

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERIAS Y TICs

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil
Tesis de Grado

**“EFECTO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA EN EL
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL PUENTE SOBRE EL RÍO VIRILLA
EN LA RUTA NACIONAL 27 DE COSTA RICA”**

Autor:
Valeria María Sancho Solís

Tutor:
Ing. Luis Alejandro Carvajal Soto

San Pedro, diciembre 2022

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: Efecto del cambio de temperatura en el comportamiento dinámico del Puente sobre el Río Virilla en la Ruta Nacional 27 de Costa Rica, por el (la) estudiante: SANCHO SOLIS VALERIA MARIA, fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede San Pedro, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

LUIS ALEJANDRO
CARVAJAL SOTO
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por LUIS ALEJANDRO
CARVAJAL SOTO (FIRMA)
Fecha: 2023.01.10
12:28:08 -06'00'

Ing. Luis Alejandro Carvajal Soto
Tutor

GERARDO
ENRIQUE
CHACON
ROJAS (FIRMA)

Firmado digitalmente
por GERARDO
ENRIQUE CHACON
ROJAS (FIRMA)
Fecha: 2023.01.11
09:08:02 -06'00'

Ing. Gerardo Chacon Rojas
Lector

RONALD
EUGENIO
JIMENEZ CASTRO
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
RONALD EUGENIO
JIMENEZ CASTRO (FIRMA)
Fecha: 2023.01.10
18:55:48 -06'00'

Ing. Ronald Jiménez Castro
Lector

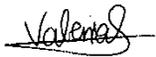
DECLARACIÓN JURADA

Yo, Valeria Sancho Solís 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 Proyecto de Tesis titulado:

“Efecto del cambio de temperatura en el comportamiento dinámico del puente sobre el río Virilla en la ruta nacional 27 de Costa Rica”

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

Firmo en San Pedro, 22/12/2022



Valeria Sancho Solís

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

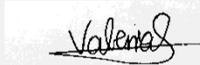
Yo (Nosotros):	Valeria Sancho Solís
De la Carrera / Programa:	Ingeniería Civil Licenciatura
Modalidad de TFG:	Tesis
Titulado:	“Efecto del cambio de temperatura en el comportamiento dinámico del puente sobre el río Virilla en la ruta nacional 27 de Costa Rica”

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.** con cédula 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 22 de diciembre de 2022 a las 16:00

Firma del estudiante(s):



Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a Dios por dejarme llegar a donde estoy ahora y poder concluir mi carrera de manera exitosa. A mi familia, especialmente a mis padres Cristian y Martha; y mi novio que estuvieron apoyándome en todo momento a lo largo de este proceso.

De igual manera, a mis amigos y compañeros de la universidad, por formar parte de mi vida y darnos todo el apoyo a lo largo de todos estos años de esfuerzo y lucha.

Por último, a todos los profesores que fueron parte de mi vida universitaria y me llenaron de conocimiento a lo largo de los años y en este proyecto.

Resumen

El presente trabajo de investigación contiene el desarrollo de una serie de mediciones experimentales de aceleración en el puente Rio Virilla en la Ruta Nacional No. 27. Este es un puente de concreto construido con la técnica de voladizos sucesivos, considerado uno de los puentes mayores de esa ruta nacional.

Se determina la influencia que provoca los cambios de temperatura ambiental sobre las frecuencias de vibrar del puente, con el fin de comprender si estas variaciones influyen en el comportamiento dinámico de la estructura, y en los criterios de seguimiento de la salud estructural del puente.

En la actualidad, se utiliza como técnica de control de la salud estructural, la realización continua o discreta de pruebas experimentales de monitoreo. Cuando una estructura presenta variaciones en sus frecuencias de vibrar, estas pueden interpretarse como daños estructurales, sin embargo, estas variaciones identificadas entre monitoreos, pueden estar también influenciadas por factores no asociados a daño, como es el caso de la temperatura ambiental.

Los resultados del presente estudio permiten considerar el margen de variación del comportamiento dinámico del puente ante cambios de temperatura, y descartar, o bien confirmar, después de algún evento extraordinario, la ocurrencia de daño, o no, en la estructura.

Palabras claves: Puente - Aceleración – Temperatura – frecuencia – Sensor – dinámica.

Abstract

This research work contains the development of a series of experimental acceleration measurements on the Rio Virilla bridge on National Route No. 27. This is a concrete bridge built with the cantilever technique, considered one of the largest bridges of that National route.

The influence caused by environmental temperature changes on the vibration frequencies of the bridge is determined, in order to understand if these variations influence the dynamic behavior of the structure, and the criteria for monitoring the structural health of the bridge.

Currently, the continuous or discrete performance of experimental monitoring tests is used as a structural health control technique. When a structure presents variations in its vibration frequencies, these can be interpreted as structural damage; however, these variations identified between monitoring can also be influenced by factors not associated with damage, such as environmental temperature.

The results allow us to consider the variation margin of the dynamic behavior of the bridge in the face of temperature changes, and rule out, or confirm, after some extraordinary event, the occurrence of damage, or not, in the structure.

Key words: Bridge Acceleration - Temperature - Frequency - Sensor - Dynamics

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1 Nacionales.....	2
1.1.2 Internacionales	4
1.2. Planteamiento del problema.....	5
1.3. Objetivo General:.....	7
1.4. Objetivos Específicos:	7
1.5. Justificación	8
1.6. Alcances y limitaciones	10
1.6.1. Alcances.....	10
1.7. Limitaciones.....	11
1.8. Impacto	11
1.9. Hipótesis	12
2. Fundamentación teórica	13
2.1. Estructuras de puentes	13
2.1.1. Superestructura	14
2.1.2. Subestructura	14
2.2. Estructuras de Concreto.....	15
2.3. Puentes en Costa Rica.....	16
2.4. Puente sobre el Rio Virilla en la Ruta 27.....	18
2.5. Vibración en las estructuras.....	19
2.6. Recolección de vibraciones	21

2.7.	Modos de vibrar	22
2.8.	Temperatura cerca al sitio del puente y sus efectos.....	24
2.9.	Transformada de Fourier	26
3.	Marco Metodológico.....	27
3.1.	Paradigma	27
3.2.	Enfoque metodológico.....	28
3.3.	Método de investigación.....	29
3.4.	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	30
3.5.	Técnicas para el procesamiento y análisis de datos.....	31
4.	Análisis de resultados	33
4.1.	Espectros de Fourier en aceleración	33
4.1.1.	Espectros promedios de aceleración obtenidos a 80 metros:.....	34
4.1.2.	Espectros promedios de aceleración obtenidos a 60 metros:.....	39
4.1.3.	Espectros promedios de aceleración obtenidos a 40 metros:.....	44
4.2.	Temperaturas experimentadas	49
4.3.	Evolución de los Modos de Vibrar identificados.....	51
4.3.1.	Evolución de modos de vibrar medidos a 80 metros:.....	52
4.3.2.	Evolución de modos de vibrar medidos a 60 metros:.....	55
4.3.3.	Evolución de modos de vibrar medidos a 40 metros:.....	58
4.4.	Tasas de variación de frecuencia	61
4.5.	Discusiones	65
5.	Conclusiones	67
6.	Recomendaciones	69



7. Referencias bibliográficas.....	70
Anexos	73

Índice de figuras

Figura 1: Puentes por material de Superestructura.....	17
Figura 2: Vista lateral del puente.....	19
Figura 3: Acelerómetro GP2XSENSOR.....	22
Figura 4: Prueba de vibración ambiental de puente tipo viga cajón de concreto presforzado.....	23
Figura 5: Temperaturas promedio desde el año 2008 hasta el 2022.....	25
Figura 6: Instrumentos utilizados para la recolección de datos.....	32
Figura 7: Espectro de Fourier en aceleración, a las 08:44 am a los 80 metros.....	34
Figura 8: Medición 1- Espectro de Fourier – 80 m.....	35
Figura 9: Medición 2- Espectro de Fourier – 80 m.....	36
Figura 10: Medición 3- Espectro de Fourier – 80 m.....	36
Figura 11: Medición 4- Espectro de Fourier – 80 m.....	36
Figura 12: Medición 5- Espectro de Fourier – 80 m.....	37
Figura 13: Medición 6- Espectro de Fourier – 80 m.....	37
Figura 14: Medición 7- Espectro de Fourier – 80 m.....	38
Figura 15: Medición 8- Espectro de Fourier – 80 m.....	38
Figura 16: Medición 9- Espectro de Fourier – 80 m.....	38
Figura 17: Medición 10- Espectro de Fourier – 80 m.....	39
Figura 18: Medición 11- Espectro de Fourier – 80 m.....	39
Figura 19: Medición 12- Espectro de Fourier – 80 m.....	40
Figura 20: Medición 13- Espectro de Fourier – 80 m.....	40
Figura 21: Medición 1- Espectro de Fourier – 60 m.....	41
Figura 22: Medición 2- Espectro de Fourier – 60 m.....	41
Figura 23: Medición 3- Espectro de Fourier – 60 m.....	42
Figura 24: Medición 4- Espectro de Fourier – 60 m.....	42
Figura 25: Medición 5- Espectro de Fourier – 60 m.....	42

Figura 26: Medición 6- Espectro de Fourier – 60 m.....	43
Figura 27: Medición 7- Espectro de Fourier – 60 m.....	43
Figura 28: Medición 8- Espectro de Fourier – 60 m.....	43
Figura 29: Medición 9- Espectro de Fourier – 60 m.....	44
Figura 30: Medición 10- Espectro de Fourier – 60 m.....	44
Figura 31: Medición 11- Espectro de Fourier – 60 m.....	45
Figura 32: Medición 12- Espectro de Fourier – 60 m.....	45
Figura 33: Medición 13- Espectro de Fourier – 60 m.....	45
Figura 34: Medición 1- Espectro de Fourier – 40 m.....	46
Figura 35: Medición 2- Espectro de Fourier – 40 m.....	47
Figura 36: Medición 3- Espectro de Fourier – 40 m.....	47
Figura 37: Medición 4- Espectro de Fourier – 40 m.....	47
Figura 38: Medición 5- Espectro de Fourier – 40 m.....	48
Figura 39: Medición 6- Espectro de Fourier – 40 m.....	48
Figura 40: Medición 7- Espectro de Fourier – 40 m.....	48
Figura 41: Medición 8- Espectro de Fourier – 40 m.....	49
Figura 42: Medición 9- Espectro de Fourier – 40 m.....	49
Figura 43: Medición 10- Espectro de Fourier – 40 m.....	50
Figura 44: Medición 11- Espectro de Fourier – 40 m.....	50
Figura 45: Medición 12- Espectro de Fourier – 40 m.....	50
Figura 46: Medición 13- Espectro de Fourier – 40 m.....	51
Figura 47: Temperatura ambiental promedio (°C) del día de medición.....	51
Figura 48: Gráfica de la temperatura ambiental promedio vs tiempo durante el día de medición.....	52
Figura 49: Temperaturas máximas, mínimas, y promedio entre los años 2008 y 2022 – temperatura promedio del día de medición.....	53
Figura 50: Registro de frecuencias medidos a los 80 metros.....	54
Figura 51: Frecuencias – Temperaturas – 80 metros.....	54

Figura 52: Temperatura vs frecuencia – Modo A – 80 metros.....	55
Figura 53: Temperatura vs frecuencia – Modo B – 80 metros.....	55
Figura 54: Temperatura vs frecuencia – Modo C – 80 metros.....	56
Figura 55: Temperatura vs frecuencia – Modo D – 80 metros.....	56
Figura 56: Registro de frecuencias medidos a los 60 metros.....	57
Figura 57: Frecuencias – Temperaturas – 60 metros.....	58
Figura 58: Temperatura vs frecuencia – Modo A – 60 metros.....	58
Figura 59: Temperatura vs frecuencia – Modo B – 60 metros.....	59
Figura 60: Temperatura vs frecuencia – Modo C – 60 metros.....	59
Figura 61: Registro de frecuencias medidos a los 40 metros.....	60
Figura 62: Frecuencias – Temperaturas – 40 metros.....	61
Figura 63: Temperatura vs frecuencia – Modo A – 40 metros.....	61
Figura 64: Temperatura vs frecuencia – Modo B – 40 metros.....	62
Figura 65: Temperatura vs frecuencia – Modo C – 40 metros.....	62
Figura 66: Temperatura vs frecuencia – Modo D – 40 metros.....	63
Figura 67: Temperatura vs frecuencia – Modo A.....	64
Figura 68: Temperatura vs frecuencia – Modo B.....	64
Figura 69: Temperatura vs frecuencia – Modo C.....	65
Figura 70: Temperatura vs frecuencia – Modo D.....	65
Figura 71: Tabla del % de variación de frecuencias promedio respecto a la temperatura....	66
Figura 72: Máximas variaciones en frecuencia promedio durante el día de monitoreo.....	66

1. Introducción

La presente investigación parte del monitoreo de aceleraciones de un puente de concreto, construido por el método de voladizos sucesivos. Se busca la obtención de las frecuencias de vibrar del puente a distintas temperaturas de ambiente.

Las campañas de medición de aceleración en el puente se ejecutaron en distintas horas, y por lo tanto a distintas temperaturas ambientales.

Se verifica a través de este estudio si la temperatura a la que está sometida el puente tiene influencia en las frecuencias de vibrar del mismo, y por ende en el comportamiento dinámico del puente.

A pesar que el concreto es un material pesado y robusto, éste al someterse a cambios de temperatura puede experimentar variaciones en su longitud, modificando levemente su rigidez, y por ende, su comportamiento dinámico.

En la actualidad, el control y seguimiento del comportamiento dinámico de las estructuras, es utilizado como técnica de seguimiento de la salud estructural, específicamente para el reconocimiento de daño; sin embargo, muchas veces en estos controles no se considera la influencia que tiene la temperatura. Esta investigación permitirá conocer la influencia de los cambios de temperatura en este puente, siendo de utilidad a la hora de evaluarse la existencia, o no, de daño en la estructura.

1.1. Antecedentes

1.1.1 Nacionales

1.1.1.1. Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales, por parte de Lanamme en la Universidad de Costa Rica

Este informe de monitoreo de la condición estructural de la superestructura del puente sobre el río Virilla, en la Ruta Nacional No. 27, es un producto del Programa de Monitoreo de Estructuras de Puentes de la Unidad de Puentes del LanammeUCR, para detectar daños, y así determinar la condición estructural de los puentes bajo condiciones operacionales ubicados a lo largo de la Red Vial Nacional.

Los parámetros modales son extraídos de las múltiples mediciones de aceleración simultáneas, mediante el método de identificación de sistemas bajo el marco de análisis modal operacional. Los resultados permiten dar seguimiento al deterioro de la superestructura en el transcurso del tiempo al compararse con un próximo monitoreo, y con un modelo estructural analítico en el caso de desear cuantificar el daño. Los resultados además de complementar las labores de inspección visual, constituyen un insumo valioso en la gestión de puentes y toma de decisiones. (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica [Lanamme], 2018)

En este puente se instalaron más de cincuenta sensores a lo largo de toda su longitud, con el fin de determinar daños estructurales.

1.1.1.2. 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

Esta investigación se desarrolló dentro del marco de la línea de investigación en Dinámica Estructural perteneciente a la Universidad Latina de Costa Rica. Se logró comprobar la efectividad del uso de un sensor para monitorear estructuras de puentes, obteniendo resultados satisfactorios en comparación con resultados de estudios previos realizados en este mismo puente, y otros más en rutas nacionales con múltiples sensores por medio del LanammeUCR.

En Rodríguez (2021) se monitorearon tres puentes de Costa Rica: el Río Virilla en la Ruta N°27 y Ruta N°3, también el puente Quebrada Salitral en la Ruta N°27. La elección de estas estructuras para esta investigación se fundamentó en el monitoreo que anteriormente había sido realizado por el LanammeUCR en estas tres estructuras, de tal manera que se pudiese medir la efectividad de un único sensor en comparación con resultados de múltiples sensores.

Rodríguez (2021) concluye que los porcentajes de diferencia andan en un máximo de 6% en el puente río Virilla Ruta N° 3, en un máximo de 1% en el puente río Virilla Ruta N° 27 (puente en estudio en esta investigación), y un máximo de 7% en el puente quebrada Salitral Ruta N° 27. Al final los porcentajes son relativamente bajos, generando pocas diferencias entre las mediciones realizadas en esta investigación con investigaciones previamente realizadas en esos mismos puentes (Rodríguez, 2021).

Así mismo, según Rodríguez (2021), en Costa Rica se pueden realizar monitoreos de la salud estructural de los puentes de manera más económica mediante la utilización de un único sensor, tanto por el gobierno central, así como los gobiernos locales.

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

Esta investigación también fue desarrollada dentro del marco de la línea de investigación en Dinámica Estructural perteneciente a la Universidad Latina de Costa Rica. Céspedes (2022) realizó monitoreos en el puente Quebrada Salitral en la Ruta 27, para conocer las variaciones en el comportamiento dinámico del puente ante cambios de la temperatura ambiental.

Céspedes (2022) reporta tasas de variación en las frecuencias de vibrar del puente que van desde 0.11%, hasta 0.81%, todas ellas en Hz/°C.

1.1.2 Internacionales

1.1.2.1. Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras Secretaría de comunicaciones y transportes; y del Instituto Mexicano del transporte

En este trabajo se analizan y evalúan las técnicas globales más comunes para identificar daño en las estructuras, mismas que están basadas en la interpretación de las vibraciones mecánicas y de los cambios que muestran éstas. Con base en esto, se plantean dos métodos que resultaron ser más efectivos para la detección de daño de un puente atirantado con monitoreo remoto.

Para determinar el arreglo experimental y la técnica de mayor sensibilidad, se desarrollaron varias pruebas de simulación y experimentales. Para ello, se analizaron distintos tipos de daño y ubicaciones, y luego se evaluó la capacidad para detectar daño utilizando el criterio de aseguramiento modal coordinado.

1.1.2.2. Pruebas de Vibración Ambiental en Puentes, Universidad Industrial de Santander Bucaramanga, en Colombia.

Se realizan pruebas de vibraciones ambientales (AVT) sobre estructuras sin la utilización de excitación artificial, por el contrario, la respuesta de la estructura es medida por la excitación producida por el ambiente; como el viento, el tráfico o los microsismos. La excitación producida por el medio ambiente tiene un gran ancho de banda en frecuencia que permita excitar todas las frecuencias naturales de la estructura [1]. (Revista UIS Ingenierías en la Universidad Industrial de Santander Bucaramanga en Colombia, 2010, pág. 02)

Esta investigación busca examinar los daños estructurales en los puentes ocasionados por fenómenos naturales, de una manera rápida, sencilla y económica; con ayuda de sensores para la obtención de aceleraciones y frecuencias propias de estas estructuras.

1.2. Planteamiento del problema

Desde el punto de vista ingenieril, los puentes vehiculares se proyectan como estructuras que soportan su propio peso y el paso del tránsito que circula sobre ellos, así como otras cargas extremas como fuerzas de viento y sísmicas.

Durante su operación, la demanda de carga es casi continua, y en condiciones de carga extrema, o bien por falta de control y mantenimiento, los puentes pueden sufrir distintos niveles de daño.

Cuando un daño se presenta en una estructura, éste puede identificarse a través de cambios en su comportamiento dinámico, ya que la rigidez de la estructura puede disminuir con el daño, y por ende, variar la respuesta dinámica de la estructura.

El seguimiento de la salud estructural de las estructuras por medio de campañas de monitoreo, o monitoreos continuos, son de provecho para la identificación de daño en las estructuras.

Dentro de los parámetros dinámicos de la estructura más sensibles al daño se encuentra la frecuencia de vibración de sus modos de vibrar. A través de los monitoreos es posible identificar variaciones en las frecuencias de vibrar de un puente, y en la variación de este parámetro puede inferirse si la estructura ha experimentado, o no, algún tipo de daño.

No obstante, otros factores, sin ser daño en la estructura, podrían también incidir en variaciones del comportamiento dinámico de las estructuras, por ejemplo, la temperatura ambiental produce en todo material contracciones o dilataciones, haciendo que sus longitudes y secciones transversales se modifiquen levemente.

Dichas variaciones en la geometría de la estructura provocadas por cambios térmicos pueden producir modificaciones en la rigidez de las estructuras, tal como en su caso, las produce el daño, pero sin ser estas variaciones por cambios térmicos propiamente un daño estructural.

Al identificarse variaciones en las frecuencias de vibrar de un puente ante los cambios de temperatura ambiental, es posible determinar si variaciones en frecuencias encontradas entre campañas de monitoreo están dentro del rango de variación posible generado por el efecto térmico, o bien, si las mismas obedecen a consecuencias de un daño real en la estructura.

De acuerdo a lo expuesto, la presente investigación busca responder la siguiente interrogante:

∴ ¿Cuál es la influencia de los cambios de temperatura ambiental en las frecuencias de vibrar del puente de concreto sobre el Río Virilla, en la Ruta Nacional No.27 de Costa Rica?

1.3. Objetivo General:

- Determinar la influencia del cambio de temperatura ambiental en el comportamiento dinámico del Puente sobre el Río Virilla en la Ruta Nacional No. 27 de Costa Rica.

1.4. Objetivos Específicos:

- Realizar mediciones de aceleraciones en el dominio del tiempo en el puente a partir del paso de vehículos, mediante la utilización de un solo sensor colocado en distintos puntos a distintas horas del día y distintas temperaturas.
 - Mediante el uso del programa ADDA realizar la transformación de los datos de aceleración del puente del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.
 - Identificar las frecuencias de los modos de vibrar del puente mediante el análisis en el dominio de la frecuencia a distintas temperaturas ambientales.
 - Determinar las tasas de variación de las frecuencias de los modos de vibrar identificados en el puente provocadas por los cambios de temperatura ambiental.

1.5. Justificación

En Costa Rica existe una administración de puentes con limitados alcances. El Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible del 2018, sostiene que en Costa Rica muchas estructuras de puentes se construyeron hace muchos años. Este informe reporta que los puentes carecen de mantenimiento y monitoreos que identifiquen y den seguimiento a daños estructurales en estas estructuras. (Barrantes Jiménez, Estado de la nación, 2018).

Es sin duda necesaria una cultura de mantenimiento y de seguimiento del estado de los puentes en Costa Rica. El inventario nacional de puentes existente en el país es cada vez más extenso, por lo que esta necesidad va creciendo a un ritmo mayor que el ritmo de atención que se brinda a los puentes en el país.

A pesar del esfuerzo de instituciones como la Universidad de Costa Rica, la Universidad Latina de Costa Rica, y el Instituto Tecnológico de Costa Rica, en la investigación dentro del tema de salud estructural de los puentes, los puentes monitoreados hasta el momento son muy pocos en el país, principalmente por razones de presupuesto y de dedicación a este tema de relevancia nacional.

Con el presente trabajo de investigación se pretende identificar la influencia que tiene la temperatura ambiental en el comportamiento dinámico de los puentes de concreto de tipo voladizos sucesivos, específicamente en el puente sobre el Río Virilla en la Ruta Nacional 27.

Existe a la fecha en Costa Rica únicamente el estudio realizado por Céspedes (2022) respecto a la influencia de la temperatura en las frecuencias de vibración de un puente

metálico, sin embargo, a la fecha no existe ningún tipo de estudio similar en puentes de concreto.

Los resultados de la presente investigación contribuirán a dimensionar de manera más precisa y cuantitativamente la influencia de la temperatura ambiental en el comportamiento dinámico de puentes de tipo voladizo sucesivos de concreto.

Estos resultados serán de utilidad al momento de realizarse monitoreos de seguimiento de la salud estructural con fines de identificación de daño en este tipo de puentes.

Esta investigación adopta la técnica de monitoreo empleada en Rodríguez (2021), mediante la utilización de un único sensor para la toma de aceleraciones en el dominio del tiempo en el puente. Esta técnica adoptada es menos costosa y requiere de poco personal, y no genera interrupciones en la operación ordinaria del puente.

El puente en estudio ha sido previamente monitoreado por la Universidad Latina de Costa Rica y se ha desarrollado una tesis de licenciatura (Rodríguez, 2021). La presente investigación integra las recomendaciones dadas en dicha tesis, así como un mayor aprovechamiento de los datos con el uso de técnicas de análisis más precisas.

1.6. Alcances y limitaciones

1.6.1. Alcances

De la base datos del Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP) se ha obtenido información del puente para comprensión estructural del mismo.

Se ha planificado la logística de la campaña de monitoreo sobre el puente, mediante la utilización de un sensor tipo G2PX de la marca reconocida en monitoreo estructural SENSR.

Se han elegido tres puntos de medición, los cuales se encuentran a 40m, 60m y 80m (mitad del puente) todos ellos medidos desde los extremos de la estructura. Estos puntos se han elegido buscando captar la mayor cantidad de formas modales del puente.

Se monitorea la temperatura ambiental durante la campaña de medición en periodos de una hora, iniciándose desde cerca de la 1:30 am y finalizando cerca de las 2:00 pm.

Los datos de aceleración del puente son transformados del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante el uso del programa ADDA elaborado por el profesor Luis Alejandro Carvajal Soto.

La transformación matemática se realiza a través de la transformación rápida de Fourier (FFT), después de haberse filtrado los datos con un filtro de tipo paso bajo, y haberse capsulado los datos por medio de ventanas de Hanning y aplicado una discretización de 131.072 (2^{17}) puntos en la elaboración de los espectros de aceleraciones del puente. En comparación a Céspedes (2022), en este estudio se ha incrementado dicha discretización, lográndose una mejor claridad en las frecuencias identificadas.

Se han encontrado las frecuencias de vibración de los modos de vibrar identificados en el puente, a través de graficas de espectros de aceleración en el dominio de la frecuencia, y con ello, se han calculado las variaciones de estas frecuencias con los cambios de la temperatura ambiental.

1.7. Limitaciones

Las limitaciones de tiempo y presupuesto no permiten la realización de campañas de monitoreo por más días y en distintas épocas de año.

La temperatura del puente no es homogénea, y la misma es compleja de monitorear, esto resulta en que la temperatura monitoreada es la ambiental. Lo ideal sería medir en múltiples puntos de la estructura los gradientes de temperatura presentes en el puente durante la toma de aceleraciones.

