

EFFECTOS DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS VERTICALES DE ESTRUCTURAS CIVILES EN LA INTERACCIÓN HUMANO-ESTRUCTURA PASIVA



Presentado por:

Autor: Lizeth Viviana Calderón Ortiz

Director: Peter Thomson, Ph.D.

CO-Director: Bryan Castillo Torres, Ph.D.

Trabajo de grado para optar por el Título de
Ingeniera Civil



Ingenierías Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G7)

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Universidad del Valle

Febrero 2025

FICHA DEL PROYECTO

TÍTULO: Efectos de las propiedades dinámicas verticales de estructuras civiles en la Interacción Humano-Estructura pasiva.

FACULTAD: Facultad de Ingeniería.

PROGRAMA ACADÉMICO: Ingeniería Civil.

ESTUDIANTE: Lizeth Viviana Calderón Ortiz.

DIRECTOR: Peter Thomson, PhD.

CODIRECTOR: Bryan Castillo, PhD.

GRUPO DE INVESTIGACIÓN: Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7).

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Interacción Humano-Estructura, Dinámica Estructural.

PALABRAS CLAVE: Interacción Humano-Estructura, Vibraciones, Serviciabilidad.

DURACIÓN: 12 meses.

FUENTE DE FINANCIACIÓN: Universidad del Valle, proyecto titulado "simulaciones híbridas en tiempo real: una alternativa confiable, rápida y económica para la evaluación de estructuras resilientes" con C.I. 21115 de la Universidad del Valle.

NOTA DE APROBACIÓN:

CARLOS ALBERTO MADERA. Ph.D.

Director del Programa Académico de Ingeniería Civil

DIANA CAROLINA MILLÁN, Ph.D.

Jurado

ALBERT RICARDO ORTIZ LASPRILLA, Ph.D

Jurado

PETER THOMSON, Ph.D

Director del trabajo de grado

BRYAN CASTILLO, Ph.D

Codirector del trabajo de grado

Santiago de Cali, Febrero 2025

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y enseñanzas que me han guiado a lo largo de esta etapa tan importante de mi vida. Gracias por creer en mí y por ser mi mayor inspiración.

A mi hermana, por su compañía y por estar siempre a mi lado en los momentos más importantes. Gracias por ser mi cómplice y mi mayor fuente de confianza.

A mis abuelos, por sus sabios consejos, su cariño y por ser un ejemplo de fortaleza y dedicación que siempre me ha motivado a seguir adelante.

A mis amigos Juan José, Jonatan, Mónica y a todos los compañeros que hice en el transcurso de mi carrera, por su apoyo, por las risas compartidas, por estar siempre presentes y hacer que todo este proceso fuera más memorable y alentador.

A mi director de investigación Peter Thomson, por todo el apoyo, tiempo, paciencia y su orientación que hicieron posible la finalización de este proyecto.

A mi codirector de tesis, Bryan Castillo, por su guía excepcional, su compromiso constante y su paciencia a lo largo de este proceso. Su apoyo y conocimientos fueron esenciales para la culminación exitosa de este proyecto.

A todo el equipo humano que conforma el grupo de investigación en Ingenierías Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7) de la Universidad del Valle por contribuir a mi desarrollo personal, académico y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. INFORMACIÓN GENERAL	4
4. PROBLEMA	5
4.1. Descripción	5
4.2. Formulación:	7
4.3. Objetivos:	7
4.4. Justificación:	7
5. MARCO DE REFERENCIA	10
5.1. Antecedentes	10
5.2. Estado del Arte:	15
5.2.1. IHE pasiva	15
5.2.2. Plantillas de presión	17
5.2.3. Simulación Híbrida en Tiempo Real	18
5.3. Modelos dinámicos	19
5.3.1. Estructura vacía (sistema 1 GDL)	19
5.3.2. Estructura con ocupante modelado como 1GDL (Sistema 2GDL)	20
5.3.3. Estructura con ocupante modelado como 2GDL (Sistema 3GDL)	22
5.3.4. Estructura con ocupante modelado como masa impuesta (Sis- tema 1GDL)	24
5.3.5. Ocupante como 1 GDL	25
5.3.6. Ocupante como 2 GDL	26
5.4. Ecuación de FIT	27
5.5. Razón de amortiguamiento (ζ)	28

