidez.

Dinámica: Son representación de funciones del tiempo cuyo valor en cada instante es conocidos, es adecuado para poder evaluar el comportamiento de una estructura y un acontecimiento en lugar que se represente la acción.

LanammeUCR: es el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

Acelerómetros: Los acelerómetros son instrumentos para medir la aceleración o desaceleración de un vehículo para poder analizar las vibraciones que ocasiona y las oscilaciones.

Estructura: La estructura se es la disposición y distribución de elementos unidos entre sí, cuya relación entre elementos permiten el funcionamiento de un sistema.

Rigidez: Es la capacidad de resistir ante una deformación aplicada por cargas externas, por lo tanto, es algo riguroso, inflexible y severo.

SAEP: es el Sistema de Administración de Estructuras de Puentes, es un programa oficial de levantamiento e inventarios de puentes de la red vial nacional.

TPD: es el transito promedio diario, es la cantidad de vehículos que transitan sobre un segmento de la carretera.

Juntas de expansión: Las juntas de expansión son elementos divisorios de la losa instalados en los extremos de cada tipo de superestructura que permite la traslación o rotación, lo cual garantiza la expansión y contracción de la superestructura por temperatura y sismo.

Cabezal de concreto: Están compuesto por concreto reforzado, son de gran volumen y rigidez. Su función es conectar los pilotes que transfieren cargas.

Cuantitativo: Un análisis cuantitativo se refiere a utilizar técnicas matemáticas o estadísticas para poder llegar a pronosticas o explicar diferentes variables. Son basada en análisis matemáticos, que conllevan a resultados.

Matlab: Es un software matemático que su entorno se basa en programación de algoritmos, análisis de datos para visualizar y los cálculos numéricos. Desarrolla gráficas y explora los datos.