1.8. Impacto

A través de esta investigación se mide la influencia que tiene la temperatura ambiental sobre el comportamiento dinámico del puente. Esta influencia se calcula por medio de las variaciones de los valores de frecuencia de los modos de vibrar del puente.

Conocer el estado de los puentes y mantenerlos en buenas condiciones operativas es de vital importancia para el desarrollo social y económico del país; Y a través de monitoreos de este tipo se puede llevar control de la salud estructural de los mismos.

La presente investigación se lleva dentro del marco de la línea de investigación de la Universidad Latina de Costa Rica en el tema de dinámica estructural, con el propósito que se desarrollen más investigaciones relacionadas al estudio del comportamiento dinámico de estructuras mediante el análisis experimental, hasta alcanzar un gran número de estructuras del inventario nacional de puentes.

Se hace uso de una técnica de monitoreo económica y de fácil implementación, y con ello se insta a las instituciones del gobierno central y de los gobiernos locales a considerar la utilización de las técnicas de monitoreo empleadas en este estudio, las cuales fueron introducidas en Rodríguez (2021).

1.9. Hipótesis

Los cambios usuales de temperatura ambiental presentes en el país pueden influir en el comportamiento dinámico de los puentes de concreto, y ser relevantes en los análisis de identificación de daño de estas estructuras.

2. Fundamentación teórica

2.1. Estructuras de puentes

Los puentes son estructuras capaces de soportar su peso propio y el efecto de cargas provocadas por el tránsito, el viento, los sismos, y cargas peatonales. Estas estructuras son fundamentales en la comunicación de pueblos, y permiten el paso de vehículos, personas y mercancías, siendo claves para el desarrollo de un país.

Los puentes se diseñan para soportar las cargas antes mencionadas, sean estas ordinarias como su peso propio y cargas de tráfico, pero también para soportar cargas extraordinarias como los huracanes, impactos o terremotos.

Deben contar con suficiente capacidad estructural para garantizar seguridad y estabilidad ante la acción de todas las cargas que soporta.

Los puentes se pueden fabricar con distintos materiales, principalmente en: concreto (reforzado o preesforzado) acero, madera, entre otros, o bien, mezcla de estos materiales. A su vez, estas estructuras pueden clasificarse según los propósitos para las que fueron concebidas. Entre los tipos de clasificación más comunes están:

- Puentes Peatonales
- Puentes Vehiculares
- Puentes tipo Acueductos.
- Puentes ferroviarios

Así mismo, estas estructuras están conformadas por dos grandes familias de componentes estructurales, las cuales se mencionan a continuación:

2.1.1. Superestructura

La superestructura comprende todos los elementos que están sobre los apoyos de un puente, tales como sistemas de piso, vigas, losas, diafragmas, cerchas, sistemas de arriostramiento, secciones tipo cajón, atiesadores, entre otros.

Durante la planificación del diseño y construcción de un puente, el tipo de superestructura se decide en función de la geometría del puente, la disponibilidad de materiales en el mercado local o nacional, el costo de su construcción, la mano de obra disponible local o nacionalmente, así como de la capacidad de equipos.

Algunos tipos de superestructuras comunes en Costa Rica son:

- Vigas simples de concreto o acero
- Vigas continuas de concreto o acero
- Cercha metálicas superiores o inferiores, simples o continuas

2.1.2. Subestructura

La subestructura de un puente comprende todo el sistema de apoyos que brinda soporte a la superestructura del puente. Las subestructuras se ubican en los extremos del puente, y en puentes continuos en los puntos de transición de un tramo al otro.

Las subestructuras interactúan con el suelo para dar apoyo seguro al puente. Las subestructuras están compuestas por los siguientes componentes:

- Apoyos
- Bastiones
- Aletones
- Pilas
- Muros de cimentación
- Placas de cimentación
- Pilotes

2.2. Estructuras de Concreto

La estructura a estudiar posee como material principal el concreto, el cual ha sido un material de relevante utilidad desde muchos años atrás, tanto en el mundo como en Costa Rica.

El concreto está compuesto por una serie de materiales unidos químicamente hasta obtener una unión efectiva entre ellos, con la finalidad de producir un material resistente y duradero.

De igual manera, para mejorar la trabajabilidad y desempeño estructural del concreto, es común agregar sustancias como son los aditivos. Algunos aditivos ayudan a regular los tiempos de fraguado del concreto, ya sea para para acelerar ese tiempo o, al contrario, retardarlo cuando se necesita más tiempo en el proceso de fraguado. Adicionalmente, existen aditivos que ayudan a la mezcla con distintas funciones como es el caso de plastificantes, que brindan mayor resistencia y fluidez.

De igual manera, con respecto al concepto de concreto reforzado y preesforzado, se entiende como la combinación del concreto y acero (sea este de pasivo o activo, para el

concreto reforzado y preesforzado, respectivamente) en la que el refuerzo de acero proporciona la resistencia a la tensión de la que carece el concreto.

Sabemos que el concreto por sí solo, es un material resistente, y aunque posee una muy buena resistencia a compresión, cuenta con una escasa resistencia a tensión; por lo cual se necesita de un material como es el acero con capacidad a la tracción.

El concreto tiene la ventaja que no requiere mucho mantenimiento a lo largo de los años, por lo cual en muchos casos se vuelve más económico que otros materiales. Adicionalmente, el concreto brinda una considerable protección a la estructura en caso de incendios en ella.

Aunque tenga muchos beneficios, construir con un material como el concreto también tiene desventajas al compararlo con el acero. Estructuras de acero tienden a ser mucho más livianas y más rápidas de construir, mientras que las estructuras de concreto son más pesadas y su construcción es más lenta por los tiempos de fraguado que requiere. Aunque al día siguiente está endurecido, el concreto dura aproximadamente veintiocho días en cumplir con su proceso de fraguado, mientras que con el acero, si por ejemplo se utiliza soldadura o pernos, ese mismo la estructura estaría lista para soportar cargas, por lo cual la construcción se hace más rápida.

2.3. Puentes en Costa Rica

Un país como Costa Rica, rodeado de mucha naturaleza y por consiguiente topografías muy irregulares; demanda la construcción de puentes de distintas longitudes y tipologías para permitir el tránsito de variedad de vehículos desde pequeños como son las motocicletas, hasta los más grandes como son los camiones o auto buses, y de igual manera a los peatones que circular sobre ellos.

Costa Rica cuenta con más de mil puentes de distintos materiales, siendo los más comunes los de concreto y acero, ambos por su resistencia y durabilidad. Esto se ve reflejado en datos, donde de los 1,670 puentes inventariados, 32.99% son de acero como material principal de la superestructura y 63.29% son de concreto (25.33% de concreto pre-esforzado y 37.96% de concreto reforzado) y de otros materiales se tiene 3.72%” (Tecnológico de Costa Rica [TEC] et al, 2019, pág 20); tal distribución se aprecia mejor en la siguiente gráfica:

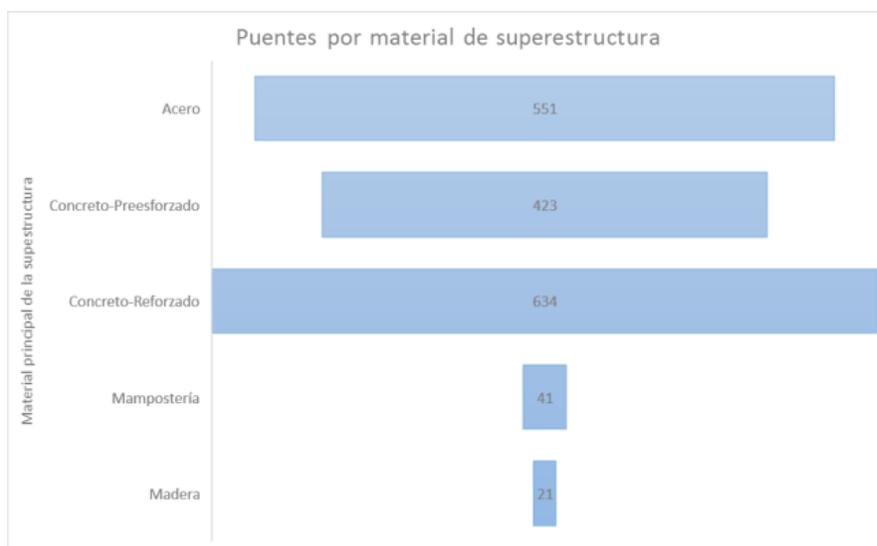


Figura 01: Puentes por material de Superestructura. Fuente: TEC et al, 2019, pág 20.

Según el inventario realizado por el TEC, el concreto es uno de los materiales más comunes para construir puentes en Costa Rica, ya que, de los 1670 puentes, tenemos un total de 1057 que utilizan como material principal el concreto, siendo más del sesenta por ciento del total de puentes del país construidos en este material.

2.4. Puente sobre el Río Virilla en la Ruta 27

Este puente cuenta con una longitud total de 160 m, construido en un único tramo de superestructura. Su construcción se realizó en el año 2001 y forma parte de los puentes mayores que se encuentran dentro de la Ruta Nacional No.27.

El puente se ubica en la Ruta Nacional No.27, en la sección de control 10080 que cruza el río Virilla. Desde el punto de vista administrativo, se ubica en el distrito de San Rafael, cantón de Alajuela y la provincia del mismo nombre. Sus coordenadas, en el sistema geográfico de ubicación, corresponden con: 9°56'50,10"N de latitud y 84°13'55,84"O de longitud. (Lanamme, 2018, pág. 13).

La ruta donde se encuentra se clasifica como primaria y tiene un tránsito promedio diario (TPD) de 64601 vehículos por día (medidos en el año 2012) en la sección de control donde se ubica el puente según el Anuario de Tránsito 2015, publicado por la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT. (Lanamme, 2018, pág. 13).

Las características topográficas de la zona demandaron la necesidad de construir una estructura que no requiriera de apoyos intermedios, razón por la cual la técnica de diseño y construcción de puentes de concreto en voladizos sucesivos fue elegida para la construcción de esta estructura.

Generalmente, la construcción de este tipo de estructuras inicia con la construcción de pilas, y a partir de ellas se van construyendo dovelas en voladizo de forma balanceada a ambos lados de las pilas. Sin embargo, el puente sobre el Río Virilla en la Ruta Nacional No.27 no cuenta con pilas, por lo que para su construcción fue necesaria la construcción de cámaras de contrapeso en ambos extremos para balancear los voladizos sucesivos que se construyeron desde dichos extremos por separado hasta conectarse en su punto medio.

Conforme se iban construyendo las dovelas de concreto, éstas se iban postensando para resistir los momentos flectores provocados por la etapa de construcción en voladizo, hasta que ambos voladizos fueron conectados para realizar una continuidad en toda la estructura.



Figura 02: Vista lateral del puente. Fuente: Conavi. https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagInformacionPuente.xhtml?c=MTIINg==

2.5. Vibración en las estructuras

Las vibraciones son de mucho interés en el ámbito de la ingeniería y la ciencia. Se trata del proceso y la consecuencia de vibrar: hacer que algo se mueva, oscile, tiemble o se conmueva. (Pérez y Gardey, 2016).

En ingeniería, el comportamiento estático es cuando no tenemos movimiento alguno en la estructura, pero, por otro lado, también existe el comportamiento dinámico, el cual hace relevancia al movimiento; Es decir, cuando un objetivo está quieto o inmóvil,

hablamos de estático, pero si este mismo elemento empieza a tener movimiento, sin importar si es de manera independiente o si es provocado por alguna fuerza, cambia a dinámico.

Las características propias de las vibraciones son parámetros de interés para la obtención de datos, ya sean estos de aceleración, velocidad o desplazamientos.

Las vibraciones son causadas por diversos factores. Por ejemplo, el tránsito de los vehículos que están circulando sobre un puente, hacen que la estructura tenga movimientos relativamente pequeños pero significativos para la investigación del comportamiento dinámico de esta estructura. Otros factores como son los terremotos, micro-sísmos, vientos, también pueden causar vibraciones en los puentes y en un gran número de tipologías constructivas.

Las estructuras tipo puentes están sometidos continuamente a cargas dinámicas en lapsos relativamente pequeños de tiempo, provocando efectos vibratorios en ellos. Mecánicamente la vibración libre de una estructura depende de su masa, amortiguamiento y su rigidez, sabiendo que la frecuencia aumenta con el aumento de la rigidez, y la frecuencia disminuye con el aumento de la masa.

La masa de un puente depende de la geometría de la estructura y la densidad de los materiales que la conforman, y la rigidez depende de la geometría y de la relación esfuerzo-deformación de los materiales que la componen (García et al., 2020).

Así pues, la respuesta dinámica de un puente a través de sus vibraciones se define desde su diseño, su forma, los materiales a utilizar y sus condiciones de contorno, por lo que, no tendrá el mismo comportamiento un puente con vigas de concreto que con uno con vigas de acero, o bien, un puente con una longitud pequeña que un puente con una longitud grande.

2.6. Recolección de vibraciones

En este estudio, las vibraciones sobre el puente son recolectadas por un sensor de tipo acelerómetro.

Se ha elegido un sensor GP2X de la marca SENSR. Este dispositivo se caracteriza por ser de triple eje y cuenta con un sensor para temperatura que permite obtener la temperatura ambiental durante el tiempo de medición.

El sensor GP2X mide las aceleraciones instantáneas a una tasa de muestro de 400 datos por segundo, mismas que son almacenadas automáticamente en el computador.

Este sensor cuenta con una carcasa de aluminio y tiene una capacidad de energía de 25mA (mili amperios), Su conexión a otros dispositivos es mediante un cable con terminal USB.

Es un sensor programable de tres ejes y tiene una respuesta de frecuencia de corriente directa de 45HZ, con una temperatura operativa que varía desde los -20°C a los 70°C . (User Guide, 2010).

Figura 03: *Acelerómetro GP2X SENSR*



Fuente: *User Guide* (2010). <https://sensr.com/downloads/R001-421-V1.0%20GP2-X%20USB%20Accelerometer%20User%20Guide.pdf>

Este instrumento de medición se ha instalado en tres puntos específicos del puente, los cuales son a 40 m, 60 m y 80 m medidos del extremo del bastión 2 del puente.

Los sitios de colocación del sensor seleccionados, son puntos estratégicos para la obtención de las frecuencias de varios modos de vibrar, ya que, según la forma modal, algunos modos podrían no ser captados con claridad en un determinado punto del puente.

. El monitoreo se ha realizado discretamente a múltiples horas del día, iniciando cerca de la 1:30 am, hasta cerca de las 2:30 pm del mismo día, logrando medir la respuesta dinámica de la estructura a distintas temperaturas ambientales. Estas mediciones se hacen en lapsos de tiempo que dependen de la cantidad de excitación que haya sido aplicada al puente por el tráfico. Las mediciones de la madrugada reflejan poca energía de excitación, sin embargo, al paso de las horas la cantidad de vehículo aumenta, especialmente lo más pesados.

Los datos de aceleración obtenidos en campo, son luego analizados mediante el uso del programa ADDA desarrollado por el Profesor Luis Alejandro Carvajal Soto.

2.7. Modos de vibrar

Los modos de vibrar de una estructura definen el comportamiento dinámico que tiene la misma en respuesta a excitación de fuerzas dinámicas (que cambian en tiempos muy cortos). Representan comportamientos propios de una estructura y se presentan de distintas

formas modales con distintos niveles de participación de masa estructural. A cada forma modal (modo de vibrar) le corresponde una determinada frecuencia propia.

En la siguiente imagen, se aprecian las formas modales que tiene una estructura plana y longitudinal.

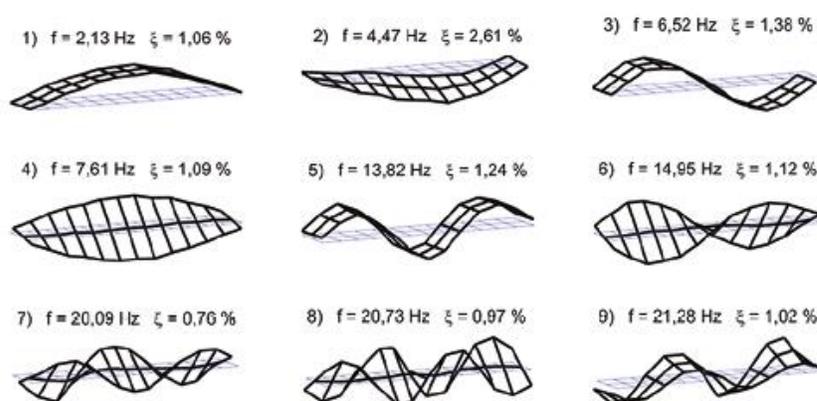


Figura 04: Prueba de vibración ambiental de puente tipo viga cajón de concreto presforzado. Fuente: Montalto Bolaños, Eduardo José 2016.

En la imagen anterior se aprecian distintas formas modales de vibrar, y valores correspondientes de las frecuencias de vibrar de cada uno de los modos; como se aprecia, hay puntos de la estructura, en donde no existe deformación modal, por lo que la medición en varios puntos permite la posibilidad de tomar la mayor cantidad de modos y sus frecuencias.

Las frecuencias de los modos de vibrar de una estructura pueden ser determinadas teóricamente de manera muy rápida y sencilla por medio de paquetes informáticos de análisis de estructuras, sin embargo, su exactitud es incierta, ya que depende de la precisión de definición del modelo estructural, de la parametrización de los distintos materiales constructivos que componen la estructura, y de las condiciones de contorno (apoyos).

Durante el diseño de una estructura, el comportamiento dinámico de la estructura (en dicho momento teórico) es determinante para el cálculo de las fuerzas de diseño, sin embargo, en esa etapa los resultados son aproximados y no reales.

Para el caso de obras existentes, es posible monitorear la estructura y obtener experimentalmente las frecuencias de vibración. Estas frecuencias, obtenidas de manera experimental, son precisas y a diferencia de las frecuencias analíticas o teóricas, representan el comportamiento real de la estructura.

Dada la relevancia de obtener datos reales del puente, en esta investigación se obtendrán las frecuencias de vibrar del puente por medio de experimentación con el fin de determinar el comportamiento dinámico real de la estructura.

2.8. Temperatura cerca al sitio del puente y sus efectos

La temperatura es la magnitud física que expresa el grado frío o calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin (K). (Real academia española, 2021).

En Costa Rica la unidad de expresión de la temperatura es el grado Celsius, en lugar de grados kelvin.

A través del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), se obtuvieron las temperaturas máximas, mínimas y promedios mensuales desde el año 2008 hasta el 2022, medidas en la estación de monitoreo del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, sitio relativamente cercano a la ubicación del puente.

Con los datos obtenidos se ha graficado el comportamiento de las temperaturas en ese sitio de monitoreo durante los últimos catorce años; en donde, al detalle se aprecia que las temperaturas mínimas van desde los 17 °C hasta los 20 °C; de igual forma, las temperaturas máximas que van desde los 25 °C hasta los 32 °C, y por último, las temperaturas promedios de los 20 °C hasta los 25 °C, aproximadamente.

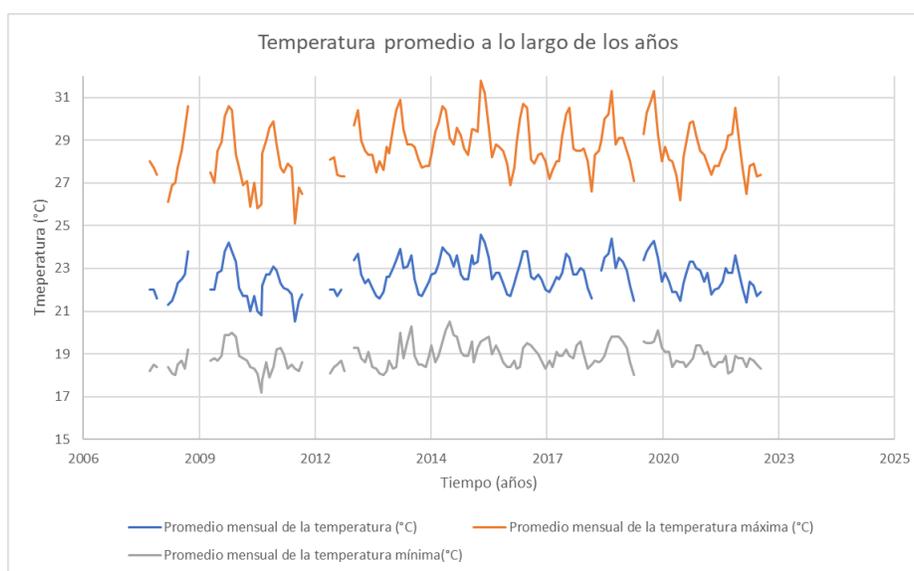


Figura 05: Temperaturas promedio desde el año 2008 hasta el 2022, Elaboración propia.

Los materiales experimentan cambios en la geometría ante variaciones de temperatura. En el caso de un puente, al aumentar la temperatura, su superestructura experimenta dilatación, por lo que su longitud aumentará. Ante un aumento en la longitud del puente, el mismo experimentará una disminución de su rigidez producto del incremento de temperatura experimentado.

Es sabido que los cambios de rigidez provocados por cambios ordinarios de temperatura no son considerados daño en la estructura, ya que estos cambios (tanto de temperatura, como de rigidez en la estructura) se dan de forma natural.

El interés en esta investigación es sobre los cambios térmicos ambientales, y sus correspondientemente cambios en el comportamiento dinámico del puente en estudio, y por ende, en los cambios en las frecuencias de sus modos de vibrar.

2.9. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es un procedimiento matemático usada para llevar señales entre el dominio del tiempo o espacio al dominio de la frecuencia, y viceversa. El concepto de ‘Transformada de Fourier’ se refiere a varios conceptos de forma simultánea:

- Operación de transformación de una función.
- Función resultado de la operación.
- Espectro de frecuencias de una función

La función original suele recibir el nombre de $x(t)$, siendo muy común que ‘t’ sea el tiempo, mientras que la función transformada suele recibir el nombre de $X(f)$, siendo ‘f’ la frecuencia.

En muchos ámbitos de la ingeniería y la ciencia es frecuente el uso de estas transformadas. En el caso de la ingeniería civil, es de utilidad para el cálculo del comportamiento dinámico de estructuras como puentes, edificios, obras de almacenamiento, torres, silos, entre otras.

3. Marco Metodológico

3.1. Paradigma

El inventario nacional de puentes de Costa Rica, cuenta con un alto porcentaje de puentes con niveles de deterioro y abandono significativos. El mantenimiento y seguimiento de los puentes es fundamental para el desarrollo del país.

En Costa Rica aún no es común el seguimiento de la salud estructural de las estructuras, y entre ellas los puentes. Generalmente, las inspecciones de puentes en Costa Rica son comúnmente realizadas con técnicas visuales, con capacidad de alcance muy limitadas, y sólo en muy pocas ocasiones se realizan inspecciones completas de tipo diagnóstico estructural.

A pesar de los esfuerzos dados por la Universidad de Costa Rica, la Universidad Latina de Costa Rica, y el Tecnológico de Costa Rica, en cuanto a la realización de investigación instrumentada en el área de la salud estructural, aún esta disciplina es escasa y limitada en el país.

A través de las técnicas de monitoreo instrumental, se da seguimiento al comportamiento dinámico del puente, y es eficiente en el seguimiento de la salud estructural del mismo.

La presente investigación aportará al conocimiento de los cambios de respuesta dinámica de los puentes, resaltando las bondades de la realización de monitoreos sobre los puentes en Costa Rica, con el fin del que el alcance de esta disciplina llegue a cubrir todo el inventario nacional de puentes.

Al considerarse la incidencia de la temperatura en el comportamiento dinámico de los puentes, se podrá descartar o no la ocurrencia del daño sobre los mismos cuando se presenten variaciones en las frecuencias y se asocien dichas variaciones a daños estructurales.

Vendrá a filtrar un posible efecto térmico en el comportamiento dinámico de los puentes en situaciones en donde se pueda, equivocadamente, decir que la estructura ha sufrido daño, o bien, confirmar un daño ante variaciones en las frecuencias de vibrar, cuando estas variaciones sobrepasen los límites provocados por los cambios de temperatura ambiental.

Por medio de esta investigación se busca incentivar la cultura de monitoreo en Costa Rica, de una manera económica, que contribuya al cuidado y seguimiento de la salud estructural de la infraestructura pública del país.

3.2. Enfoque metodológico

Tal como se ha indicado, las mediciones de aceleración se han realizado con un sensor fijado en tres puntos del puente. El monitoreo se ha realizado discretamente a distintas horas del día, iniciando cerca de la 1:30 am, hasta cerca de las 2:30 pm del mismo día, logrando medir la respuesta dinámica de la estructura a distintas temperaturas ambientales.

Posteriormente, los datos de aceleración del dominio del tiempo son transformados al dominio de la frecuencia con el uso del programa ADDA, lográndose identificar las frecuencias de los principales modos de vibrar del puente, a distintas temperaturas ambientales.

El enfoque de este estudio de investigación es de tipo cuantitativo, y el análisis de los datos de aceleración ha sido medido mediante métodos estadísticos.

En esta investigación se ha aumentado considerablemente la discretización del espectro de aceleraciones, esto en comparación con estudios previos (ej. Rodríguez (2021) y Céspedes (2022)), esto con el fin de mejorar la precisión de los resultados en el dominio de la frecuencia de los modos de vibrar visibles.

A través de los resultados se dimensiona la influencia de la temperatura ambiental en el comportamiento dinámico del puente, todo ello con el cálculo de las tasas de variación de frecuencia según la variación de temperatura para cada modo de vibrar visible, así también, la variación total de las frecuencias en el día de las mediciones.

3.3. Método de investigación

Rodríguez (2021) demostró en su estudio la eficiencia del monitoreo en puentes con la utilización de un sensor. Abriendo paso en la presente investigación, específicamente a la toma de mediciones con un único sensor; así también, al monitoreo en distintos puntos de la estructura, de acuerdo a las recomendaciones brindadas en Céspedes (2022).