	Page
5.6. Frecuencia natural (Fn)	28
5.7. Subestructuración y Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR)	29
6. MARCO METODOLÓGICO	31
6.1. Estructura de ensayos	31
6.2. Instrumentación	32
6.2.1. Martillo de impacto instrumentado	32
6.2.2. Acelerómetros	33
6.2.3. Sistema de adquisición de datos	33
6.2.4. Plantillas de presión	33
6.3. Metodología	34
6.3.1. Estructura vacía	35
6.3.2. Campaña experimental 1: Sujetos de prueba	35
6.3.3. Campaña experimental 2: Masas inertes	36
6.3.4. Análisis y procesamiento de datos	37
6.3.5. Modelos numéricos	38
6.3.6. Modelo de retroalimentación en Simulink	39
6.3.7. Implementación en SHTR	41
7. RESULTADOS	43
7.1. Datos antropométricos	44
7.2. Plantillas de presión	45
7.3. Propiedades dinámicas y modelos numéricos de estructuras vacías	48
7.4. Configuración 1 de la estructura de ensayos	50
7.4.1. Propiedades dinámicas experimentales	50
7.4.2. Modelos numéricos	51
7.5. Configuración 2 de la estructura de ensayos	53
7.5.1. Propiedades dinámicas experimentales	53
7.5.2. Modelos numéricos	54
7.6. Configuración 3 de la estructura de ensayos	56

	Page
7.6.1. Propiedades dinámicas experimentales	56
7.6.2. Modelos numéricos	57
7.7. Sistema con retroalimentación	59
7.8. Implementación en SHTR	63
8. CONCLUSIONES	65
9. PERSPECTIVAS	68
10. BIBLIOGRAFÍA	70
11. ANEXOS	76
11.1. Modelos numéricos	76
11.1.1. Sujeto 1	76
11.1.2. Sujeto 2	78
11.1.3. Sujeto 3	80
11.1.4. Sujeto 4	82
11.1.5. Sujeto 5	84
11.1.6. Sujeto 6	86
11.1.7. Sujeto 4	88
11.2. Delay	90

1. RESUMEN

El presente trabajo de grado investiga cómo la variación de las propiedades dinámicas verticales de estructuras civiles influye en la Interacción Humano-Estructura en estado pasivo. Tradicionalmente, el análisis de la interacción se ha enfocado en efectos derivados de actividades como caminar o saltar; sin embargo, este estudio se centra en el impacto que genera la mera presencia estática de ocupantes, quienes al actuar como sistemas masa-resorte-amortiguador modifican parámetros esenciales como la rigidez, el amortiguamiento y la frecuencia natural de la estructura.

La investigación se fundamenta en una exhaustiva revisión bibliográfica y en el análisis de normativas vigentes (por ejemplo, NSR-10), que en muchos casos no contemplan de forma precisa la influencia de la ocupación humana pasiva. Para abordar esta brecha, se realizaron dos campañas experimentales: una con sujetos en estado pasivo y otra utilizando masas inertes, permitiendo comparar y validar las diferencias en la respuesta estructural. Además, se desarrollaron modelos numéricos en espacio de estados y se implementó una simulación híbrida en tiempo real (SHTR) mediante Simulink, lo que facilitó la evaluación precisa de la dinámica del sistema acoplado.

Los resultados obtenidos aportan información clave para el diseño y análisis de infraestructuras modernas, al sugerir criterios más exactos que consideren la influencia de la ocupación pasiva, mejorando así la seguridad, estabilidad y confort de las estructuras civiles.

PALABRAS CLAVE: Interacción Humano-Estructura pasiva, Vibraciones, Serviciabilidad, Dinámica estructural.

2. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería civil, el diseño y análisis estructural han evolucionado significativamente debido a la incorporación de materiales avanzados y metodologías innovadoras. Sin embargo, el desarrollo de infraestructuras más esbeltas y ligeras ha incrementado su susceptibilidad a las vibraciones inducidas por diversas cargas dinámicas, incluidas aquellas de origen humano (Živanović et al. (2005a); Gómez et al. (s.f.)). La Interacción Humano-Estructura (IHE) ha surgido como un factor clave en la evaluación del comportamiento estructural, influenciando la seguridad, estabilidad y serviciabilidad de edificaciones, puentes, tribunas y demás estructuras civiles.

Las normativas actuales, como el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (2010), establecen criterios generales para mitigar los efectos vibratorios, recomendando que las frecuencias naturales de las estructuras superen los 5 Hz para minimizar el impacto de cargas humanas. No obstante, este enfoque resulta insuficiente para abordar la complejidad de estructuras modernas, especialmente aquellas diseñadas con materiales de alta resistencia y geometrías optimizadas, donde la actividad humana puede generar efectos dinámicos inesperados.

El estudio de la IHE ha estado históricamente enfocado en la interacción activa, es decir, el impacto de actividades como caminar, correr o saltar sobre la respuesta estructural. Sin embargo, existe una brecha significativa en la literatura respecto a la IHE pasiva, aquella que ocurre cuando los ocupantes permanecen en reposo o en posturas estáticas sobre la estructura. En estas condiciones, el cuerpo humano actúa como un sistema dinámico que no solo añade masa al sistema estructural, sino que también modifica parámetros fundamentales como la rigidez, el amortiguamiento y, por consiguiente, la frecuencia natural de la estructura. Modelar la presencia humana simplemente como una carga estática no es suficiente para predecir con precisión el comportamiento de estos sistemas acoplados.

Investigaciones recientes han demostrado que los modelos biomecánicos detallados permiten representar de manera más precisa la influencia humana en la respuesta

estructural, mejorando la predicción del comportamiento vibratorio de estructuras ocupadas. Estudios como los de Van Nimmen, Pavic, y Van den Broeck (2021) y Shahabpoor et al. (2017) han demostrado que la representación del cuerpo humano como un sistema masa-resorte-amortiguador es esencial para capturar la complejidad de esta interacción.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar los efectos de la variación de las propiedades dinámicas verticales de una estructura civil bajo 3 diferentes configuraciones en la Interacción Humano-Estructura pasiva. Para ello, se llevaron a cabo dos campañas experimentales: la primera evaluó las propiedades dinámicas de una estructura de referencia con ocupantes en estado pasivo, mientras que la segunda utilizó masas inertes equivalentes para analizar las diferencias en la respuesta estructural. Adicionalmente, se desarrollaron modelos numéricos en espacio de estados y se desarrolló un modelo en Simulink para evaluar su efecto en la simulación híbrida en tiempo real (SHTR) lo que permitió evaluar con precisión la influencia de la ocupación humana en la dinámica estructural.

Los resultados de esta investigación contribuirán al desarrollo de criterios más precisos para el diseño y análisis de infraestructuras modernas, promoviendo la seguridad y estabilidad de estructuras civiles frente a efectos vibratorios inducidos por la presencia humana.

3. INFORMACIÓN GENERAL

Investigador principal: Lizeth Viviana Calderón Ortiz. Tutores: Peter Thomson, PhD; Bryan Castillo Torres, PhD. Responsable activo: Peter Thomson, PhD. Grupo de Investigación: Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural G-7. Línea de Investigación: Interacción Humano-Estructura y Dinámica Estructural. Unidad académica: Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle.

4. PROBLEMA

4.1 Descripción

En los últimos años, los requisitos para la construcción de estructuras civiles han evolucionado significativamente. Se han desarrollado infraestructuras más ligeras y esbeltas mediante el uso de materiales avanzados como aceros de alta resistencia, aluminio y polímeros reforzados. Aunque estas innovaciones han reducido costos y mejorado la eficiencia estructural, también han aumentado la sensibilidad de las estructuras a vibraciones generadas por cargas sísmicas, eólicas y antrópicas (Gómez et al., s.f.; Živanović et al., 2005b). Este fenómeno puede comprometer la estabilidad estructural y la comodidad de los usuarios, generando sensaciones de inseguridad e incluso, en casos extremos, daños estructurales (Živanović et al., 2005a).