Tal como se ha mencionado, en esta investigación se han realizado monitoreos en tres puntos de medición con el propósito de identificar la mayor cantidad de formas modales en el puente. Siendo los puntos de medición a 40 m, 60m, y 80m, medidos desde el bastión dos de la estructura.

Con los datos de aceleración analizados en el dominio de la frecuencia, se han realizado las comparaciones de las frecuencias de vibrar a diferentes temperaturas ambientales durante distintas horas del día.

La técnica de monitoreo empleada es económica, y con amplia utilización en la Universidad Latina de Costa Rica a través de su línea de investigación en dinámica estructural.

El propósito de realizar las comparaciones en frecuencia es para conocer la incidencia que puede generar los cambios en la temperatura ambiental presentes en un día típico en la zona.

3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

En los monitoreos se seleccionaron puntos idóneos para la colocación del sensor. La colocación del sensor se llevó sobre la baranda rígida peatonal del puente, por lo que no se interrumpió el tránsito de vehículos y peatones.

El sensor descrito de la marca SENSR tiene la capacidad de tomar 400 datos por segundo por eje, logrando una adecuada discretización de datos en esta estructura.

Se realizan mediciones en cada punto (varios puntos conforme a la recomendación dada en Céspedes (2022)) realizándose mediciones a cada hora aproximadamente, y se utilizan los datos tomados en el eje gravitacional (vertical) del acelerómetro.

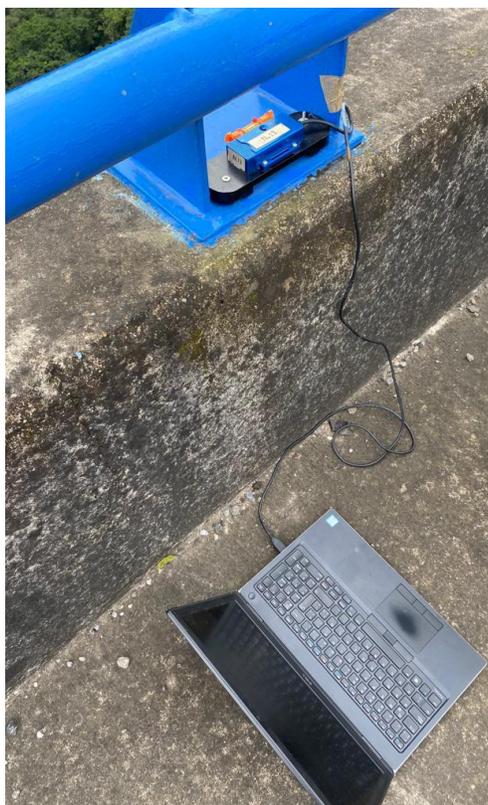


Figura 06: Instrumentos utilizados para la recolección de datos. Elaboración propia.

3.5. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

Los datos recolectados en el dominio del tiempo son tratados mediante la aplicación de filtros de tipo paso bajo, los cuales mantienen las frecuencias de interés sin alteración y elimina las frecuencias superiores a 20 Hz. Posteriormente, se realizan ventanas de Hanning con el fin de mejorar el cálculo de los espectros de aceleración en el dominio de la frecuencia.

Para la transformación de los datos de aceleración del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se realiza una discretización de 131.072 puntos con suavizados (smoothing) bajos.

En el programa ADDA se definen 25 ventanas de análisis por cada registro de monitoreo, con esas ventanas se elaboran espectros de aceleración de Fourier en el dominio de la frecuencia.

Con las 25 ventanas de análisis se toma un espectro de aceleración promedio, que representa el espectro de vibrar del puente en ese monitoreo. Esto se repite para cada monitoreo realizado a lo largo del día a las distintas temperaturas ambientales registradas.

Finalmente, los espectros promedios representados a través de las frecuencias de los modos de vibración identificados, son comparados y se calcula la evolución de los cambios de estas frecuencias de cada modo de vibrar identificado a las distintas temperaturas ambientales. Se calculan también las tasas de variación de frecuencia con respecto a la temperatura, y se determina de la variación total de las frecuencias para el día de medición.

4. Análisis de resultados

A continuación, se muestran los resultados de los análisis elaborados a las mediciones de aceleración obtenidas en cada monitoreo realizado sobre el puente Río Virilla de la Ruta Nacional No. 27.

4.1. Espectros de Fourier en aceleración

La siguiente figura muestra, a manera de ejemplo, los 25 espectros de aceleración de Fourier correspondientes a cada ventana de análisis, aplicada sobre el registro de monitoreo realizado a las 08:44 am en la posición de medición marcada a los 80m. Las demás graficas se muestran en los anexos de este estudio.

De ésta y de todas las gráficas de cada monitoreo, se tomó el espectro promedio de aceleración (dibujado en color negro).

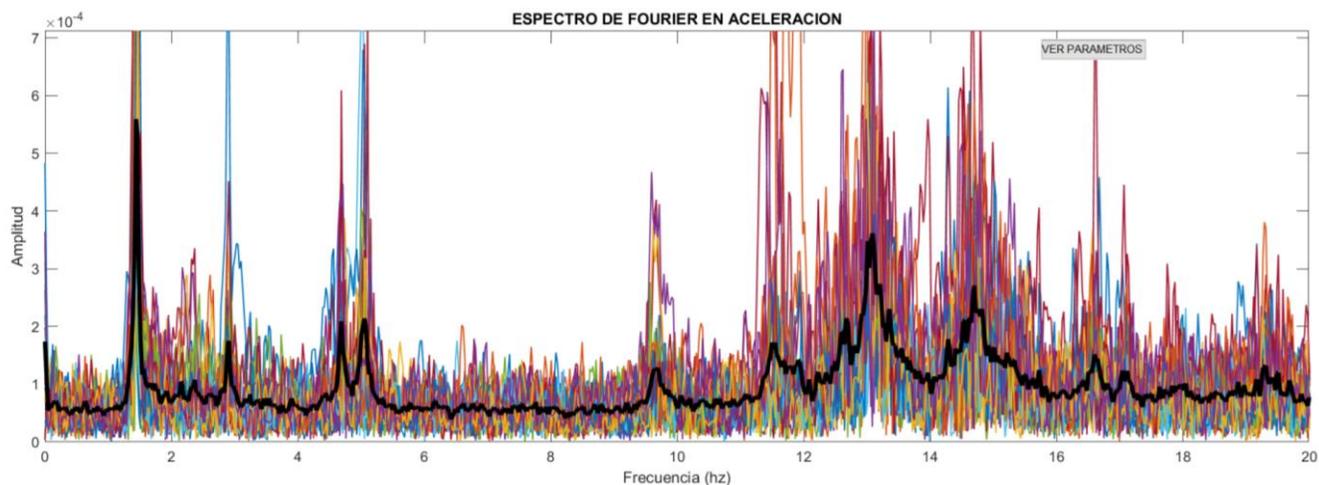


Figura 07: Espectro de Fourier en aceleración, a las 08:44 am a los 80 metros.
Elaboración propia.

A continuación, se mostrarán, para cada monitoreo los espectros promedios de aceleración, los cuales, cada uno tiene un código conformado con las letras MED, que significan “Medición”, seguido por el punto de medición (40, 60, ó 80m), y finalmente, la hora de medición.

4.1.1. Espectros promedios de aceleración obtenidos a 80 metros:

Se muestra a continuación, todos los espectros promedios de aceleración obtenidos durante las 13 mediciones en el sitio de 80m



MED-80-01.11:

Figura 08: Medición 1- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

MED-80-02.01:

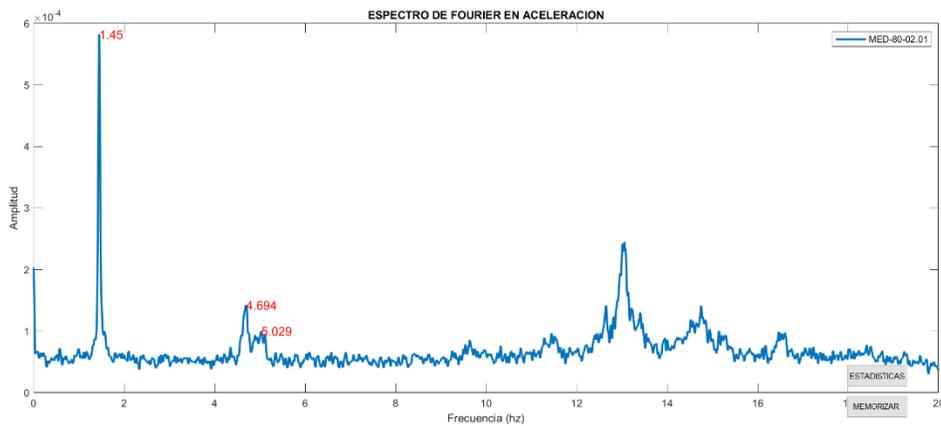


Figura 09: Medición 2- Espectro de Fourier- 80 m. Elaboración propia.

MED-80-03.22:

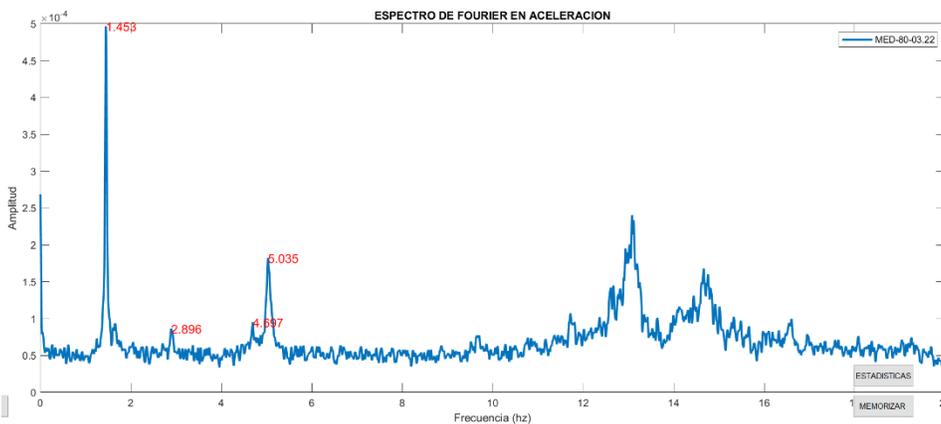


Figura 10: Medición 3- Espectro de Fourier- 80 m. Elaboración propia.

MED-80-04.35:

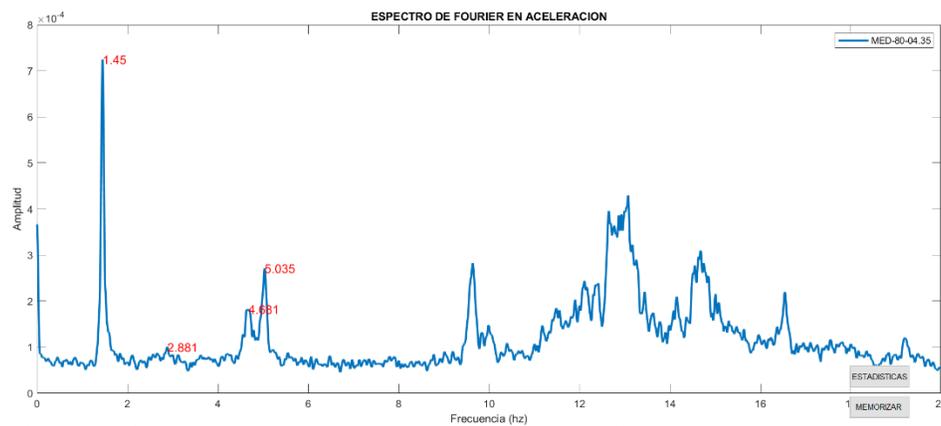


Figura 11: Medición 4- Espectro de Fourier- 80 m. Elaboración propia.

MED-80-05.46

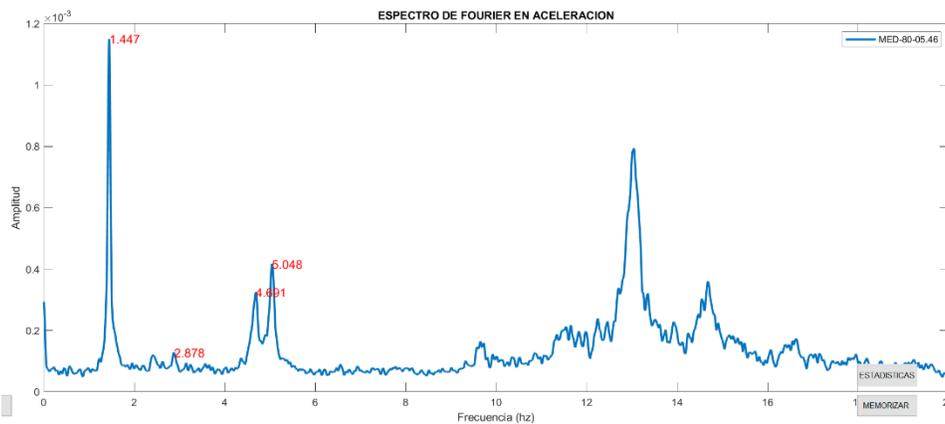


Figura 12: Medición 5- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

MED-80-06.48:

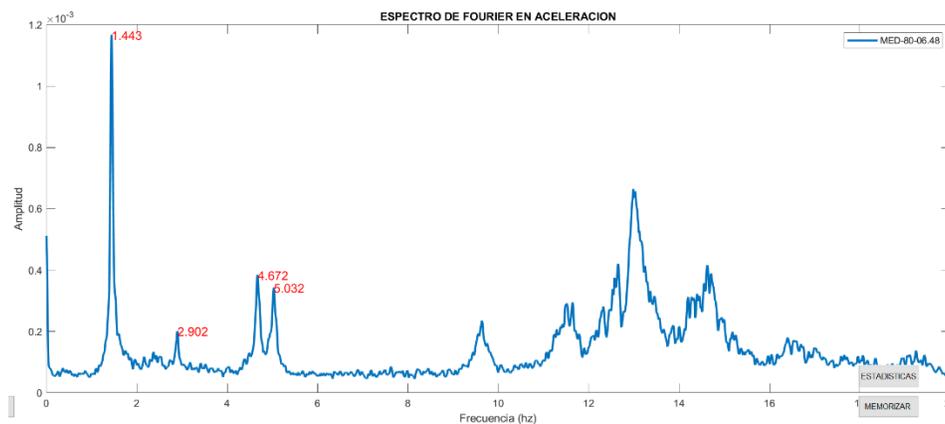


Figura 13: Medición 6- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

MED-80-07.44:

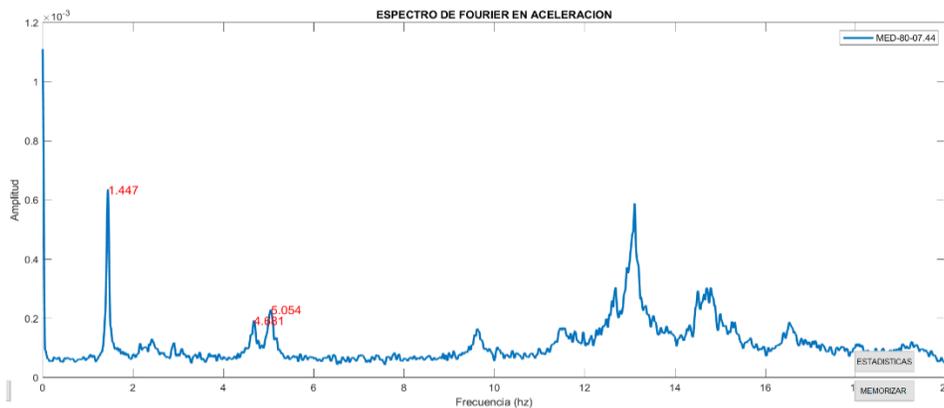


Figura 14: Medición 7- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

MED-80-08.44:

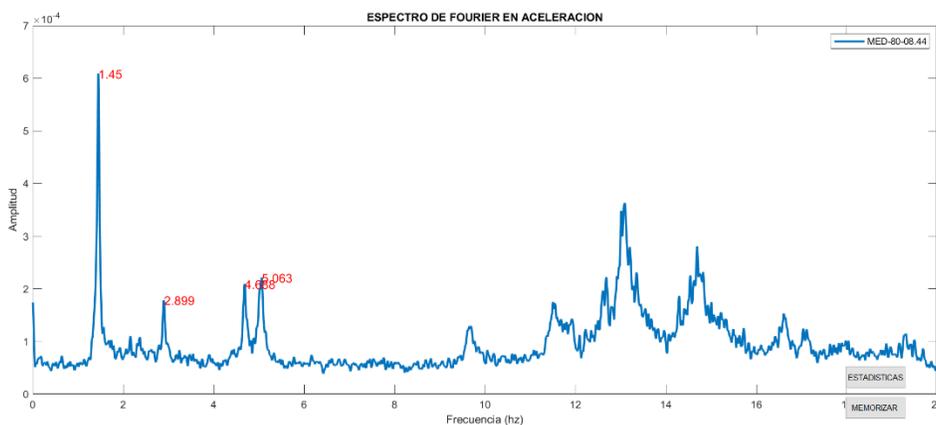


Figura 15: Medición 8- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

MED-80-09.43:

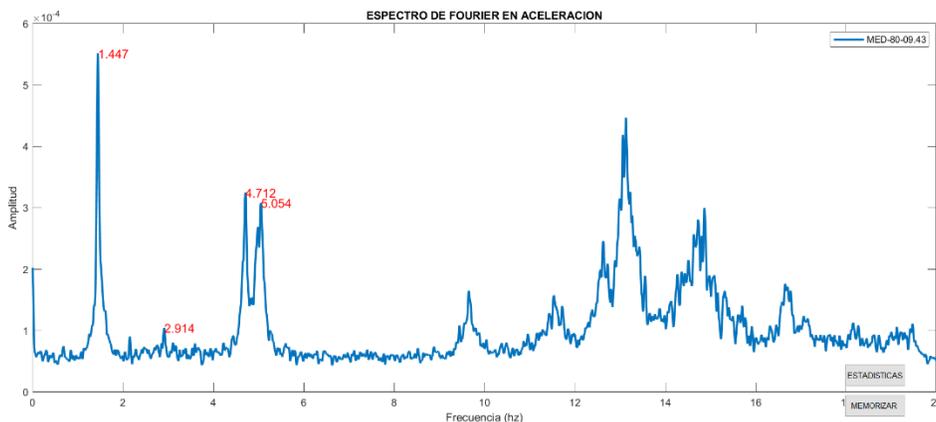


Figura 16: Medición 9- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

MED-80-10.47:

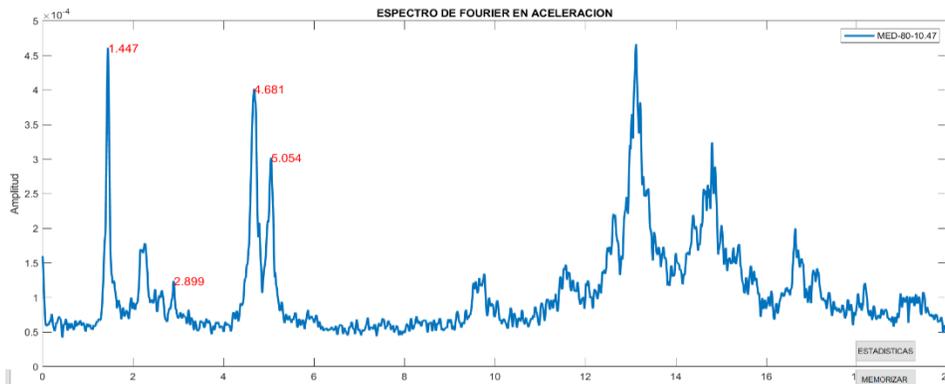


Figura 17: Medición 10- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

MED-80-11.52:

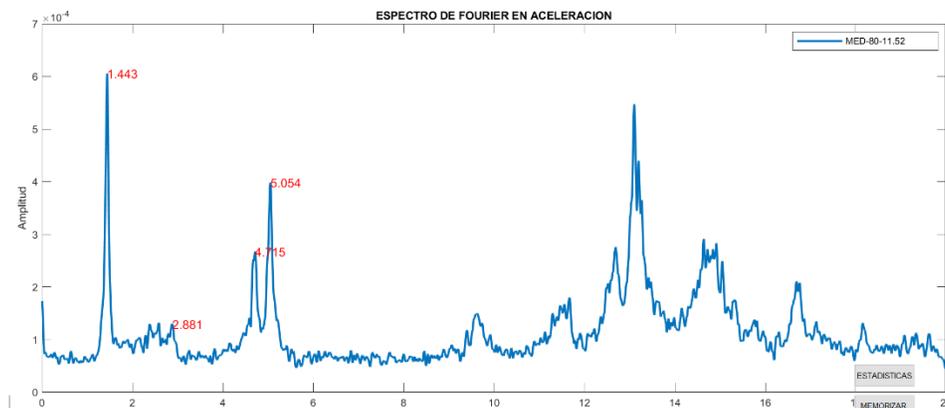


Figura 18: Medición 11- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

MED-80-12.48:

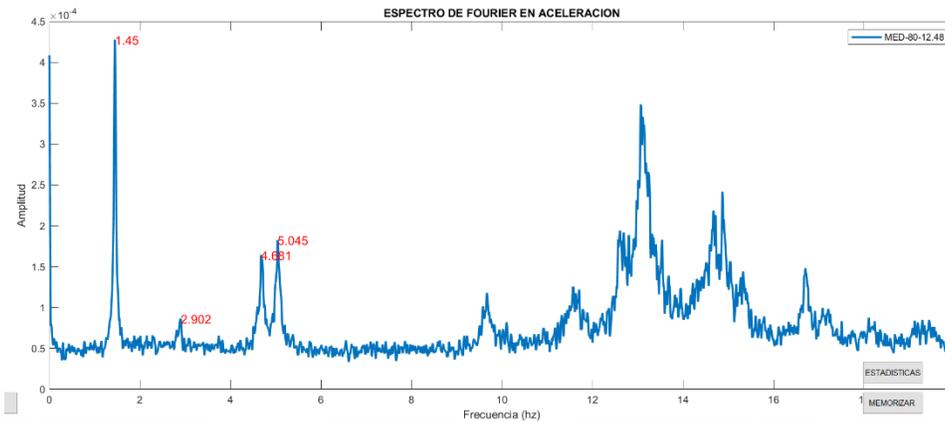


Figura 19: Medición 12- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

MED-80-13.43:

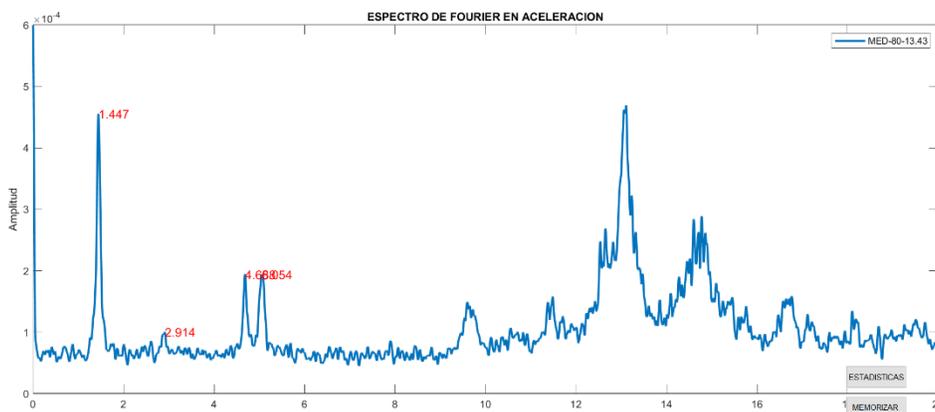


Figura 20: Medición 13- Espectro de Fourier – 80 m. Elaboración propia.

4.1.2. Espectros promedios de aceleración obtenidos a 60 metros:

Se muestra a continuación, todos los espectros promedios de aceleración obtenidos durante las 13 mediciones en el sitio de 60m.