Dentro de estas vibraciones, la Interacción Humano-Estructura (IHE) se ha convertido en un factor clave en el diseño estructural. Este fenómeno se presenta en dos formas principales: interacción activa, cuando los ocupantes generan fuerzas dinámicas al caminar, correr o saltar, e interacción pasiva, cuando los ocupantes permanecen en reposo sobre la estructura. Mientras que la interacción activa ha sido ampliamente estudiada, la interacción pasiva ha recibido menos atención a pesar de su impacto en la estabilidad estructural. En este contexto, el cuerpo humano actúa como un sistema dinámico compuesto por masa, resorte y amortiguador, lo que modifica las propiedades dinámicas de la estructura sin requerir actividad física del ocupante (Sachse et al., 2003). Modelar a los ocupantes como masas estáticas es una simplificación que puede generar errores en la estimación de las frecuencias naturales y amortiguamiento de la estructura (Pedersen, 2011; Ortiz et al., 2009).

Los efectos de la IHE pasiva son especialmente relevantes en infraestructuras ligeras, como puentes peatonales y tribunas, donde una ocupación elevada puede inducir vibraciones no previstas en el diseño (Ortiz et al., 2012). La falta de estudios específicos sobre esta interacción representa una brecha en el conocimiento actual, lo que dificulta la incorporación de estos efectos en modelos predictivos y normativas de diseño. Aun-

que algunos modelos como el de masa-resorte-amortiguador (Joint Working Group, 2005) han sido desarrollados para la interacción activa, su aplicación en condiciones pasivas es limitada.

El desconocimiento de estos efectos en el diseño estructural puede generar consecuencias significativas. Un ejemplo documentado es el Puente del Milenio en Londres, donde la sincronización involuntaria de los peatones provocó oscilaciones laterales inesperadas, requiriendo una inversión de aproximadamente 5 millones de libras esterlinas en amortiguadores adicionales para estabilizar la estructura (Dallard et al., 2001). De manera similar, estudios recientes han reportado que ciertas pasarelas y tribunas presentan vibraciones incómodas cuando la ocupación supera ciertos umbrales críticos, comprometiendo su seguridad y usabilidad (Van Nimmen, Reynders, et al., 2021).

Si bien varias normativas han integrado recomendaciones sobre vibraciones inducidas por peatones, muchas de ellas siguen sin considerar la IHE pasiva de manera explícita. En Colombia, la NSR-10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente) establece límites en las frecuencias naturales de las estructuras para mitigar efectos vibratorios, pero no incorpora criterios específicos sobre la interacción pasiva, lo que deja una brecha en la evaluación del confort y seguridad en infraestructuras ligeras. En Cali, por ejemplo, la mayoría de los puentes peatonales fueron diseñados bajo normativas anteriores como la NSR-98, que no contemplaban cargas dinámicas, resultando en construcciones altamente sensibles a vibraciones inducidas por ocupantes (Sánchez et al., 2013).

Dada la importancia de este fenómeno y la falta de metodologías de diseño adecuadas, esta investigación busca evaluar los efectos de la IHE pasiva mediante campañas experimentales y modelos numéricos. Los resultados obtenidos permiten mejorar la precisión de los modelos predictivos y contribuyen al desarrollo de criterios de diseño más robustos para la seguridad y estabilidad de infraestructuras modernas.

4.2 Formulación:

- ¿Cuáles son los efectos de la variación de las propiedades dinámicas verticales de una estructura civil en la Interacción Humano-Estructura pasiva?

4.3 Objetivos:

General

- Determinar los efectos de la variación de las propiedades dinámicas verticales de una estructura civil en la Interacción Humano-Estructura pasiva.

Específicos:

- Realizar una campaña experimental de sujetos de prueba en estado pasivo sobre estructuras con distintas propiedades dinámicas verticales variables.
- Realizar una campaña experimental de cargas sobre impuestas en estructuras con distintas propiedades dinámicas verticales variables.
- Construir un modelo numérico representativo de la estructura.
- Comparar resultados.

4.4 Justificación:

Numerosos estudios han demostrado que la presencia de ocupantes pasivos afecta significativamente las propiedades dinámicas de estructuras ligeras, como pasarelas peatonales, tribunas y pisos de edificios (Van Nimmen, Pavic, y Van den Broeck, 2021). La interacción entre el cuerpo humano y la estructura produce cambios en los parámetros dinámicos, como la rigidez, el amortiguamiento y las frecuencias naturales del sistema, lo cual es crítico en la evaluación de la serviciabilidad de las estructuras (Salyards y Noss, 2014; Tadeu et al., 2022). Esta interacción dinámica se debe a que los ocupantes funcionan como un sistema masa-resorte-amortiguador, lo cual modifica la respuesta vibratoria de las estructuras ocupadas en comparación con las vacías (Sachse et al., 2003).

La literatura reciente destaca que las personas, incluso en reposo, tienen un impacto significativo en las propiedades dinámicas de las estructuras, especialmente en aquellas ligeras y esbeltas. En un experimento realizado con vigas simplemente apoyadas, se observó que la presencia de ocupantes en estado estático redujo notablemente las frecuencias naturales del sistema, evidenciando una contribución significativa al comportamiento dinámico global (Han, 2018). De manera similar, investigaciones en escaleras ligeras han demostrado que las posturas pasivas de las personas afectan las respuestas vibratorias de la estructura, generando resultados inesperados en análisis dinámicos (Berardengo et al., 2019). Estos hallazgos subrayan la importancia de una mayor comprensión y representación del fenómeno de la Interacción Humano-Estructura pasiva en los modelos de diseño estructural. Estudios experimentales, como los realizados por Ortiz et al. (2012) y Ortiz et al. (2009) en tribunas y vigas, han demostrado que la presencia de ocupantes puede modificar las frecuencias naturales y el amortiguamiento de las estructuras, sugiriendo la necesidad de incorporar estos efectos en los criterios de diseño para mejorar la precisión en la predicción de vibraciones y garantizar la seguridad y el confort de los usuarios (Figura 3.2).



(a)



(b)

Figura 4.1. (a) Tribuna a escala como plataforma de pruebas (Ortiz et al. (2012)), (b) Viga de pruebas (Ortiz et al. (2009)).

En el contexto colombiano, las normativas estructurales como la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, 2010) no incorporan consideraciones explícitas sobre la Interacción Humano-Estructura pasiva, limitándose a exigir frecuencias naturales superiores a 5 Hz para estructuras civiles. Este criterio no

contempla los cambios dinámicos que introduce la ocupación humana, especialmente en infraestructuras ligeras donde la relación frecuencia-ocupación es más crítica. Este vacío normativo incrementa el riesgo de diseñar estructuras que, si bien cumplen con los criterios estáticos, fallan en aspectos dinámicos esenciales, comprometiendo la seguridad y el confort de los usuarios en condiciones reales (Ahmadi et al., 2018).

Desde una perspectiva práctica, abordar el fenómeno de la IHE pasiva tiene implicaciones directas en la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de las infraestructuras modernas. Las estructuras sensibles a las vibraciones pueden experimentar deterioro acelerado debido a cargas dinámicas no previstas, lo que incrementa los costos de mantenimiento y reparación. Por ejemplo, en pasarelas peatonales como el puente de Millennium en Londres, el desconocimiento de la interacción dinámica con peatones llevó a oscilaciones inesperadas que requirieron costosas intervenciones para estabilizar el sistema (Xiong et al., 2021).

Teóricamente, la investigación sobre la IHE pasiva representa un aporte significativo al campo de la dinámica estructural. El desarrollo de modelos que consideren las propiedades dinámicas humanas, como los sistemas masa-resorte-amortiguador (MCK), permiten una representación más precisa de la interacción entre ocupantes y estructuras. Estos modelos han demostrado ser efectivos para predecir el comportamiento de sistemas acoplados en condiciones de ocupación variable y podrían integrarse en simulaciones avanzadas para diseñar infraestructuras más resilientes (Han y Huang, 2021).