MED-60-01.23:

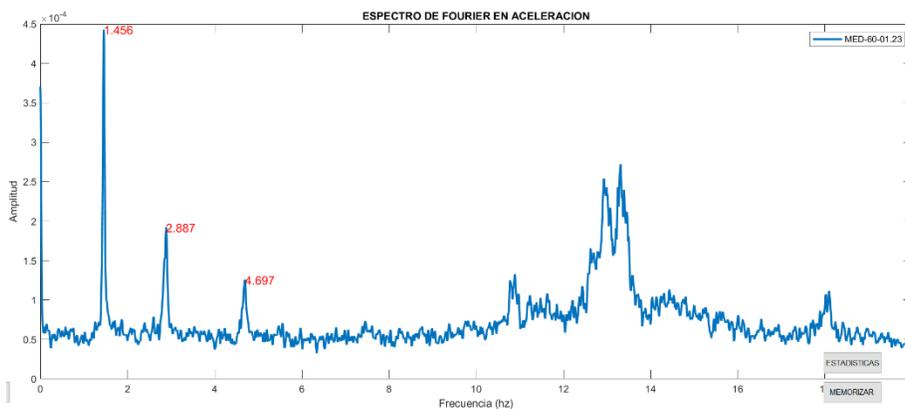


Figura 21: Medición 1- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-02.13:

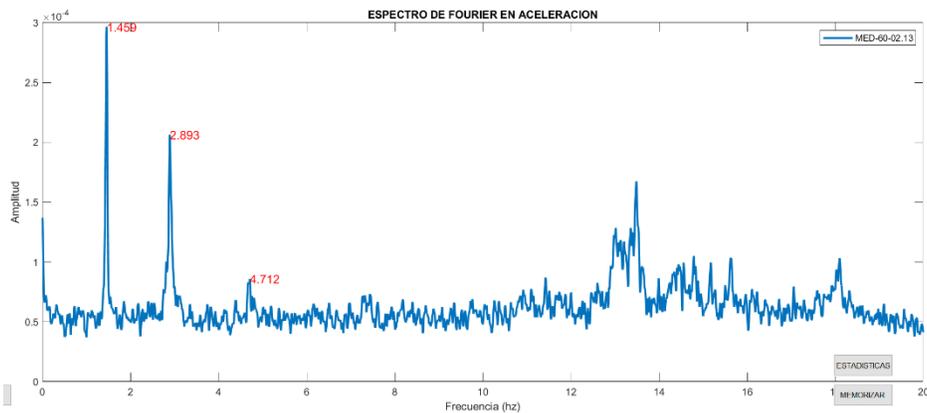


Figura 22: Medición 2- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-03.35:

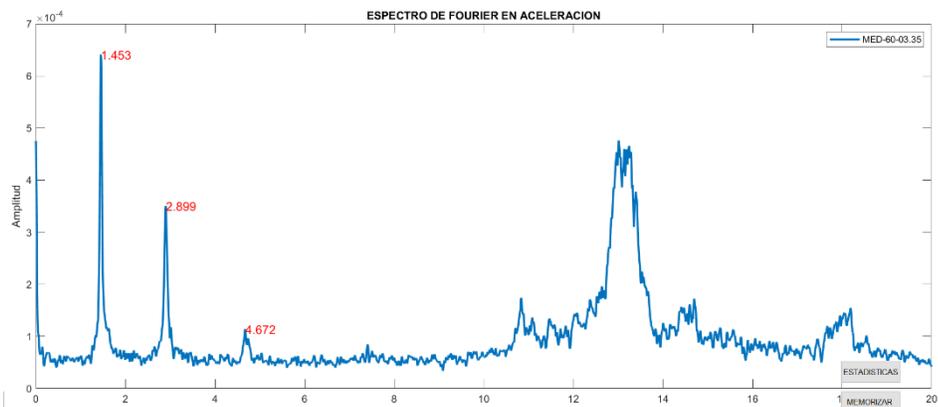


Figura 23: Medición 3- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-04.44:

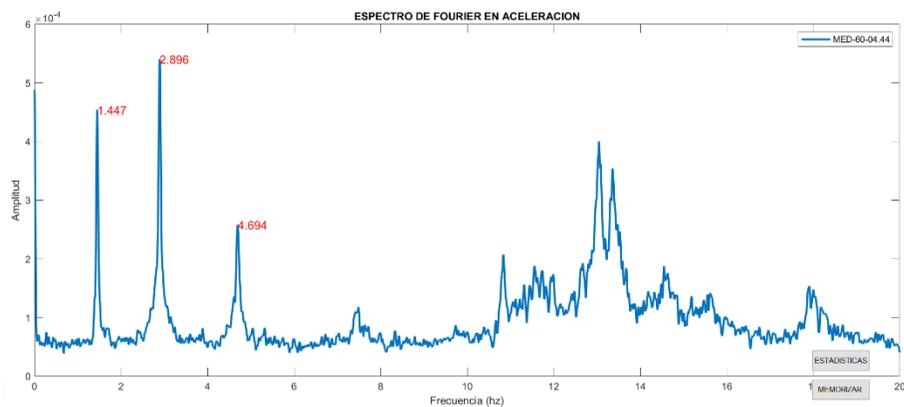


Figura 24: Medición 4- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-05.55:

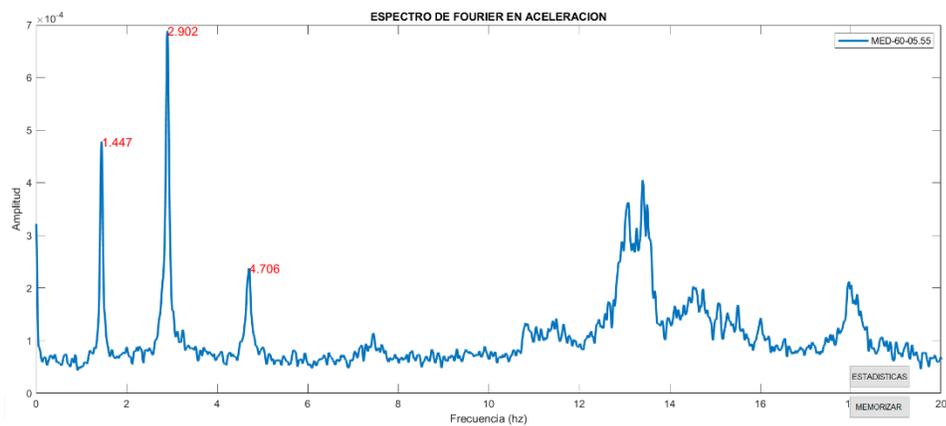


Figura 25: Medición 5- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-06.58:

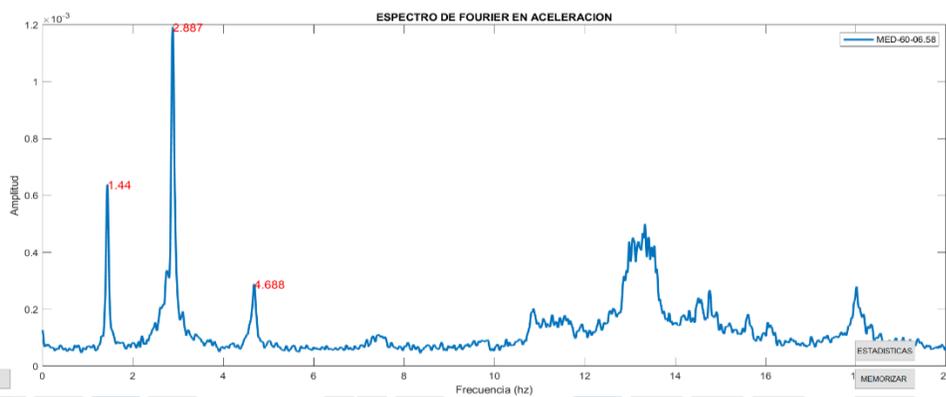


Figura 26: Medición 6- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-07.53:

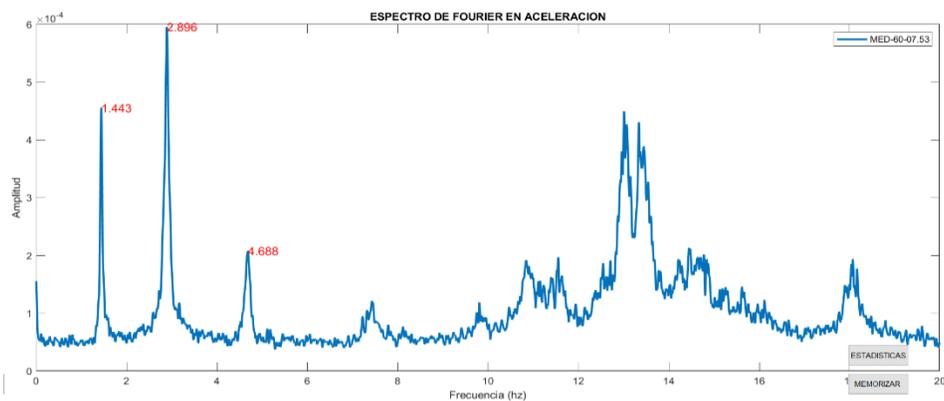


Figura 27: Medición 7- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-08.55:

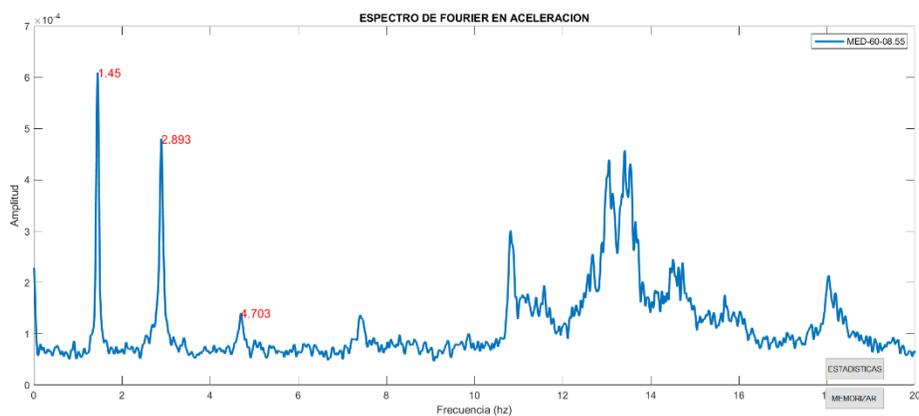


Figura 28: Medición 8- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-09.54:

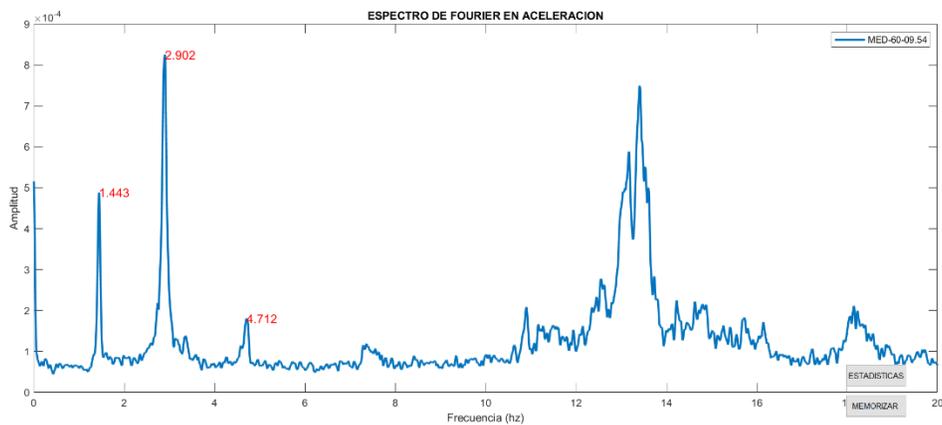


Figura 29: Medición 9- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-10.57:

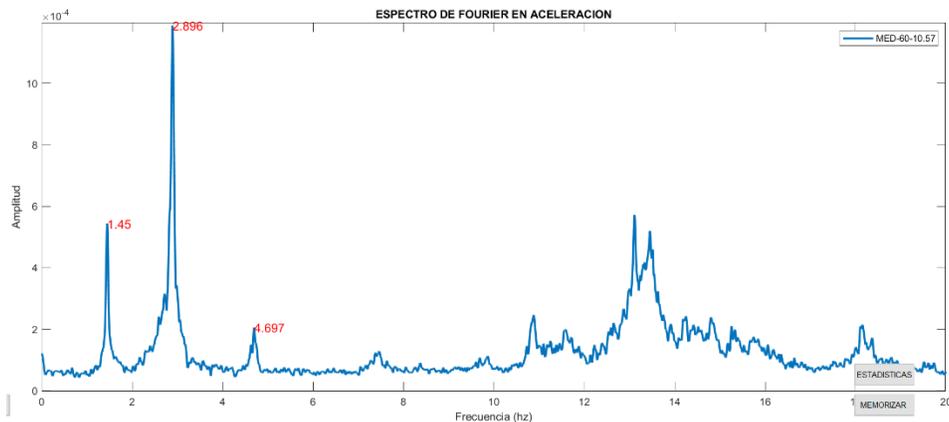


Figura 30: Medición 10- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-12.01:

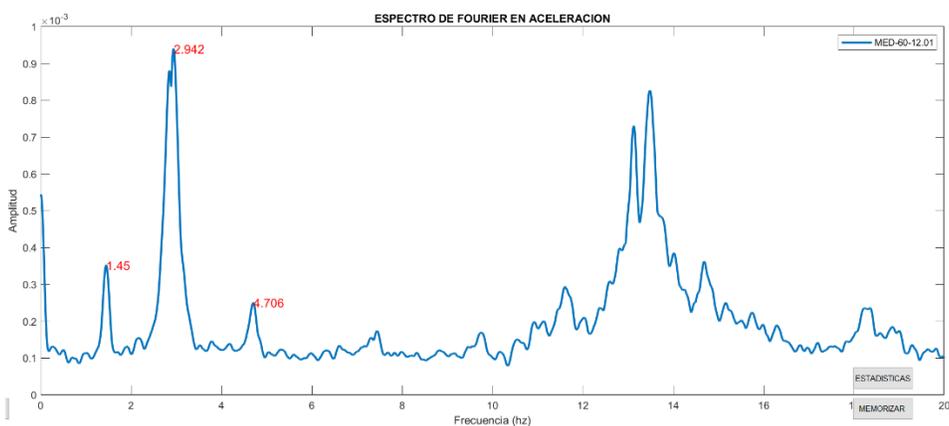


Figura 31: Medición 11- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-13.04:

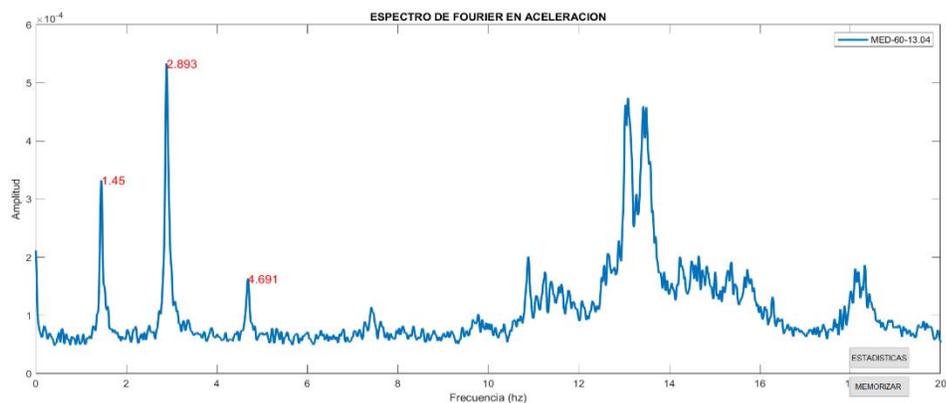


Figura 32: Medición 12- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

MED-60-13.52:

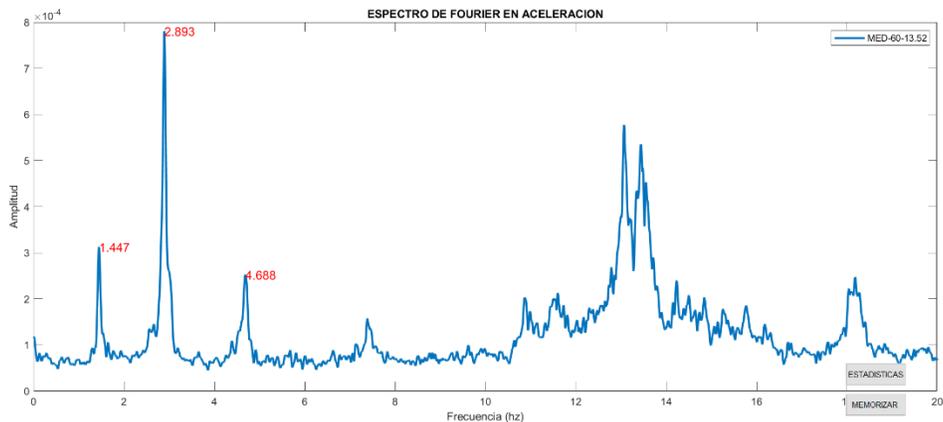


Figura 33: Medición 13- Espectro de Fourier – 60 m. Elaboración propia.

4.1.3. Espectros promedios de aceleración obtenidos a 40 metros:

Se muestra a continuación, todos los espectros promedios de aceleración obtenidos durante las 13 mediciones en el sitio de 40m.

MED-40-01.38:

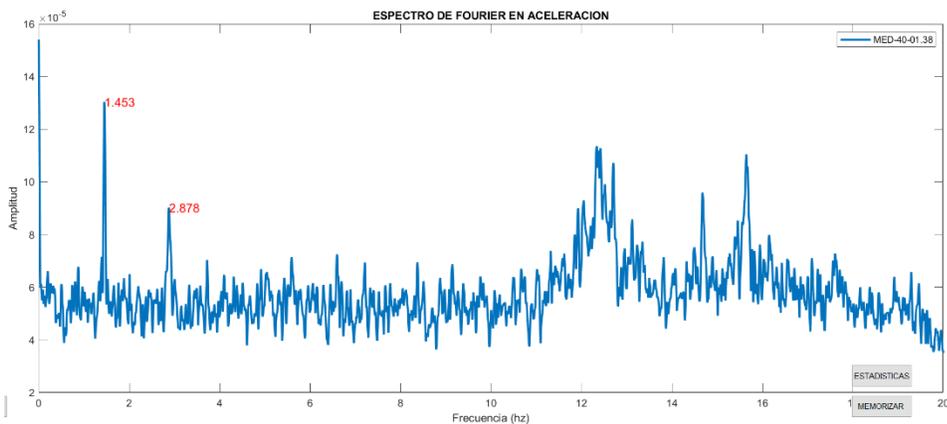


Figura 34: Medición 1- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-02.26:

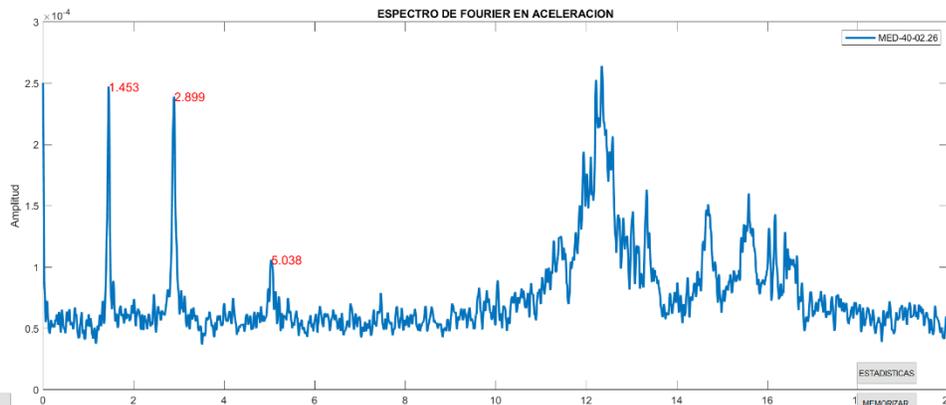


Figura 35: Medición 2- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-03.49:

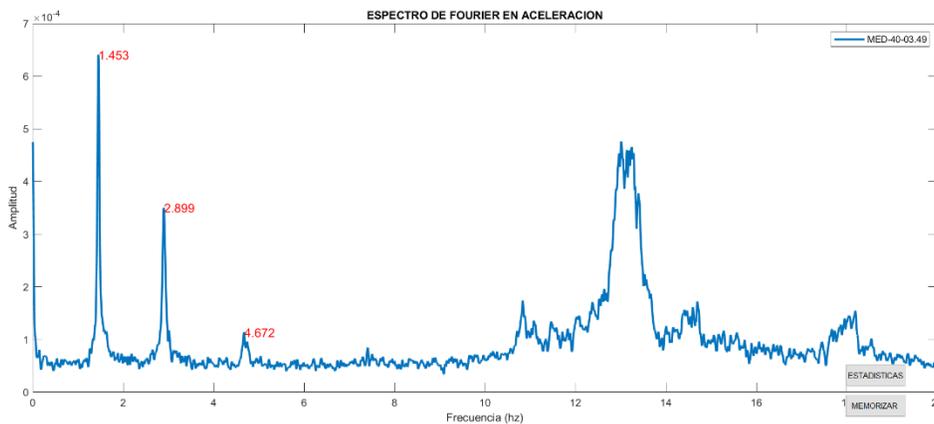


Figura36: Medición 3- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-04.56:

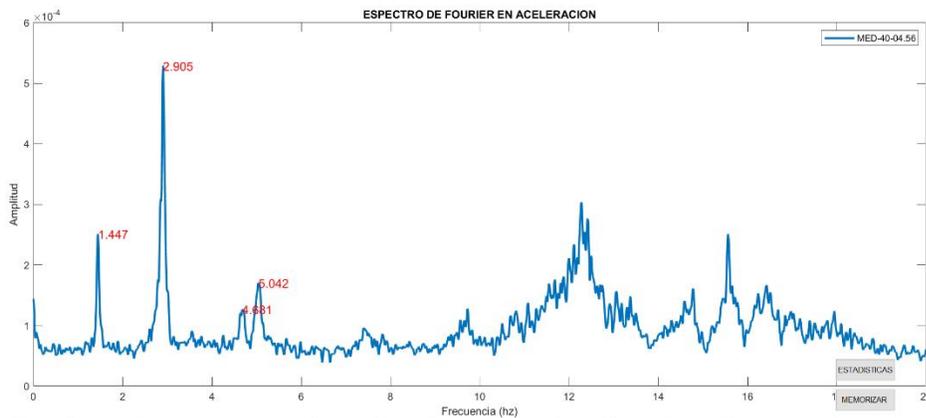


Figura 37: Medición 4- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-06.04:

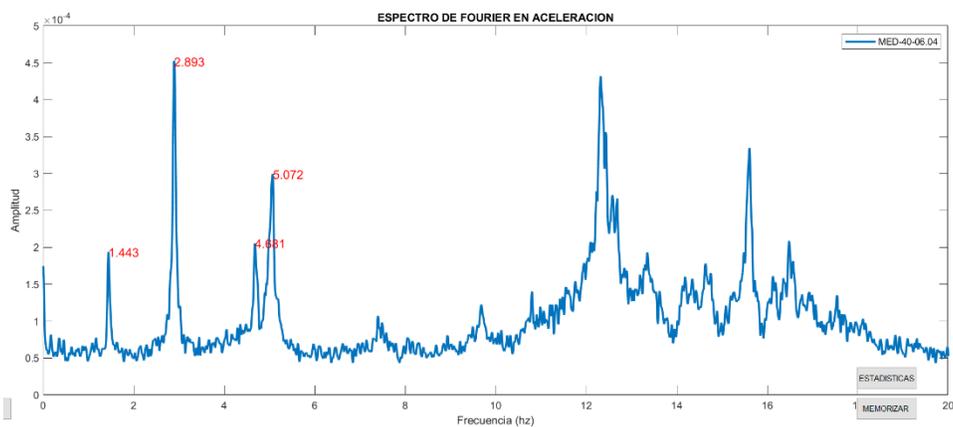


Figura 38: Medición 5- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-07.07:

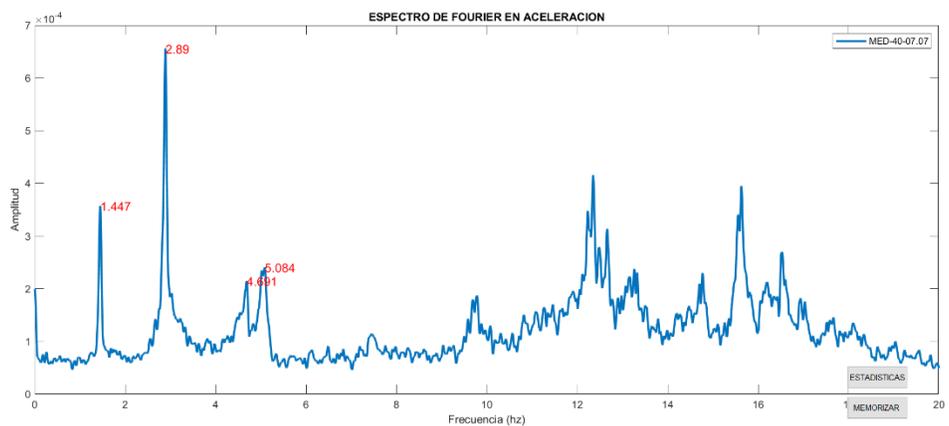


Figura 39: Medición 6- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-08.06:

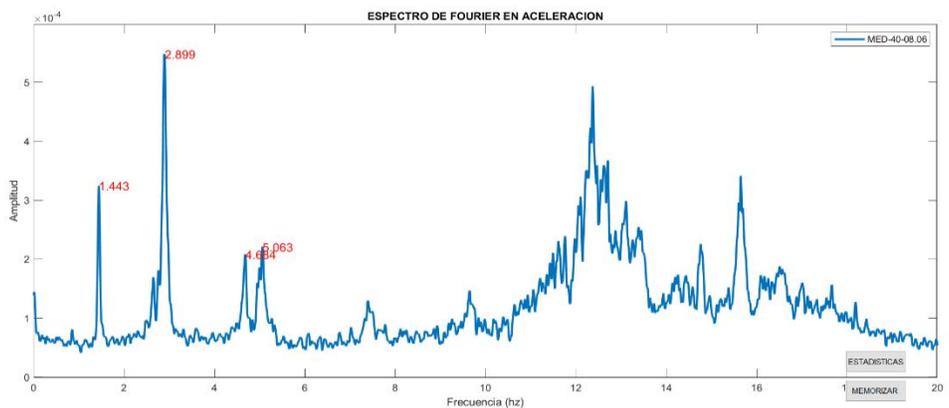


Figura 40: Medición 7- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-09.03:



Figura 41: Medición 8- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-10.02:

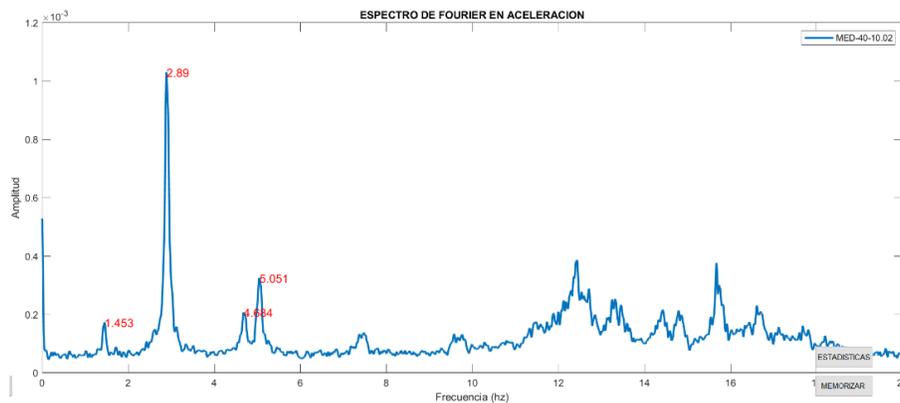


Figura 42: Medición 9- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-11.07:

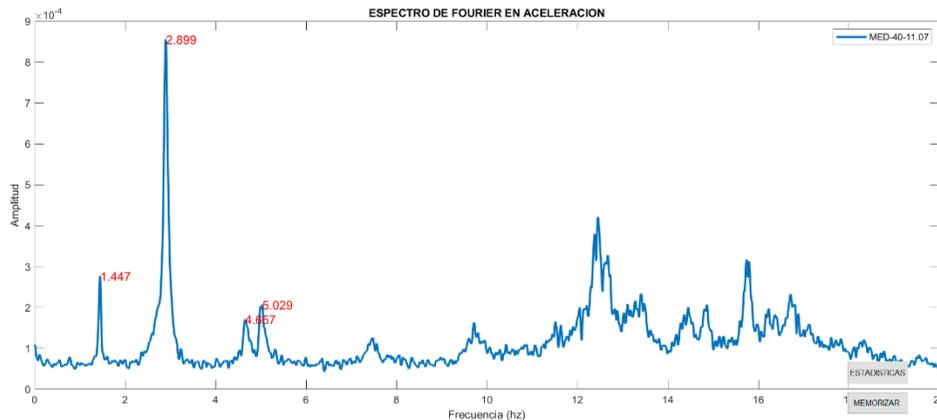


Figura 43: Medición 10- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-12.05:

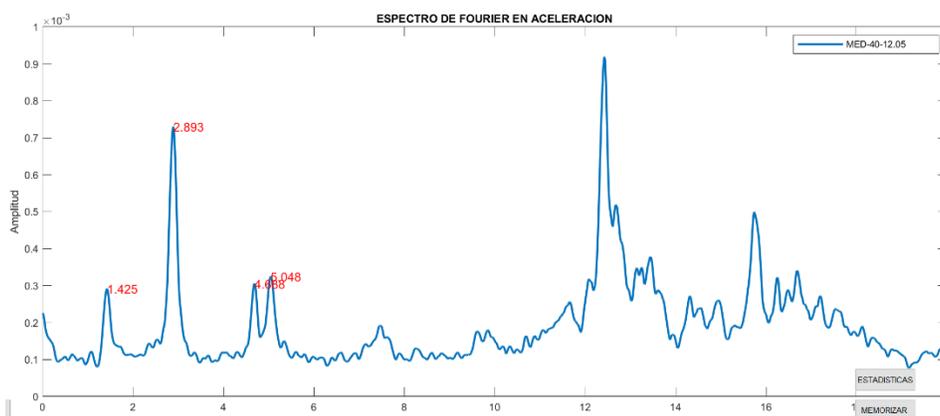


Figura 44: Medición 11- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-13.13:

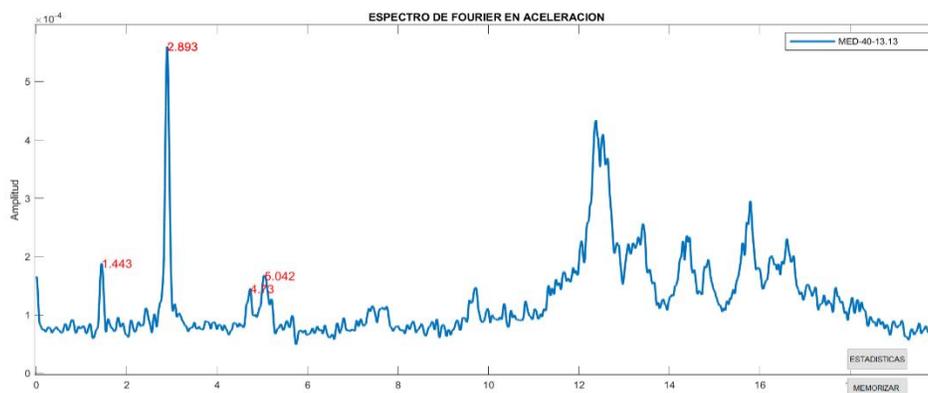


Figura 45: Medición 12- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

MED-40-14.01:

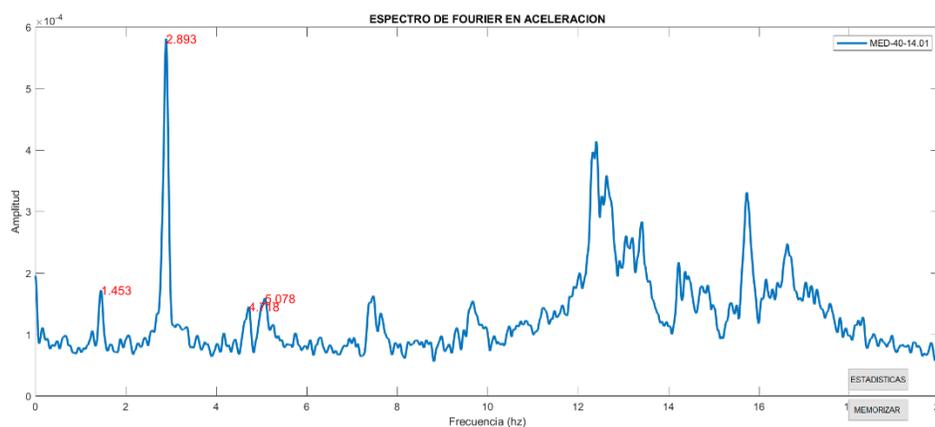


Figura 46: Medición 13- Espectro de Fourier – 40 m. Elaboración propia.

4.2. Temperaturas experimentadas

Los cambios de temperatura ambiental que se obtuvieron a lo largo del día del monitoreo se muestran en la siguiente tabla. Siendo que la temperatura mínima promedio es 20,63 °C y la máxima promedio es 27,58 °C, la diferencia entre la mínima y la máxima es 6.95 °C.

Temperatura promedio			
40 m	60 m	80 m	Promedio
21,21	21,35	21,56	21,3733
20,91	20,81	20,96	20,8933
21,65	21,45	21,83	21,6433
20,82	21,48	22,35	21,5500
20,46	20,40	21,04	20,6333
23,10	22,83	22,53	22,8200
23,58	23,29	23,54	23,4700
25,85	25,25	24,98	25,3600
27,35	26,58	27,01	26,9800
27,28	27,26	26,92	27,1533
27,52	27,47	27,75	27,5800
25,67	25,77	26,77	26,0700
24,13	24,17	25,07	24,4567

Figura 47: Temperatura ambiental promedio (°C) del día de medición. Elaboración propia.

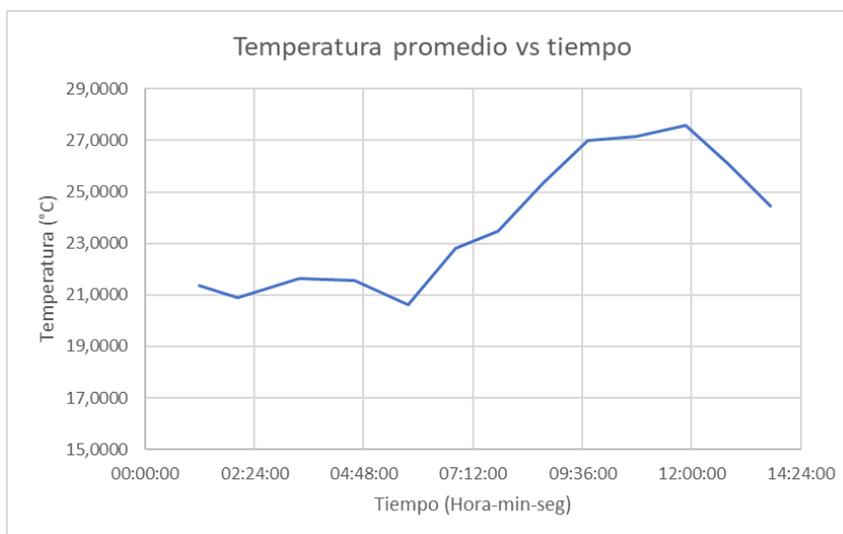


Figura 48: Gráfica de la temperatura ambiental promedio vs tiempo durante el día de medición. Elaboración propia

Al graficar los datos de temperatura presentes el día del monitoreo con los registros históricos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), correspondientes a la estación del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (Sección Oeste), se pudo comparar el historial de temperaturas desde el año 2008 a 2022, con la temperatura experimentada el día de las mediciones.

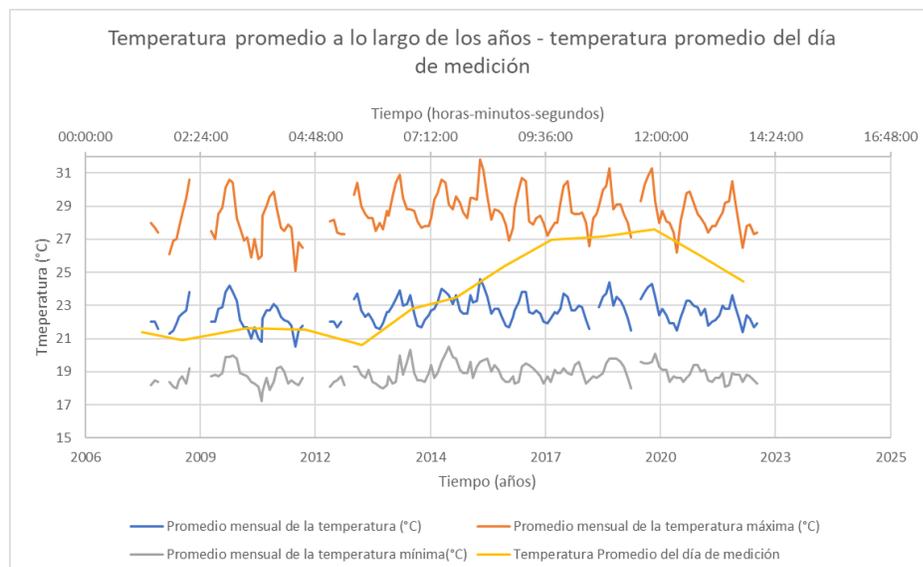


Figura 49: *Temperaturas máximas, mínimas, y promedio entre los años 2008 y 2022 – temperatura promedio del día de medición. Elaboración propia.*

Se aprecia en el gráfico anterior, que la temperatura ambiental monitoreada el día de las mediciones se encuentran dentro de los márgenes de temperatura máxima y mínima de los últimos catorce años.

4.3. Evolución de los Modos de Vibrar identificados

Se lograron localizar un total de cuatro modos vibrar del puente. Los modos de vibrar identificados se resumen en las siguientes tablas y gráficas.

El de error considerado en este estudio es el de discretización en el análisis de Fourier, en donde se han considerado 131.072 puntos de discretización, obteniendo un error de $400 \text{ Hz}/131.072$, equivalente a 0.003 Hz , siendo un valor relativamente pequeño. Este dato fue obtenido al dividir la frecuencia de muestreo entre la cantidad de puntos de discretización para la transformada de Fourier.

4.3.1. Evolución de modos de vibrar medidos a 80 metros:

La siguiente tabla muestra los valores de las frecuencias obtenidas (Hz) en el sitio de medición a 80m bajo las temperaturas indicadas (°C).

80 metros					
Medición	Temperatura	Frecuencias (Hz)			
		Modo A	Modo B	Modo C	Modo D
MED-80-01.11	21,56	1,450			5,066
MED-80-02.01	20,96	1,450		4,694	5,029
MED-80-03.22	21,83	1,453	2,896	4,697	5,035
MED-80-04.35	22,35	1,450	2,881	4,681	5,035
MED-80-05.46	21,04	1,447	2,878	4,691	5,048
MED-80-06.48	22,53	1,443	2,902	4,672	5,032
MED-80-07.44	23,54	1,447		4,681	5,054
MED-80-08.44	24,98	1,450	2,899	4,688	5,063
MED-80-09.43	27,01	1,447	2,914	4,712	5,054
MED-80-10.47	26,92	1,447	2,899	4,681	5,054
MED-80-11.52	27,75	1,443	2,881	4,715	5,054
MED-80-12.48	26,77	1,450	2,902	4,681	5,045
MED-80-13.43	25,07	1,447	2,914	4,688	5,045

Figura 50: Registro de frecuencias medidos a los 80 metros. Frecuencias dadas en Hz y temperaturas en °C. Elaboración propia.

A continuación, tenemos el registro de las frecuencias obtenidas a 80m, junto a la variación de la temperatura ambiental para cada medición

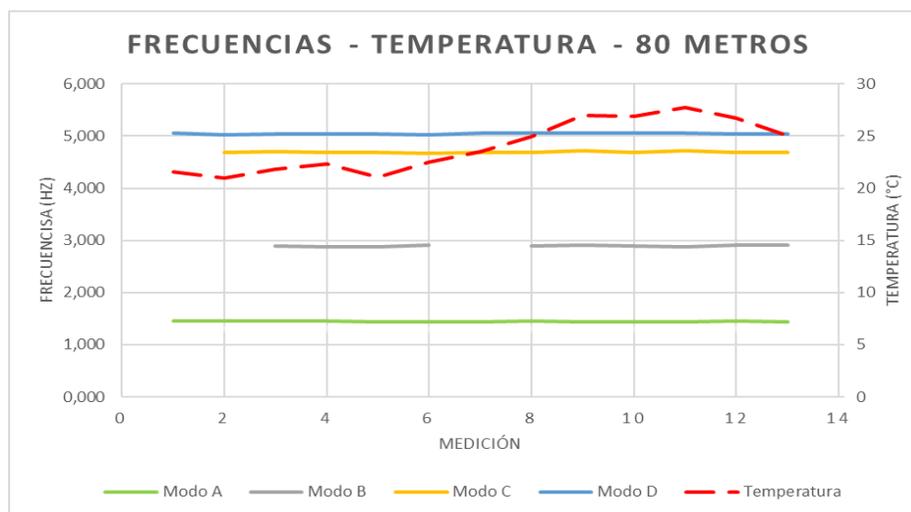


Figura 51: Frecuencias – Temperaturas – 80 metros. Elaboración propia.

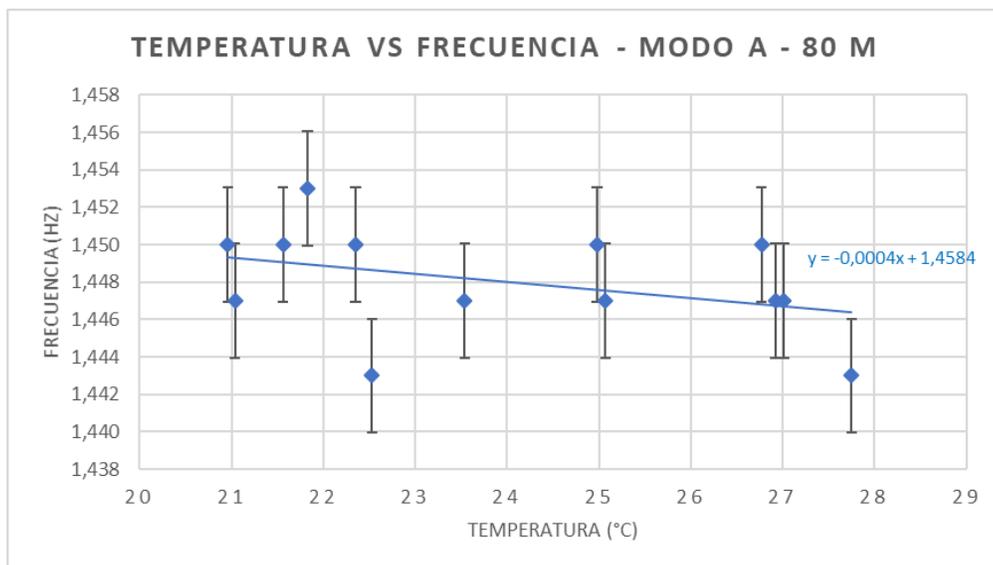


Figura 52: Temperatura vs frecuencia – Modo A – 80 metros. Elaboración propia.

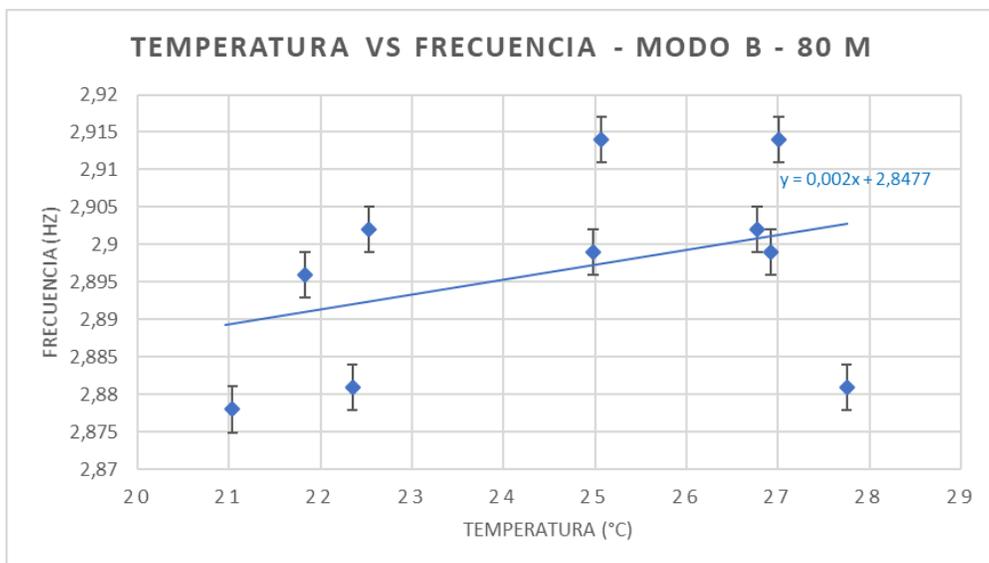


Figura 53: Temperatura vs frecuencia – Modo B – 80 metros. Elaboración propia.

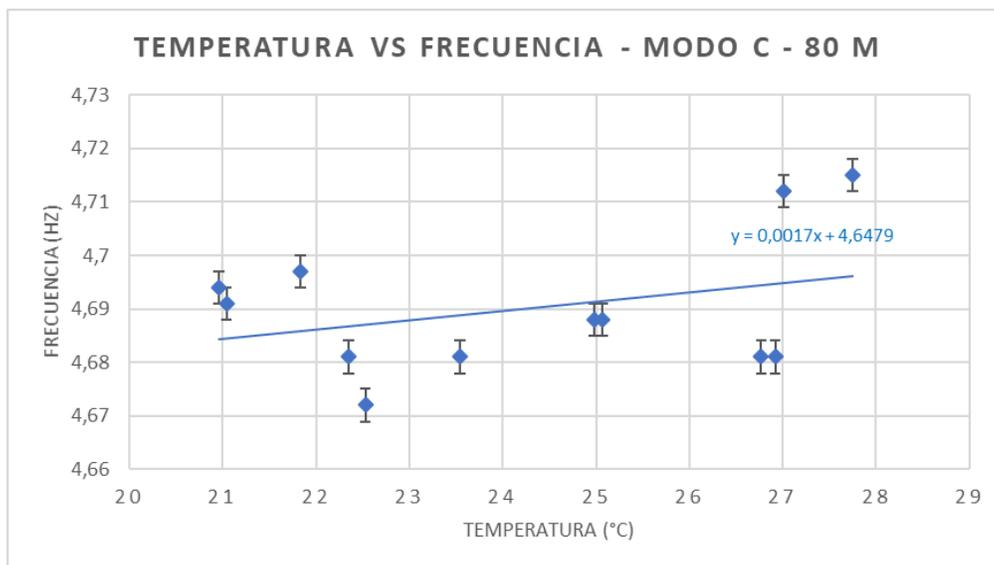


Figura 54: Temperatura vs frecuencia – Modo C – 80 metros. Elaboración propia.

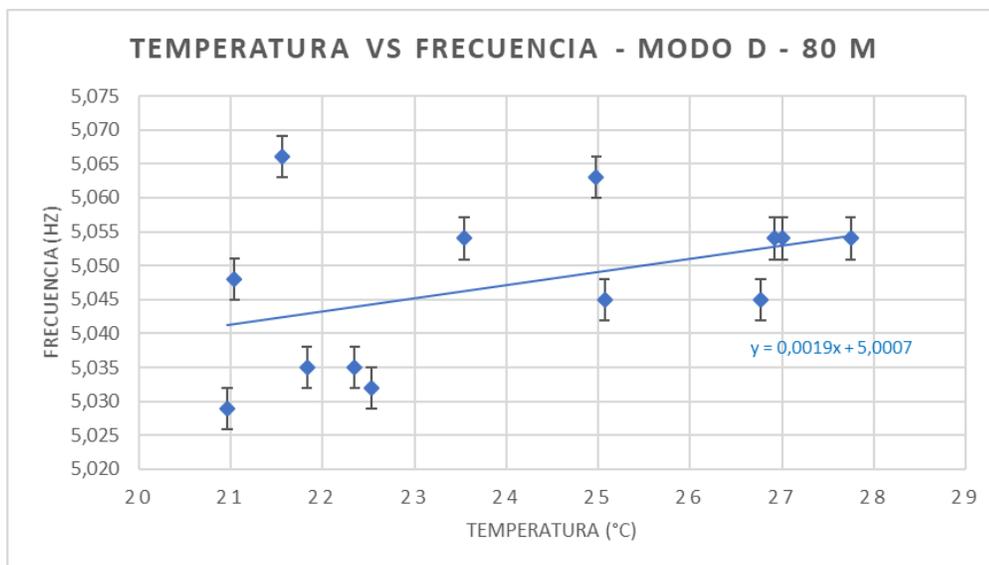


Figura 55: Temperatura vs frecuencia – Modo D – 80 metros. Elaboración propia.

4.3.2. Evolución de modos de vibrar medidos a 60 metros:

La siguiente tabla muestra los valores de las frecuencias (Hz) obtenidas en el sitio de medición a 60m bajo las temperaturas (°C) indicadas.

60 metros					
Medición	Temperatura	Frecuencias (Hz)			
		Modo A	Modo B	Modo C	Modo D
MED-60-01.23	21,35	1,456	2,887	4,697	-
MED-60-02.13	20,81	1,459	2,893	4,712	-
MED-60-03.35	21,45	1,453	2,899	4,672	-
MED-60-04.44	21,48	1,447	2,896	4,694	-
MED-60-05.55	20,40	1,447	2,902	4,706	-
MED-60-06.58	22,83	1,440	2,887	4,688	-
MED-60-07.53	23,29	1,443	2,896	4,688	-
MED-60-08.55	25,25	1,450	2,893	4,703	-
MED-60-09.54	26,58	1,443	2,902	4,712	-
MED-60-10.57	27,26	1,450	2,896	4,697	-
MED-60-12.01	27,47	1,450	2,942	4,706	-
MED-60-13.04	25,77	1,450	2,893	4,691	-
MED-60-13.52	24,17	1,447	2,893	4,688	-

Figura 56: Registro de frecuencias medidos a los 60 metros. Frecuencias dadas en Hz y temperaturas en °C. Elaboración propia.

A continuación, tenemos el registro de las frecuencias obtenidas a 60m, junto a la variación de la temperatura ambiental para cada hora de medición

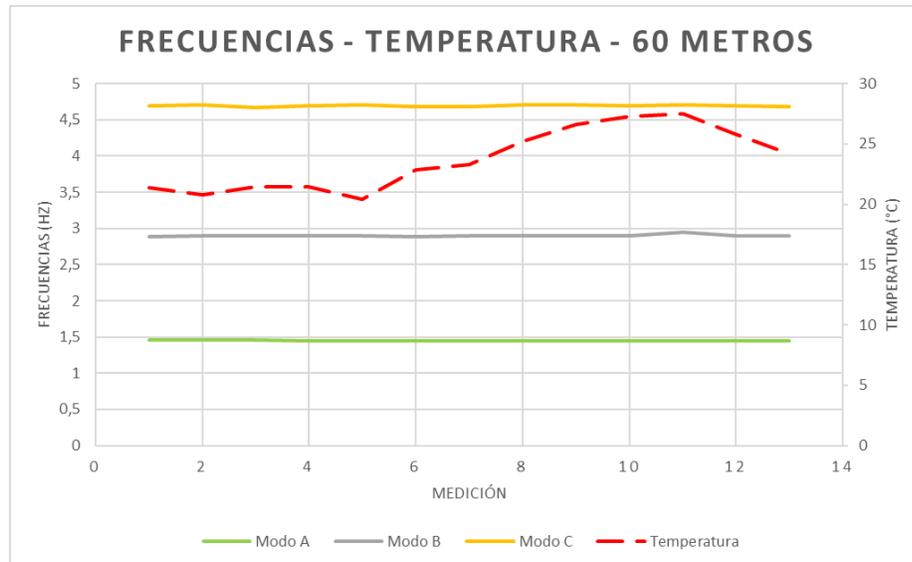


Figura 57: Frecuencias – Temperaturas – 60 metros. Elaboración propia.

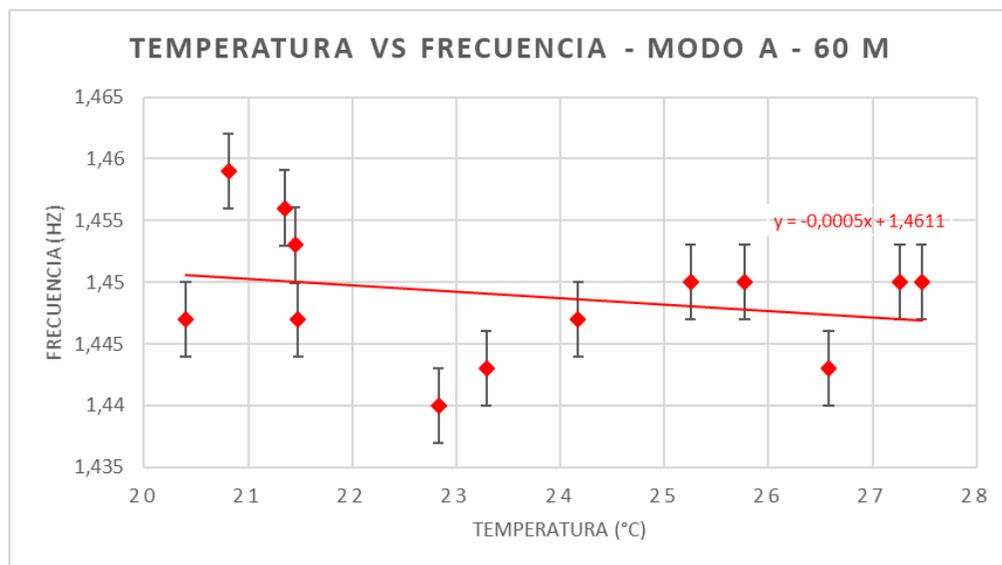


Figura 58: Temperatura vs frecuencia – Modo A – 60 metros. Elaboración propia.