Se requieren más investigaciones experimentales que exploren la IHE en condiciones pasivas, considerando efectos posturales, niveles de vibración y tipos de estructuras. Estos resultados pueden respaldar el desarrollo de pautas de diseño y modelos computacionales más realistas y seguros (Goggins et al., 2021). Además, estos estudios permiten establecer límites aceptables de vibración que garanticen el bienestar y la comodidad de los (Huang et al., 2020). Como lo destacan Sachse et al. (2003), la IHE ha sido extensamente analizada en lo que respecta a actividades que involucran movimientos activos. No obstante, se observa una notable falta de investigaciones en profundidad que aborden el fenómeno de las actividades pasivas de las personas en relación con las estructuras. En esta investigación aborda un área importante de conocimiento que ha sido pasada por alto en el campo de la ingeniería estructural.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 Antecedentes

El estudio de la Interacción Humano-Estructura (IHE) ha sido abordado desde múltiples disciplinas, incluyendo la biomecánica, la dinámica estructural y la ingeniería civil. A lo largo de las últimas décadas, diversos investigadores han analizado el efecto de la presencia humana en la respuesta dinámica de estructuras ligeras, estableciendo modelos y criterios que han permitido evaluar el impacto de esta interacción.

Las primeras investigaciones sobre la influencia de las fuerzas humanas en estructuras datan de los años 70 y 80. Andriacchi et al. (1977) evaluaron parámetros temporales y de reacción de la fuerza en el suelo en un grupo de personas en condiciones normales y en pacientes con problemas en la articulación de la rodilla. Se encontró que la velocidad de paso influye en la reacción pie-suelo y que la frecuencia de la marcha sigue patrones definidos, lo que posteriormente permitió modelar la influencia de peatones sobre estructuras. Estudios como los de Grieve y Gear (1966), Murray et al. (1966), Lamoreux (1971) y Cavanagh y Gregor (1975) demostraron que el movimiento angular de las extremidades, la actividad muscular y las reacciones articulares dependen de la velocidad de marcha. Asimismo, Jacobs et al. (1972) reportaron cambios en el contenido de frecuencia del componente vertical de la reacción pie-suelo a diferentes velocidades de marcha. Estas investigaciones establecieron las bases para entender cómo las fuerzas generadas por el cuerpo humano afectan la dinámica estructural.

Resultados de estas investigaciones demostraron que los pacientes con problemas en la rodilla tenían tiempos de balanceo y de soporte menores que el promedio. Sin embargo, tras seis meses de recuperación, los patrones de marcha se normalizaron. En la Figura 4.1, se presentan las formas de onda que representan los tres componentes de la fuerza de reacción pie-suelo.

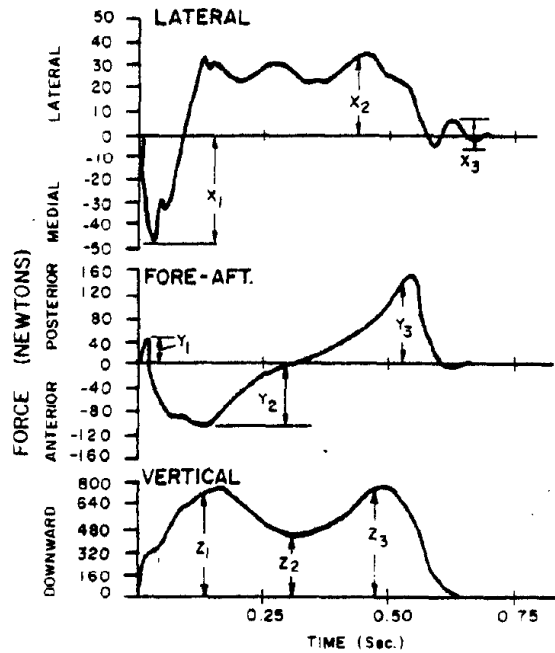


Figura 5.1. Formas de onda representativas de las tres componentes de la fuerza de reacción pie-suelo por Andriacchi et al. (1977).