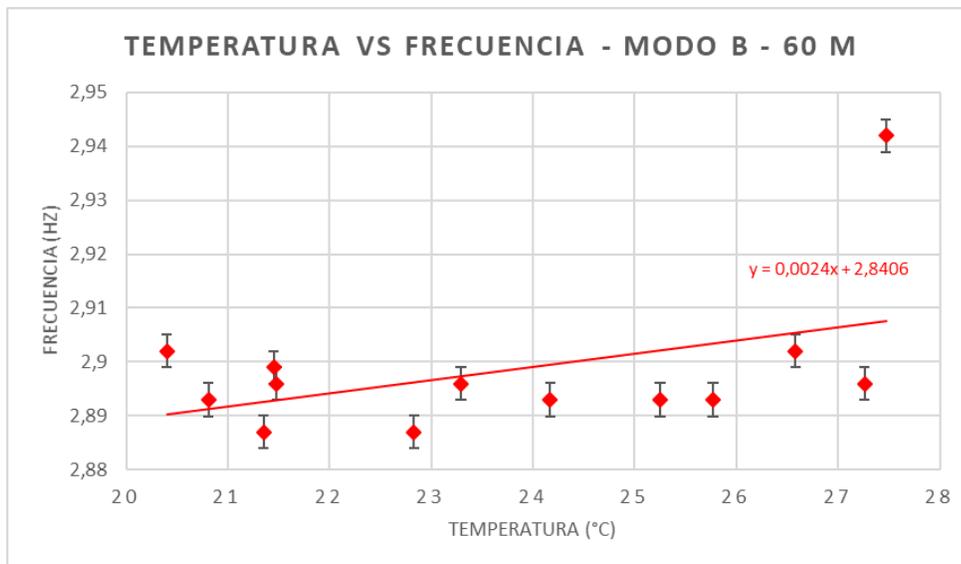


Figura 59: Temperatura vs frecuencia – Modo B – 60 metros. Elaboración propia.

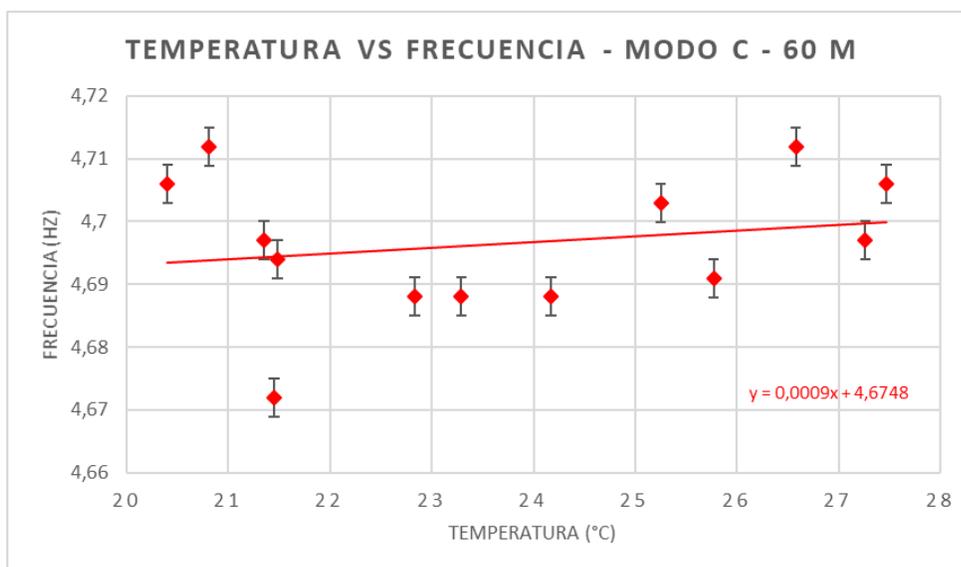


Figura 60: Temperatura vs frecuencia – Modo C – 60 metros. Elaboración propia.

4.3.3. Evolución de modos de vibrar medidos a 40 metros:

La siguiente tabla muestra los valores de las frecuencias (Hz) obtenidas en el sitio de medición a 40m bajo las temperaturas (°C) indicadas.

Frecuencias (Hz)					
Medición	Temperatura	Modos			
		Modo A	Modo B	Modo C	Modo D
MED-40-01.38	21,21	1,453	2,878		
MED-40-02.26	20,91	1,453	2,899		5,038
MED-40-03.49	21,65	1,453	2,899	4,672	
MED-40-04.56	20,82	1,447	2,905	4,681	5,042
MED-40-06.04	20,46	1,443	2,893	4,681	5,072
MED-40-07.07	23,10	1,447	2,890	4,691	5,084
MED-40-08.06	23,58	1,443	2,899	4,684	5,063
MED-40-09.03	25,85	1,447	2,890	4,678	5,048
MED-40-10.02	27,35	1,453	2,890	4,684	5,051
MED-40-11.07	27,28	1,447	2,899	4,657	5,029
MED-40-12.05	27,52	1,425	2,893	4,688	5,048
MED-40-13.13	25,67	1,443	2,893	4,730	5,042
MED-40-14.01	24,13	1,453	2,893	4,718	5,078

Figura 61: Registro de frecuencias medidos a los 40 metros. Frecuencias dadas en Hz y temperaturas en °C. Elaboración propia.

A continuación, tenemos el registro de las frecuencias obtenidas a 40m, junto a la variación de la temperatura ambiental para cada hora de medición

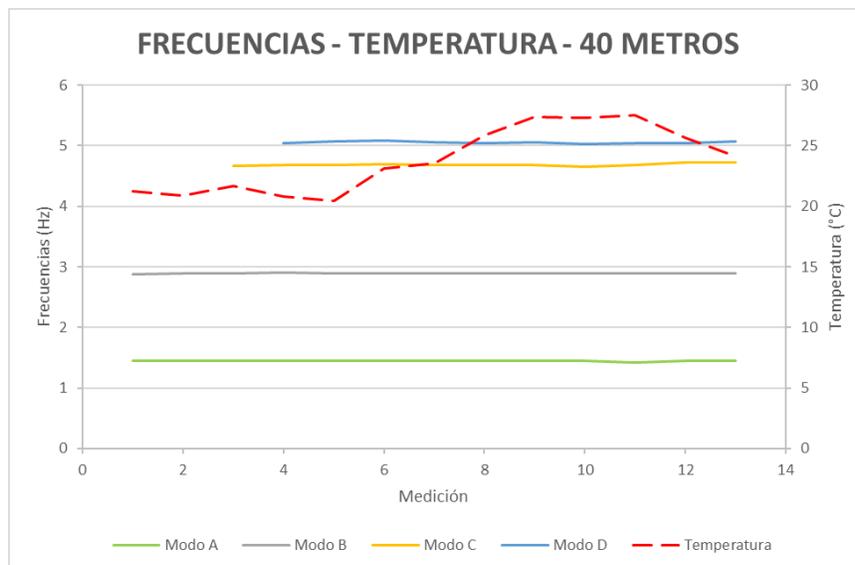


Figura 62: Frecuencias – Temperaturas – 40 metros. Elaboración propia.

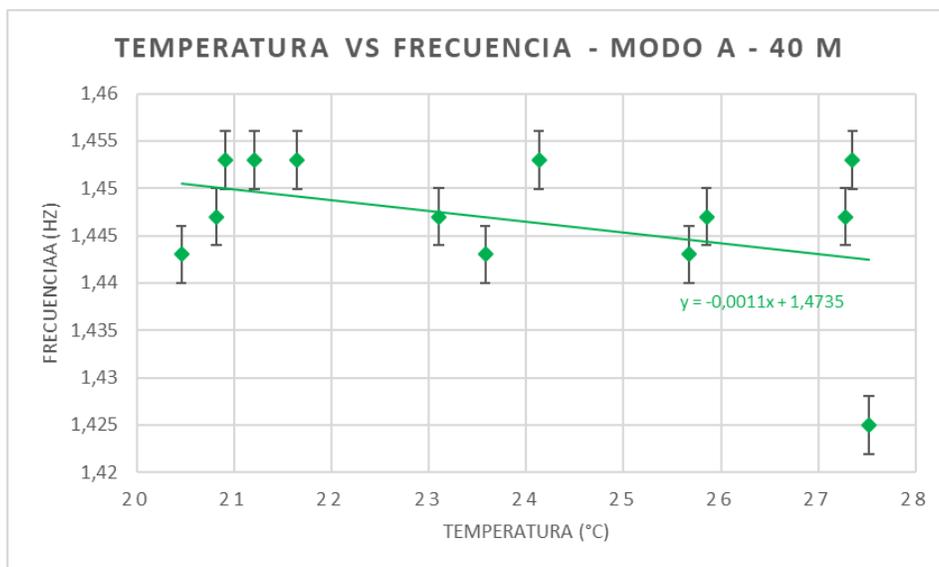


Figura 63: Temperatura vs frecuencia – Modo A – 40 metros. Elaboración propia.

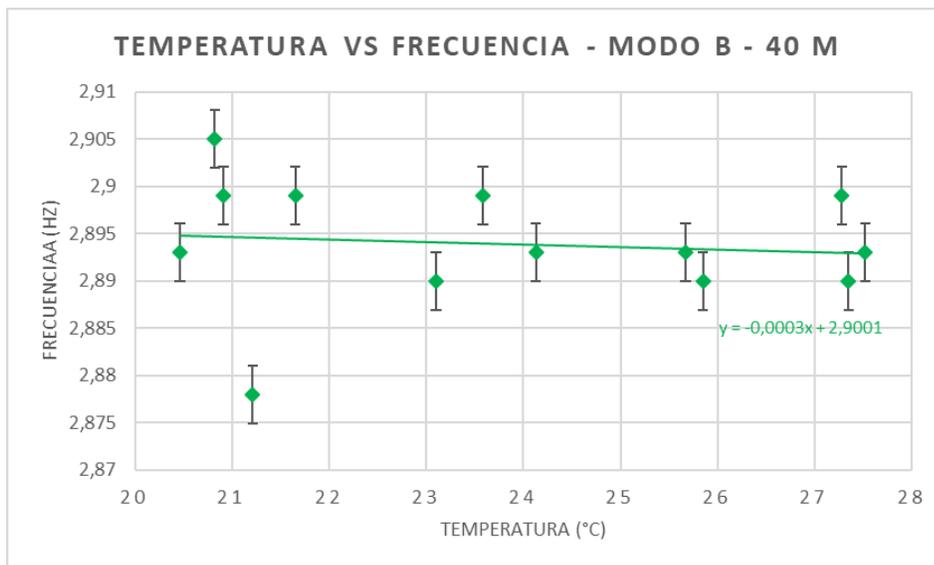


Figura 64: Temperatura vs frecuencia – Modo b – 40 metros. Elaboración propia.

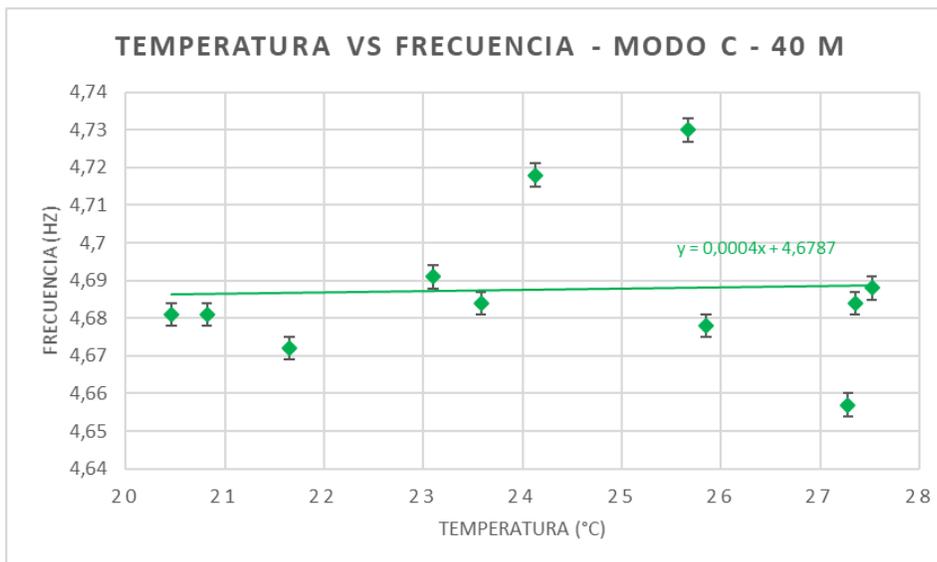


Figura 65: Temperatura vs frecuencia – Modo C – 40 metros. Elaboración propia.

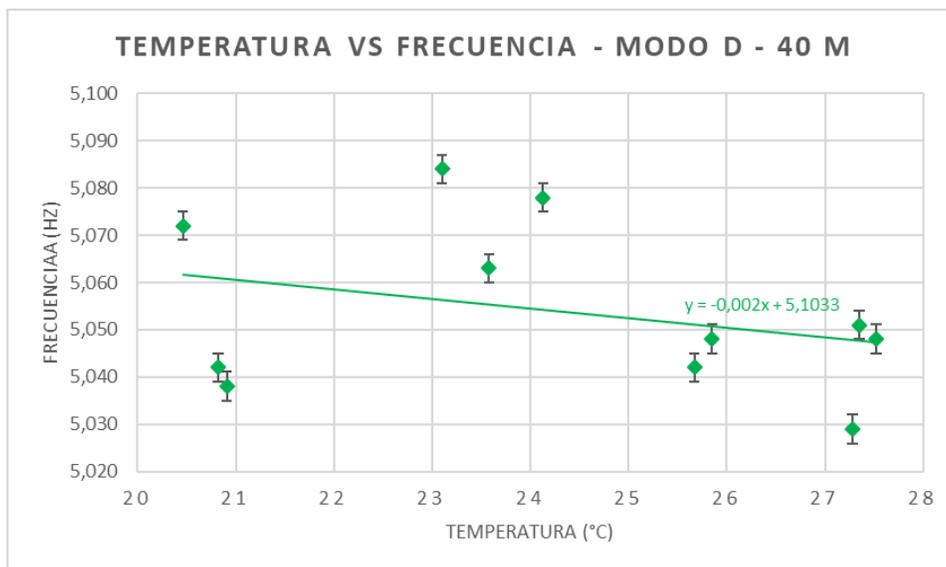


Figura 66: Temperatura vs frecuencia – Modo D – 40 metros. Elaboración propia.

4.4. Tasas de variación de frecuencia

A continuación, se muestran gráficas donde se colocaron las mediciones de 80, 60 y 40 metros, con respecto a cada modo obtenido.

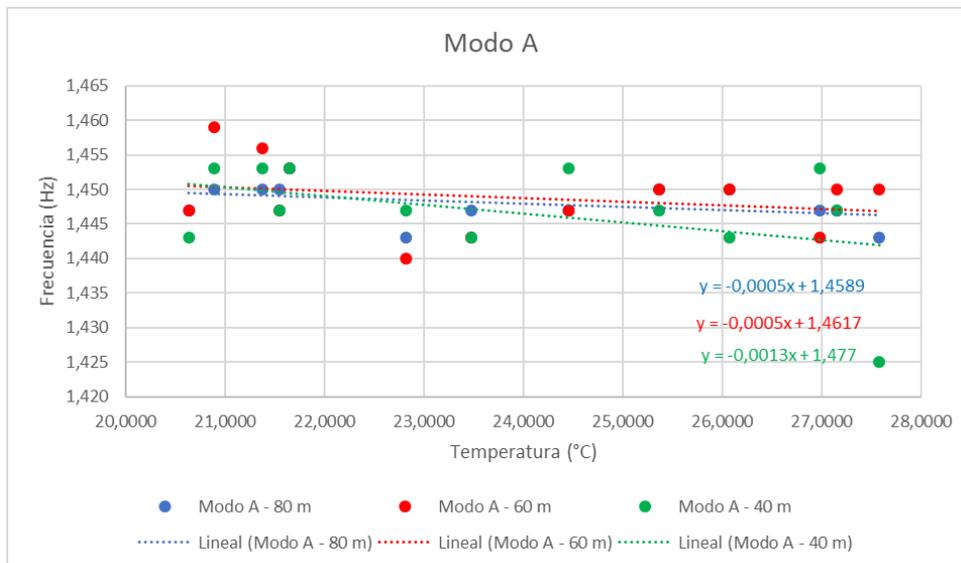


Figura 67: Temperatura vs frecuencia – Modo A. Elaboración propia.

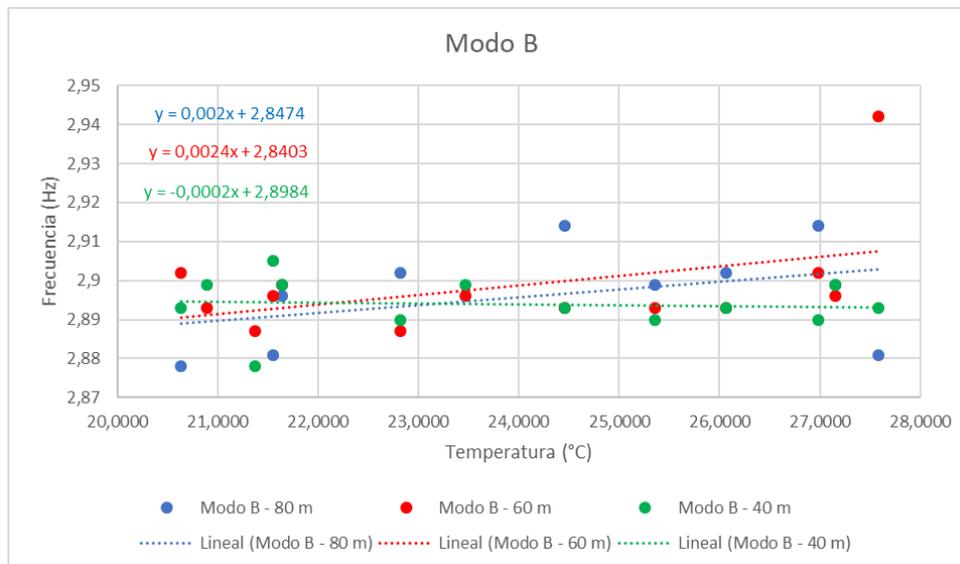


Figura 68: Temperatura vs frecuencia – Modo B. Elaboración propia.

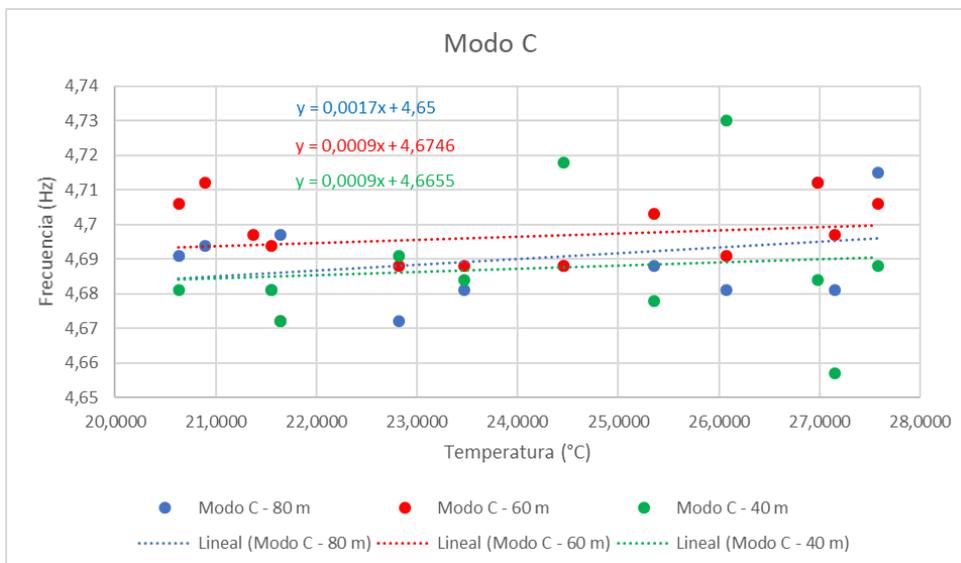


Figura 69: Temperatura vs frecuencia – Modo C. Elaboración propia.

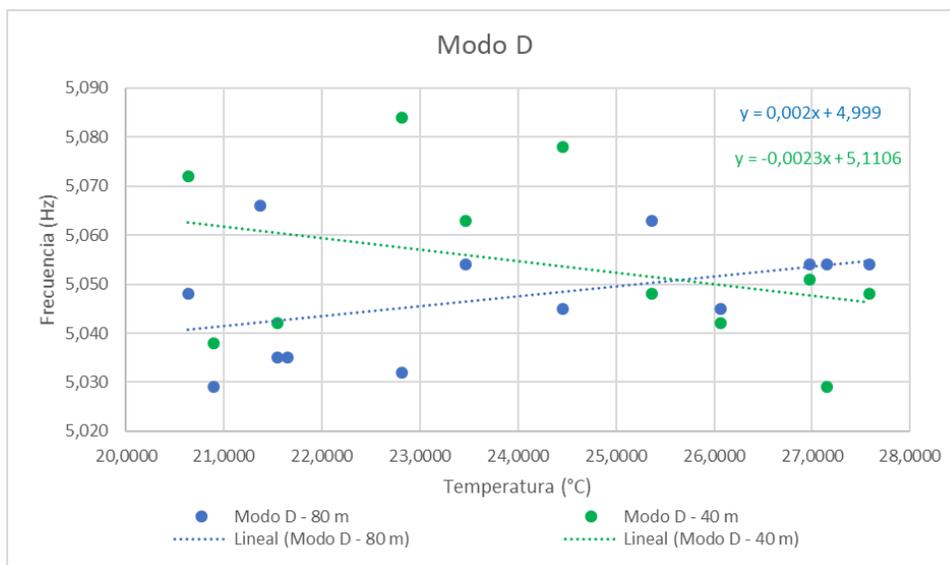


Figura 70: Temperatura vs frecuencia – Modo A. Elaboración propia.

En la medición de 60 metros, no se obtuvieron datos en el modo D, por lo cual el grafico anterior tiene solamente dos tendencias.

Tomando un promedio de las tres mediciones tomadas se realizó la siguiente tabla, donde se presenta la frecuencia mínima de cada modo medido en 80, 60 y 40 metros, la tasa de variación promedio; el diferencial máximo de la temperatura durante el día de medición; la variación promedio en frecuencia obtenida multiplicando la tasa de variación y el diferencial máximo de temperatura; y por último, el porcentaje de variación promedio obtenido en todo el día de medición.

Modo	Frecuencia mínima (Hz)	Tasa de variación (Hz/°C)	Diferencial máximo (°C)	Variación en frecuencia (Hz)	% de variación
Modo A	1,425	-0,0767%	7,060	-0,0054	-0,380%
Modo B	2,878	0,1533%	7,060	0,0108	0,376%
Modo C	4,657	0,1167%	7,060	0,0082	0,177%
Modo D	5,029	-0,2150%	7,060	-0,0152	-0,302%

Figura 71: Tabla del % de variación de frecuencias promedio respecto a la temperatura.

Elaboración propia.

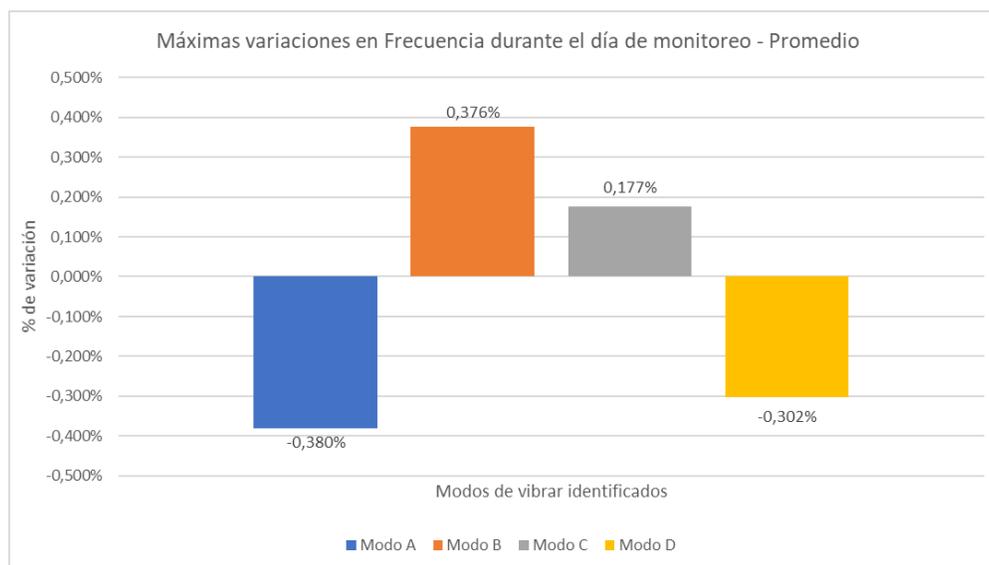


Figura 72: Máximas variaciones en frecuencia promedio durante el día de monitoreo.

Elaboración propia.

4.5. Discusiones

A partir de los resultados, se presentan a continuación algunos puntos de discusión:

Las condiciones de contorno de este puente, la cuales son masivas (contrapesos) debido a los requerimientos constructivos por la tipología de este puente, pueden restringir la libertad de dilatación del puente ante cambios de la temperatura ambiental, lo cual podría estar ocasionando que, en lugar de dilatarse libremente, la deformación térmica más bien esté provocando esfuerzos adicionales de tipo compresivos en el puente.

Esfuerzos compresivos en la estructura, podrían favorecer a la rigidización del puente, lo cual sería opuesto a la interpretación de que el efecto térmico dilata la estructura y la flexibiliza por el incremento de su longitud.

Los resultados de este estudio no muestran uniformidad en tendencias de flexibilización o rigidización de la estructura, ya que el modo A y D muestran tendencias a flexibilización, y los modos B y C a rigidización.

Generalmente en los puentes, el primer modo de vibrar reúne niveles de participación alta de masa, y definen con mejor claridad el comportamiento dinámico de la estructura. Los siguientes modos podrían considerarse como un reacomodo de dicho comportamiento e involucran menos masa participativa. Desde ese punto de vista, se podría adoptar el criterio que este puente presenta una flexibilización producto de la influencia del incremento de la temperatura ambiental.

Aunque en este estudio los análisis se están realizando considerando la temperatura ambiental y no la temperatura de la estructura, si se tiene certeza que cambios en la temperatura ambiental repercutirán en la temperatura de la misma. Por lo tanto, tómesese este

estudio de investigación como evidencia que el comportamiento dinámico de un puente puede variar durante el día debido a agentes externos como lo es la temperatura, y que estas variaciones deben ser consideradas al analizar campañas de monitoreo sobre el puente.

5. Conclusiones

- Se analizó de manera exitosa la influencia del cambio de temperatura para conocer el comportamiento dinámico del Puente sobre el Río Virilla en la Ruta Nacional 27 del país.
- Se realizaron mediciones de aceleraciones en el puente producidas por el paso de vehículos, con la ayuda de un solo sensor a lo largo de un día, desde horas de la madrugada hasta el atardecer.
- Se lograron obtener temperaturas desde los 20,40 °C hasta los 27,75 durante las doce horas de medición, siendo temperaturas ambientales que entran en el promedio de la zona durante los últimos catorces años.
- Se construyeron espectros de aceleración de Fourier, donde se compararon las frecuencias obtenidas a distintos valores de temperatura ambiental.
- El modo de vibración A, tuvo una tasa de variación promedio en frecuencia de -0,0767% (Hz/°C); por consiguiente, un porcentaje de variación de -0,380% durante el día del monitoreo.
- El modo de vibración B, tuvo una tasa de variación promedio en frecuencia de 0,1533% (Hz/°C); por consiguiente, un porcentaje de variación de 0,376% durante el día del monitoreo.
- El modo de vibración C, tuvo una tasa de variación promedio en frecuencia de 0,1167% (Hz/°C); por consiguiente, un porcentaje de variación de 0.177% durante el día del monitoreo.
- El modo de vibración D, tuvo una tasa de variación promedio en frecuencia de -0,215% (Hz/°C); por consiguiente, un porcentaje de variación de -0.302% durante el día del monitoreo.
- A pesar que los resultados de este estudio no muestran uniformidad en tendencias de flexibilización o rigidización de la estructura, ya que el modo A y D muestran

tendencias a flexibilización, y los modos B y C a rigidización, se adopta el criterio que este puente presenta una flexibilización producto de la influencia del incremento de la temperatura ambiental.

- Cambios en la temperatura ambiental repercutirán en la temperatura del puente, por lo que debe tomarse este estudio de investigación como evidencia que el comportamiento dinámico del puente puede variar durante el día debido a cambios de temperatura en la estructura provocados por cambios en la temperatura ambiental, y que estas variaciones deben ser consideradas al analizar campañas de monitoreo sobre el puente.

6. Recomendaciones

- Se recomienda tomar mediciones en el puente durante más días, donde la temperatura sea más variada.
- Se recomienda aumentar los puntos de discretización de la transformada de Fournier para tener más precisión en los datos y que el error sea menor.
- Se recomienda realizar esta misma investigación en un puente de concreto (reforzado o presforzado) de un solo claro y con condiciones de contorno simples, que permitan una investigación similar en esta tipología estructural muy común en Costa Rica.

7. Referencias bibliográficas

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. (2018). MONITOREO DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL BASADO EN VIBRACIONES AMBIENTALES SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO VIRILLA RUTA NACIONAL No. 27. 78.
https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1433/LM_PIE_UP_M03_2018_Informe_Monitoreo_Puente_Virilla_R27.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rodríguez, M^a Fernanda. (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 grado no publicada]. Universidad Latina de Costa Rica.

Secretaría de comunicaciones y transportes; y del Instituto Mexicano del transporte. (2012).

Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras. 107.
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt349.pdf>

Revista UIS Ingenierías en la Universidad Industrial de Santander Bucaramanga en Colombia. 2010. **Pruebas de Vibración Ambiental en Puentes.** 15.
<https://www.redalyc.org/pdf/5537/553756877004.pdf>

Real Academia Española.2001. aceleración. Diccionario de la lengua española (2001). <https://www.rae.es/drae2001/aceleraci%C3%B3n>.

Real Academia Española.2022. Frecuencia. Diccionario de la lengua española.
<https://dle.rae.es/frecuencia>

McCormac, Jack C. y Brown, Russell H. (2017). Diseño de concreto reforzado (10^a ed.). Alfaomega.

Tecnológico de Costa Rica, ebridge y conavi. Inventario de puentes en rutas nacionales de Costa Rica 2014-2018.
https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/informe_final_inventario_y_evaluacion_puentes_-_2014-2018.pdf

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. (2022, 03 de enero). ¿Qué es el Lanamme UCR? Lanamme Universidad de Costa.
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/lanammeucr>.

Pérez Porto, Julián y Gardey, Ana. (2015). Definición de vibración. Real academia española. <https://definicion.de/vibracion/>

Real academia española (2021). Tiempo. Real academia española.
<https://dle.rae.es/tiempo>

Real academia española (2021). Frecuencia. Real academia española.
<https://dle.rae.es/frecuencia>

García, Álvaro E.; Garrido, Fátima H.; Gallardo, José M. Estudio del período de vibración de puentes con vigas de acero en Panamá. Revista de I+D Tecnológico, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá. 16(02).
<http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/339/3391488002/3391488002.pdf>.

e-struc. (2017, 28 de febrero). Ideas básicas sobre el comportamiento dinámico de las estructuras I. e-struc.com. <https://e-struc.com/2017/02/28/ideas-basicas-comportamiento-dinamico-las-estructuras-i/#:~:text=Cuando%20las%20acciones%20tienen%20una,lo%20mismo%20que%20las%20acciones.>

Real academia española (2021). Temperatura. Real academia española. <https://dle.rae.es/temperatura>

Umiri Flores, David. (2019, 27 de abril). Colocación del concreto bajo temperatura extremas: Temperaturas altas. Blog de la construcción. [https://www.yura.com.pe/blog/colocacion-del-concreto-bajo-temperaturas-extremas-temperaturas-altas/.](https://www.yura.com.pe/blog/colocacion-del-concreto-bajo-temperaturas-extremas-temperaturas-altas/)

Morales, Roberto F. (2013). Deformaciones de las estructuras. Revista de la Universidad de Mendoza. 14(02). <https://www.um.edu.ar/ojs2019/index.php/RUM/article/view/107>

Montalto Bolaños, Eduardo José. (2016). Prueba de vibración ambiental de puente tipo viga cajón de concreto presforzado. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/view/25421/30372#:~:text=Se%20identificaron%20nueve%20modos%20de,uno%20fue%20de%20flexi%C3%B3n%20transversal.>

Martínez, Marcos. (2021, 05 de diciembre). ¿Qué es la transformada de Fourier y para qué sirve? <https://www.nobbot.com/educacion/que-es-la-transformada-de-fourier-y-para-que-sirve/>

Anexos



Figura 73: Sensor utilizado en el puente. Elaboración propia

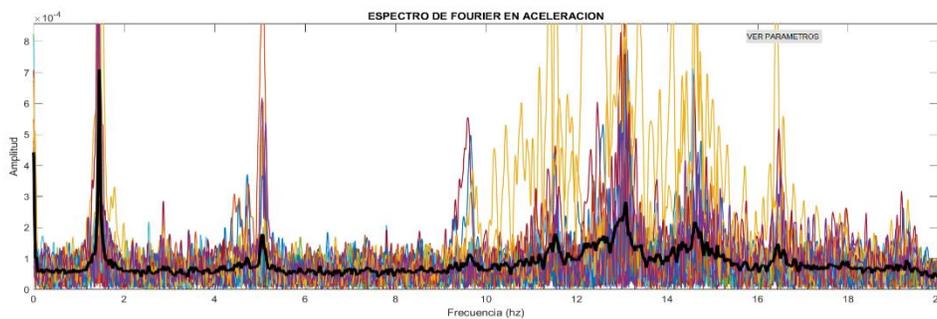


Figura 74: Espectro de Fourier a las 01:11 a los 80 metros. Elaboración propia.

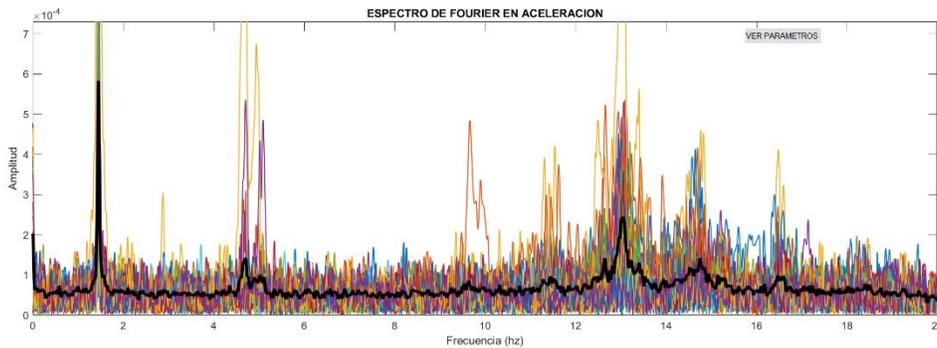


Figura 75: Espectro de Fourier a las 02:01 a los 80 metros. Elaboración propia.

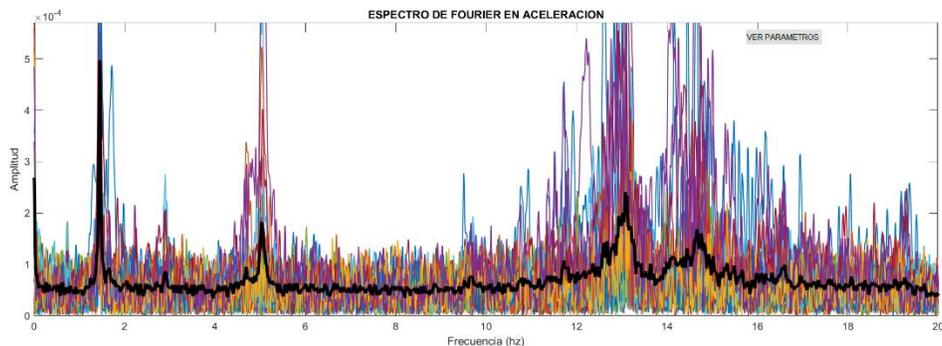


Figura 76: Espectro de Fourier a las 03:22 a los 80 metros. Elaboración propia.

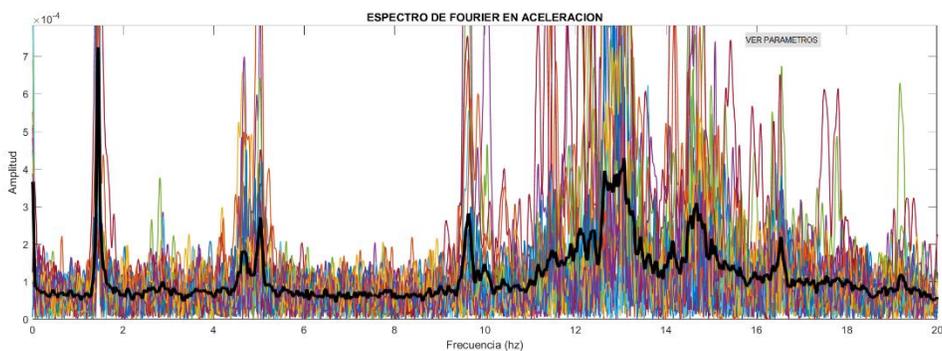


Figura 77: Espectro de Fourier a las 04:35 a los 80 metros. Elaboración propia.

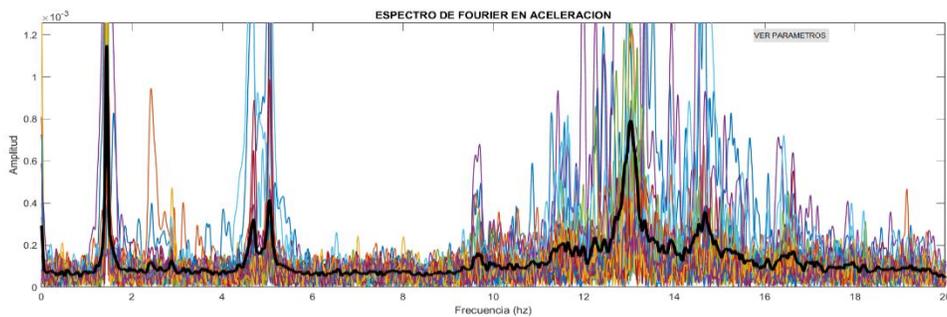


Figura 78: Espectro de Fourier a las 05:46 a los 80 metros. Elaboración propia.

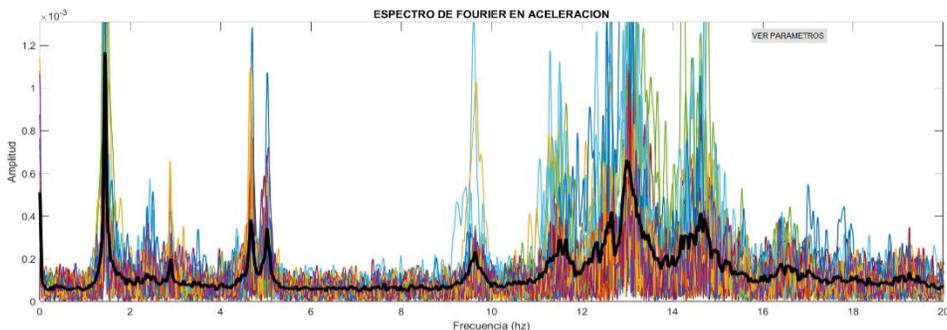


Figura 79: Espectro de Fourier a las 06:48 a los 80 metros. Elaboración propia.

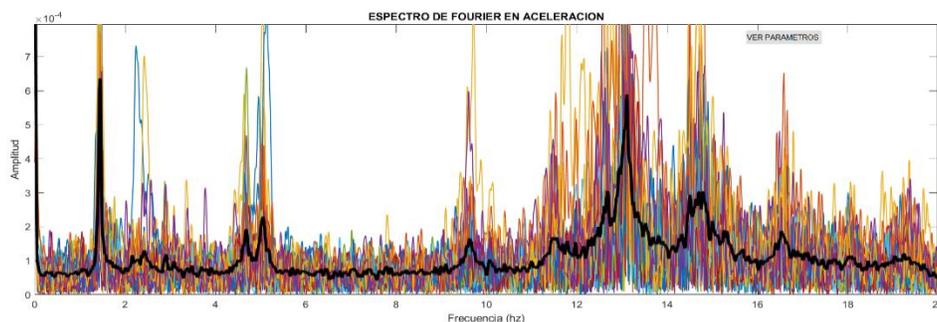


Figura 80: Espectro de Fourier a las 07:44 a los 80 metros. Elaboración propia.

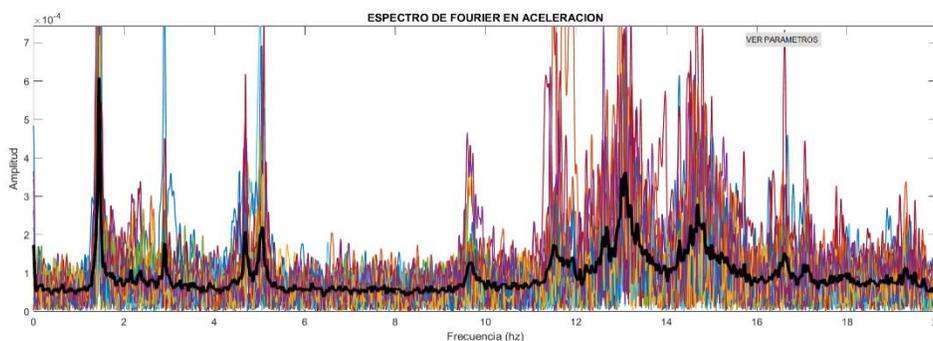


Figura 81: Espectro de Fourier a las 08:44 a los 80 metros. Elaboración propia.

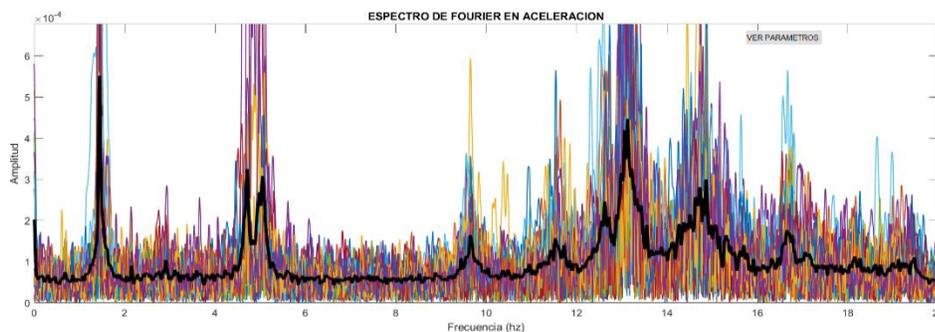


Figura 82: Espectro de Fourier a las 09:43 a los 80 metros. Elaboración propia.

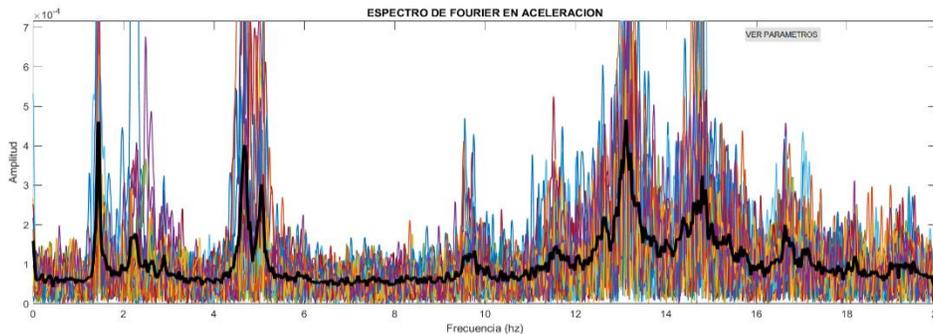


Figura 83: Espectro de Fourier a las 10:47 a los 80 metros. Elaboración propia.

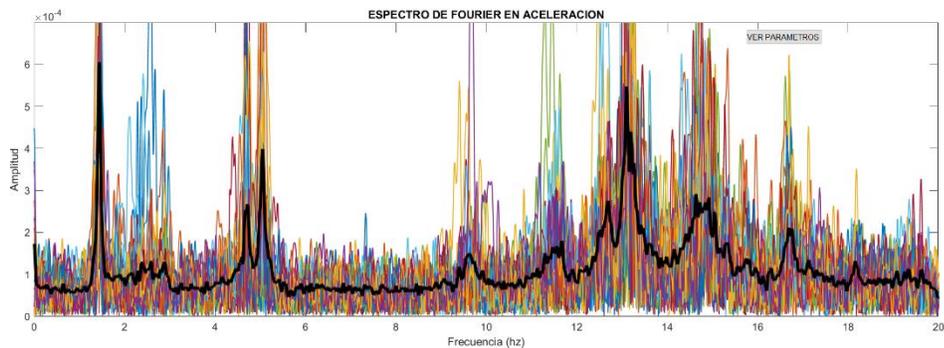


Figura 84: Espectro de Fourier a las 11:52 a los 80 metros. Elaboración propia.

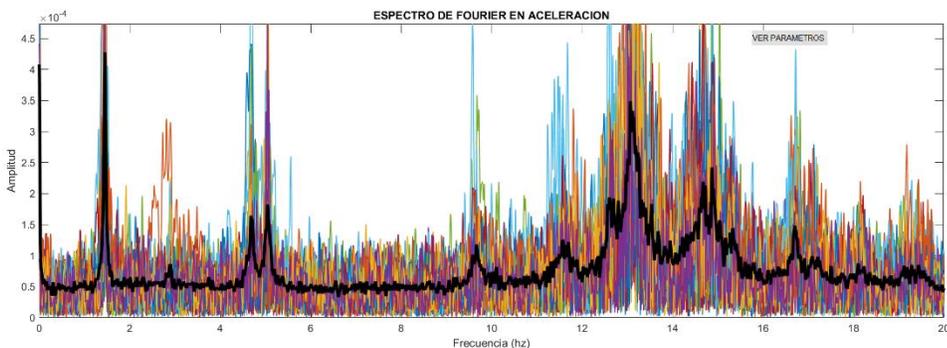


Figura 85: Espectro de Fourier a las 12:48 a los 80 metros. Elaboración propia.

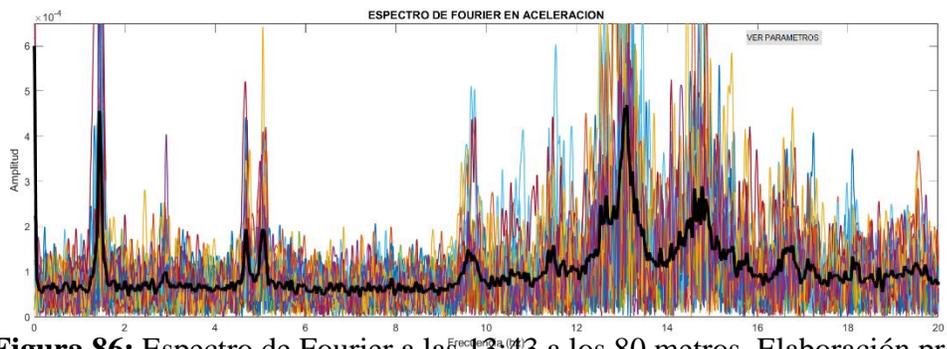


Figura 86: Espectro de Fourier a las 13:43 a los 80 metros. Elaboración propia.

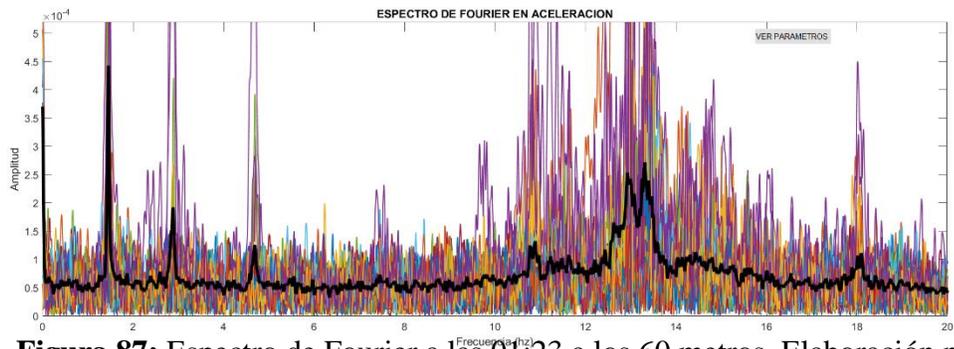


Figura 87: Espectro de Fourier a las 01:23 a los 60 metros. Elaboración propia.

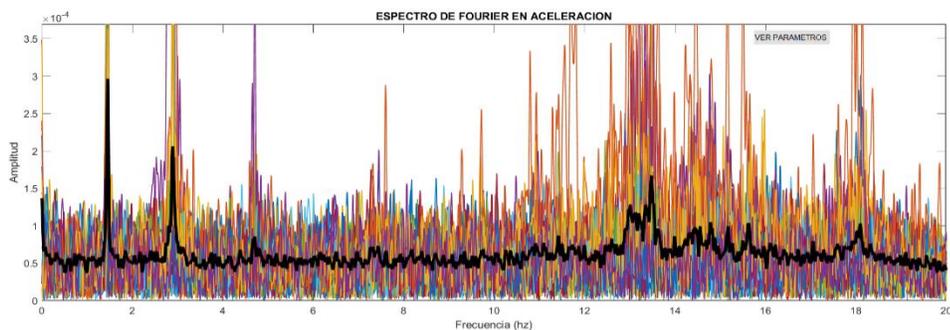


Figura 88: Espectro de Fourier a las 02:13 a los 60 metros. Elaboración propia.

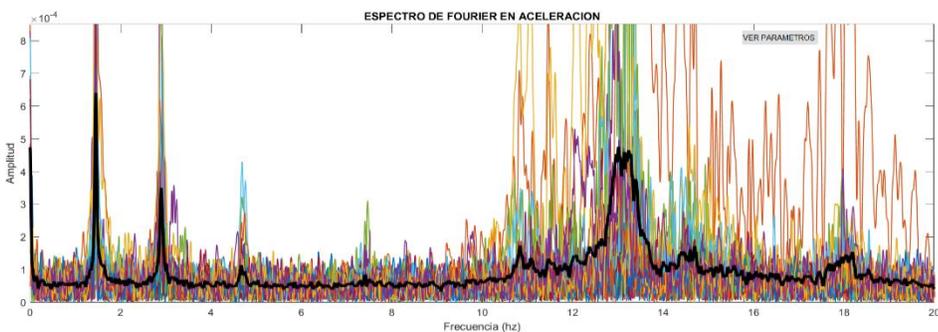


Figura 89: Espectro de Fourier a las 03:35 a los 60 metros. Elaboración propia.

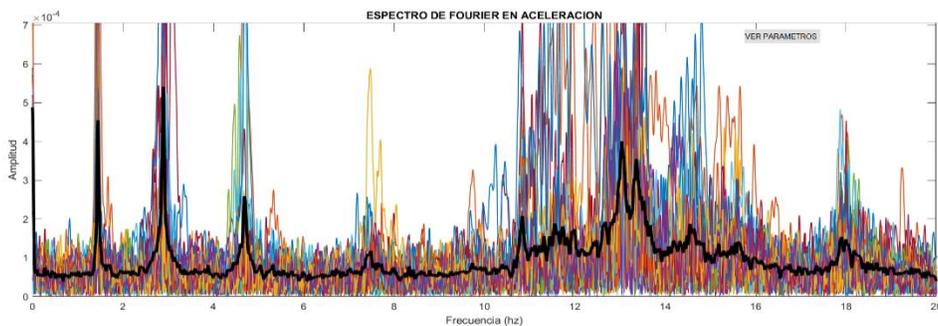


Figura 90: Espectro de Fourier a las 04:44 a los 60 metros. Elaboración propia.

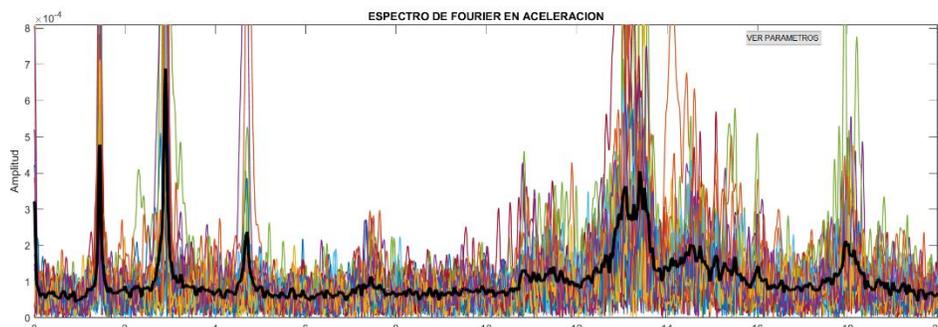


Figura 91: Espectro de Fourier a las 05:55 a los 60 metros. Elaboración propia.

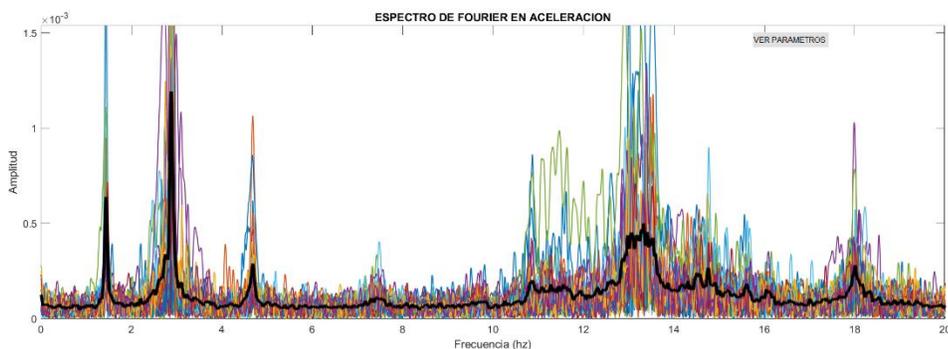


Figura 92: Espectro de Fourier a las 06:58 a los 60 metros. Elaboración propia.

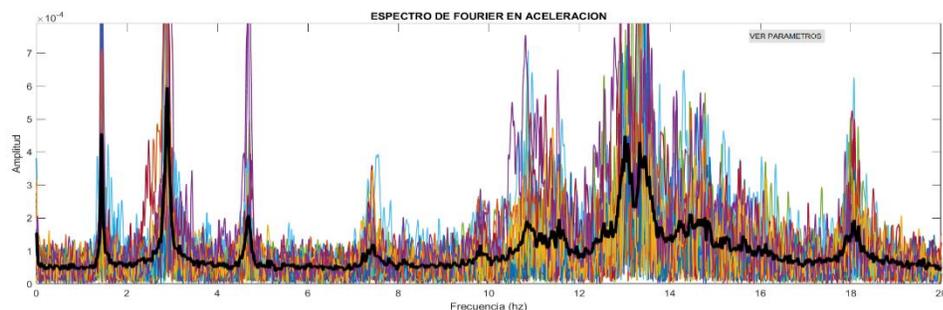


Figura 93: Espectro de Fourier a las 07:53 a los 60 metros. Elaboración propia.

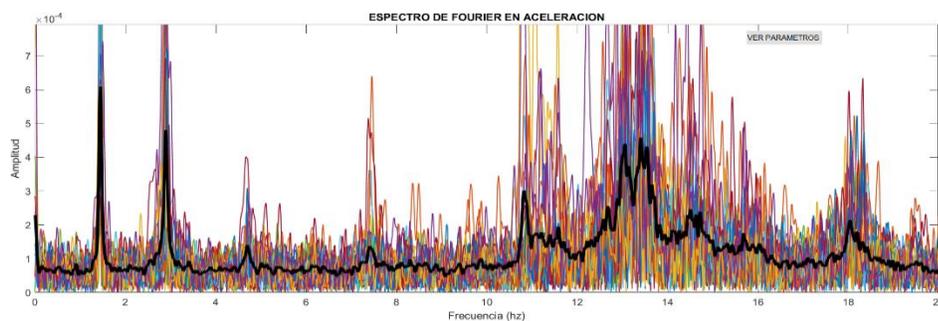


Figura 94: Espectro de Fourier a las 08:55 a los 60 metros. Elaboración propia.

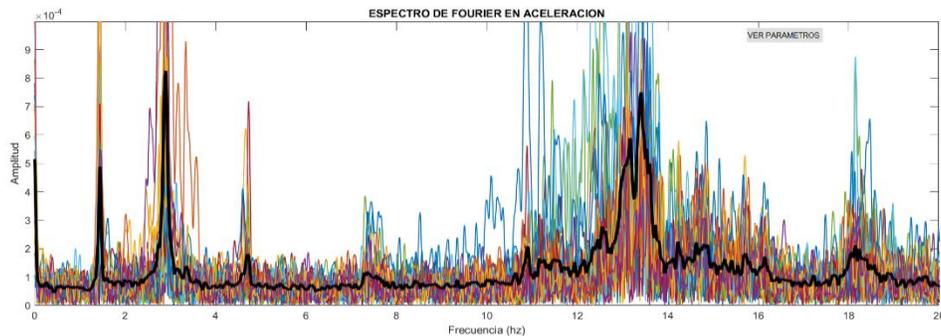


Figura 95: Espectro de Fourier a las 09:54 a los 60 metros. Elaboración propia.

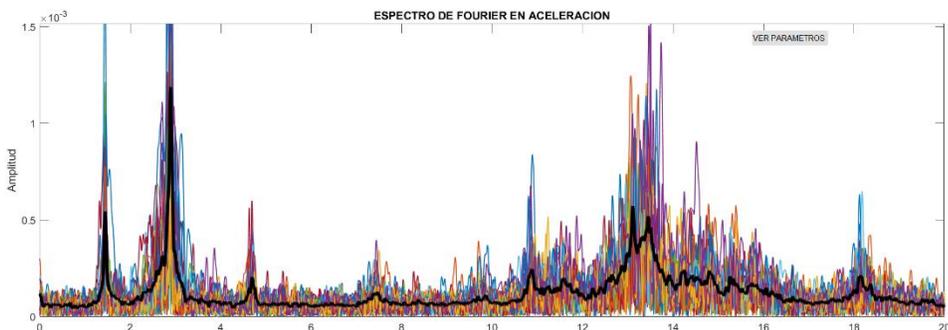


Figura 96: Espectro de Fourier a las 10:57 a los 60 metros. Elaboración propia.

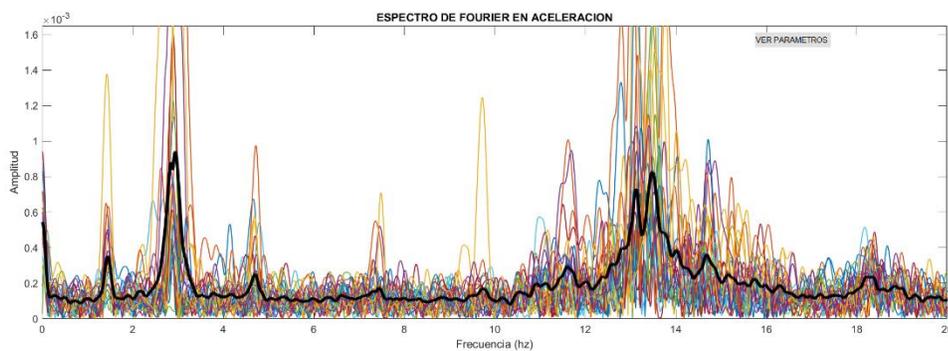


Figura 97: Espectro de Fourier a las 12:01 a los 60 metros. Elaboración propia.

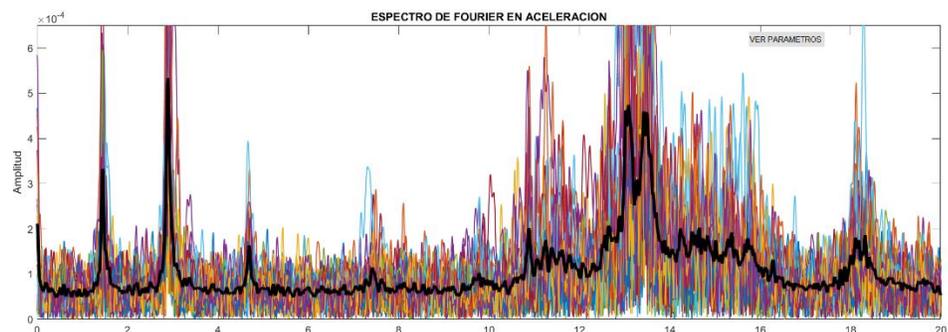


Figura 98: Espectro de Fourier a las 13:04 a los 60 metros. Elaboración propia.

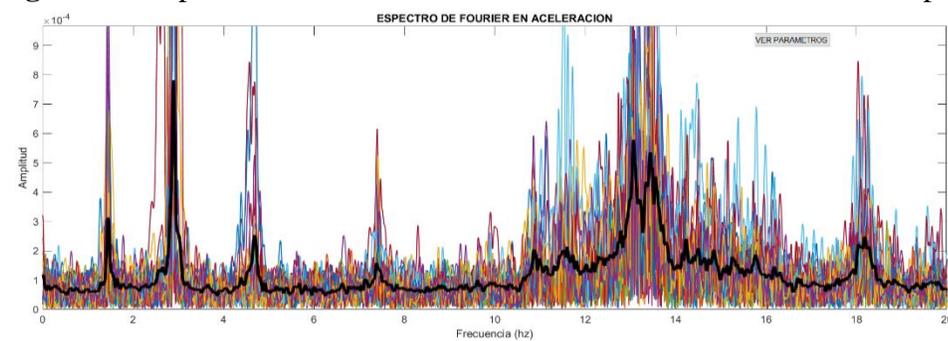


Figura 99: Espectro de Fourier a las 13:52 a los 60 metros. Elaboración propia.

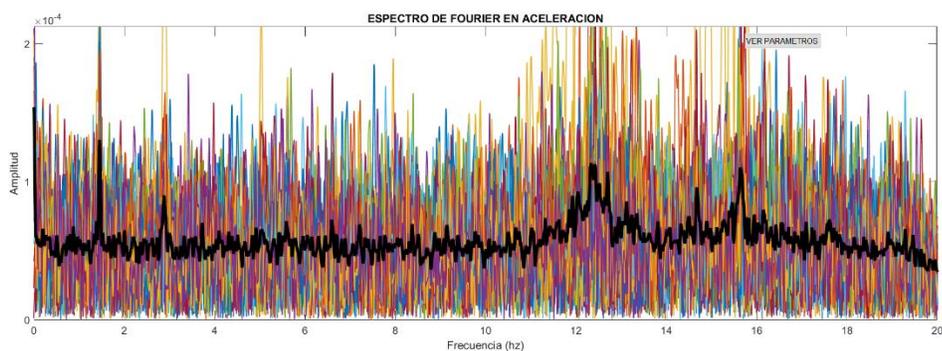


Figura 100: Espectro de Fourier a las 01:38 a los 40 metros. Elaboración propia.

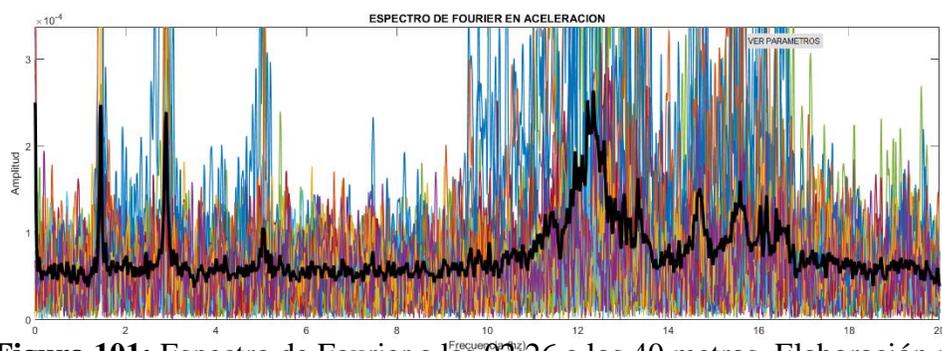


Figura 101: Espectro de Fourier a las 02:26 a los 40 metros. Elaboración propia.

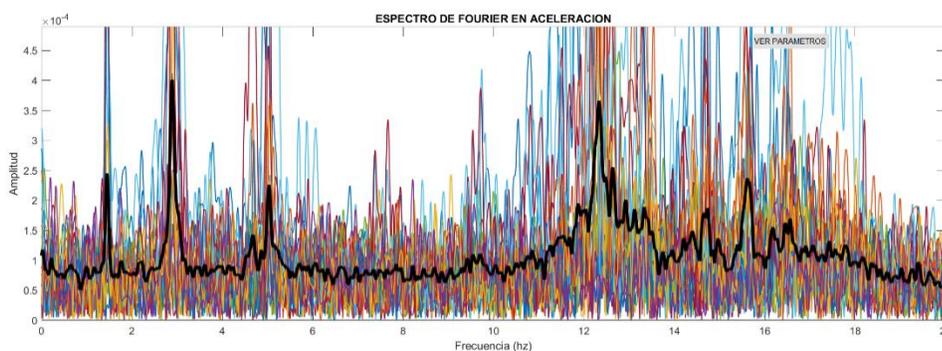


Figura 102: Espectro de Fourier a las 03:44 a los 40 metros. Elaboración propia.

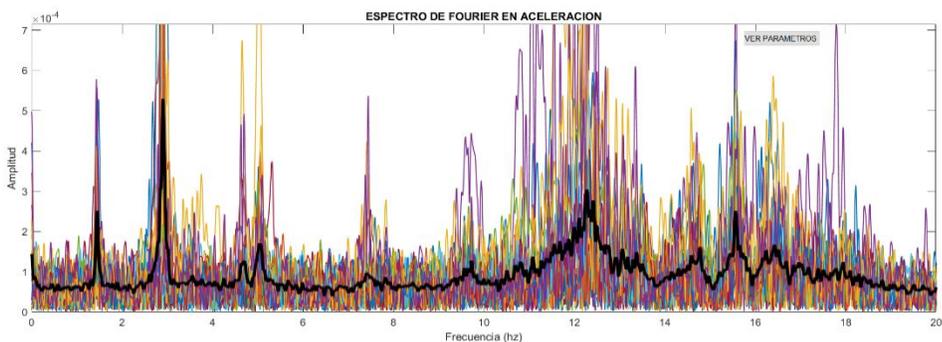


Figura 103: Espectro de Fourier a las 04:56 a los 40 metros. Elaboración propia.

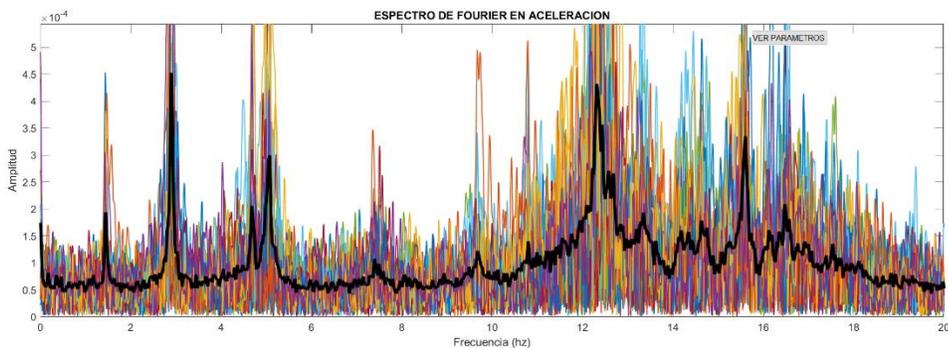


Figura 104: Espectro de Fourier a las 06:04 a los 40 metros. Elaboración propia.

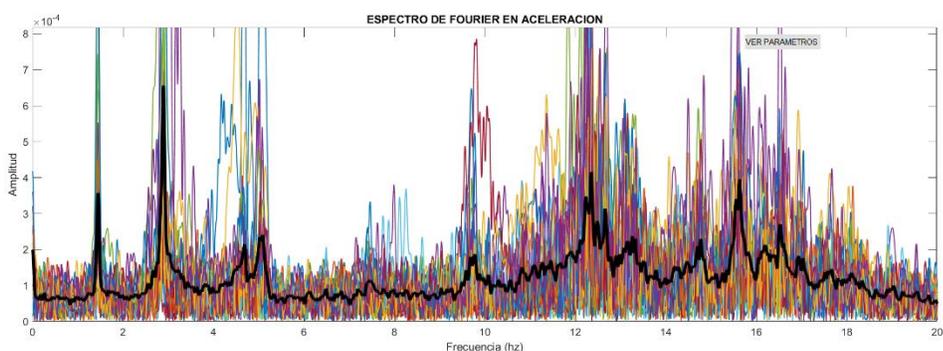


Figura 105: Espectro de Fourier a las 07:07 a los 40 metros. Elaboración propia.

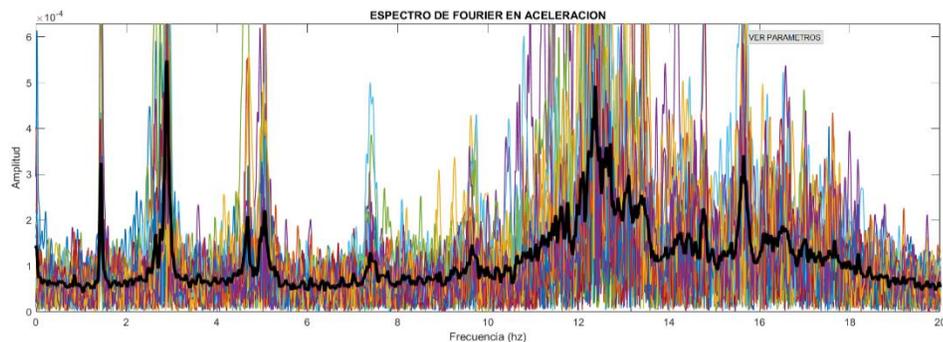


Figura 106: Espectro de Fourier a las 08:06 a los 40 metros. Elaboración propia.

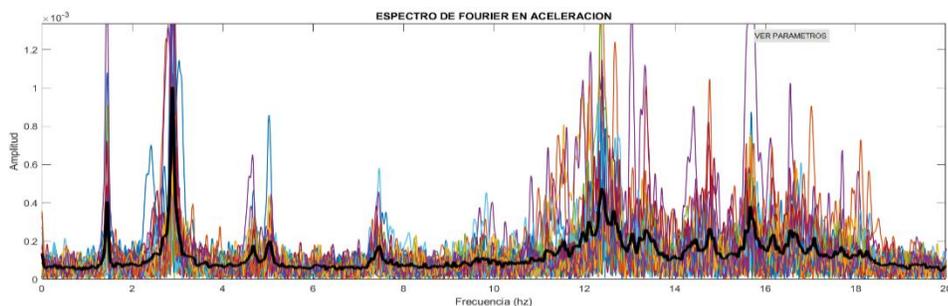


Figura 107: Espectro de Fourier a las 09:03 a los 40 metros. Elaboración propia.

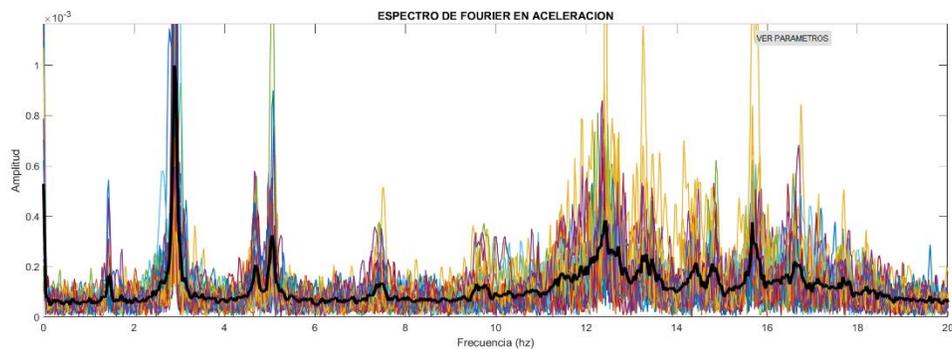


Figura 108: Espectro de Fourier a las 10:02 a los 40 metros. Elaboración propia.

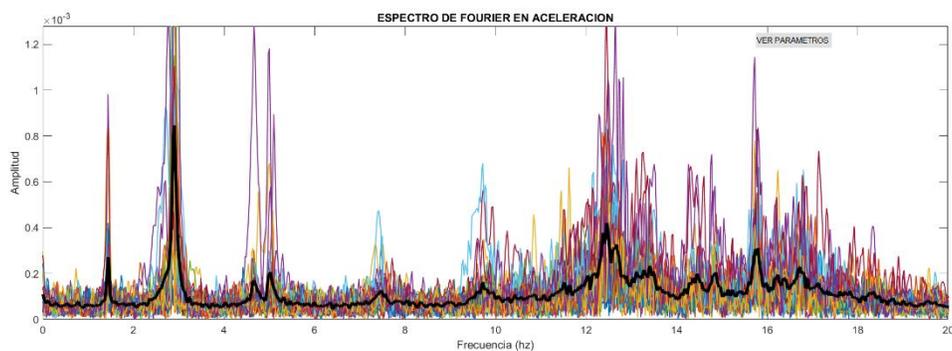


Figura 109: Espectro de Fourier a las 11:07 a los 40 metros. Elaboración propia.

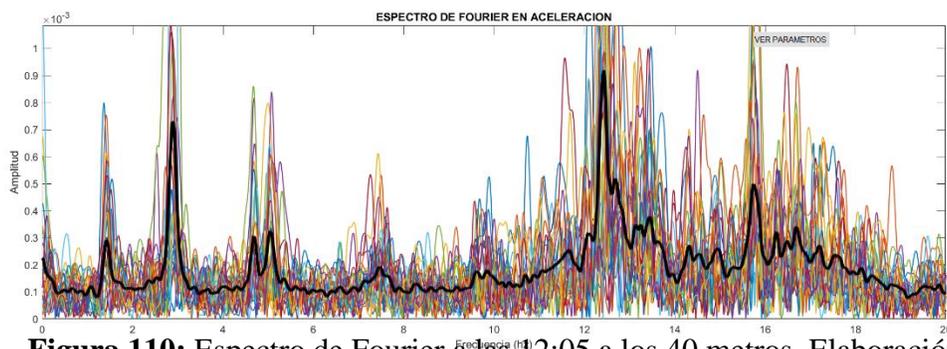


Figura 110: Espectro de Fourier a las 12:05 a los 40 metros. Elaboración propia

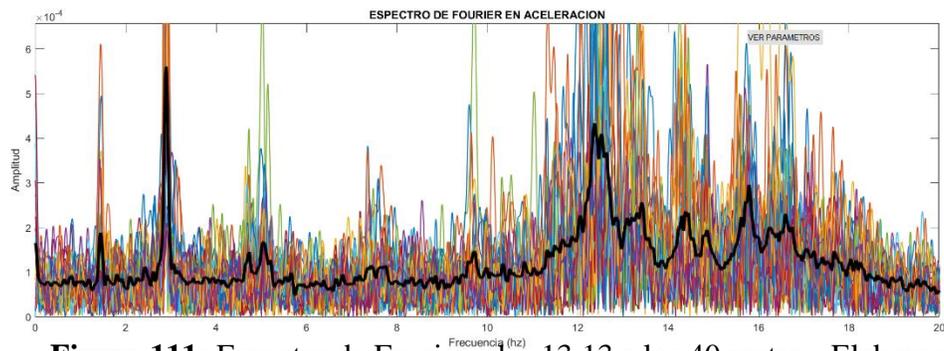


Figura 111: Espectro de Fourier a las 13:13 a los 40 metros. Elaboración propia.

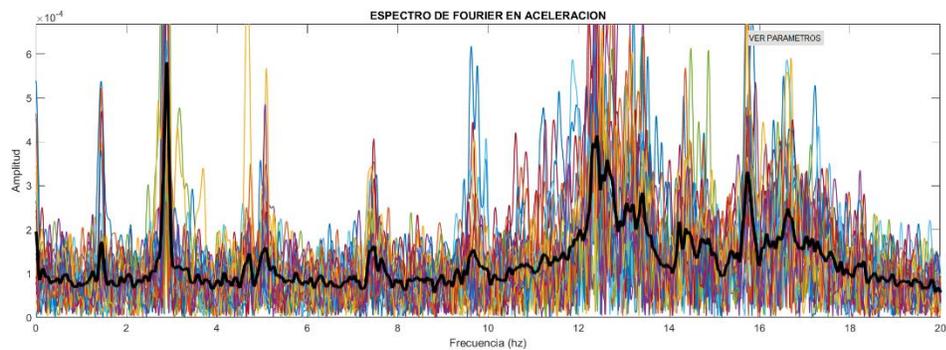


Figura 112: Espectro de Fourier a las 14:01 a los 40 metros. Elaboración propia.



Figura 113: Recolección de datos. Elaboración propia.



Figura 114: Recolección de datos. Elaboración propia.