En un estudio pionero, Matsumoto et al. (1972) analizaron la distribución de las frecuencias naturales de marcha en 505 personas, encontrando que estas siguen una distribución normal con una frecuencia promedio de 2.0 Hz y una desviación estándar de 0.173 Hz (Figura 4.2). Resultados similares fueron obtenidos por Kerr y Bishop (2001) con una frecuencia de 1.9 Hz en una muestra de 40 personas. Bachmann (1995) ampliaron estos estudios incluyendo actividades humanas como caminar, correr y saltar, estableciendo rangos de frecuencias típicos. Aramayo y Martel (s.f.) definieron valores de referencia para frecuencia, velocidad y longitud de paso (Tabla 4.1).

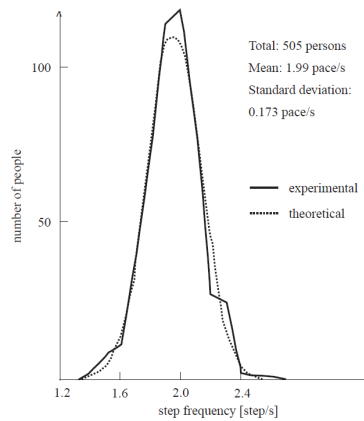


Figura 5.2. Formas de onda que representan los tres componentes de la fuerza de reacción pie-suelo.

	fs	vs	ls
	[Hz]	[m/s]	[m]
Slow walking	1.7	1	0.6
normal walking	2	1.5	0.75
fast walking	2.3	2.3	1
normal running	2.5	3.1	1.25
fast running	<3.2	5.5	1.75

Tabla 5.1. Frecuencias naturales típicas para distintas actividades humanas por Aramayo y Martel (s.f.).

En 1982, Wheeler (1982) estandarizó el análisis de las fuerzas humanas que causan excitación dinámica sobre pasarelas peatonales, determinando que la frecuencia de paso y la fuerza máxima dependen de la velocidad de desplazamiento. Estudios como los de Blanchard et al. (1977), Galbraith y Barton (1970) y Rainer et al. (1988) ampliaron esta línea al medir fuerzas individuales de paso, estableciendo que estas varían con las características antropométricas de las personas.

Sánchez et al. (2013) evaluaron 19 puentes peatonales en Cali, observando que aquellos con tramos más largos presentan frecuencias naturales más bajas, lo que incrementa el riesgo de vibraciones dentro del rango de resonancia humana. En la Figura 4.3 se muestra la relación entre la longitud de la pasarela y su frecuencia natural. A pesar de que los puentes cumplen con la normativa NSR-10, persisten problemas de vibración

que afectan la seguridad de los peatones.

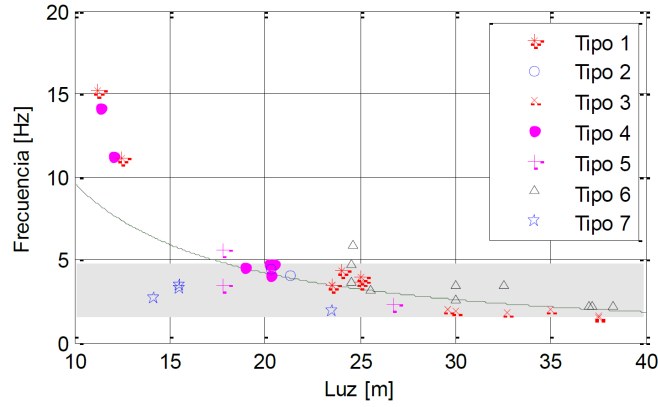


Figura 5.3. Luz vs frecuencia natural vertical por tipo de puente (Sánchez et al., 2013).

Un estudio análogo realizado por Castellanos-Toro et al. (2018) utilizó el método de Análisis Modal Operacional (OMA) en 451 estructuras, aplicando técnicas de identificación modal como SSI y NeXT-ERA. Se estableció una correlación entre las frecuencias y la longitud de los puentes, así como el material predominante en la estructura (Figura 4.4).

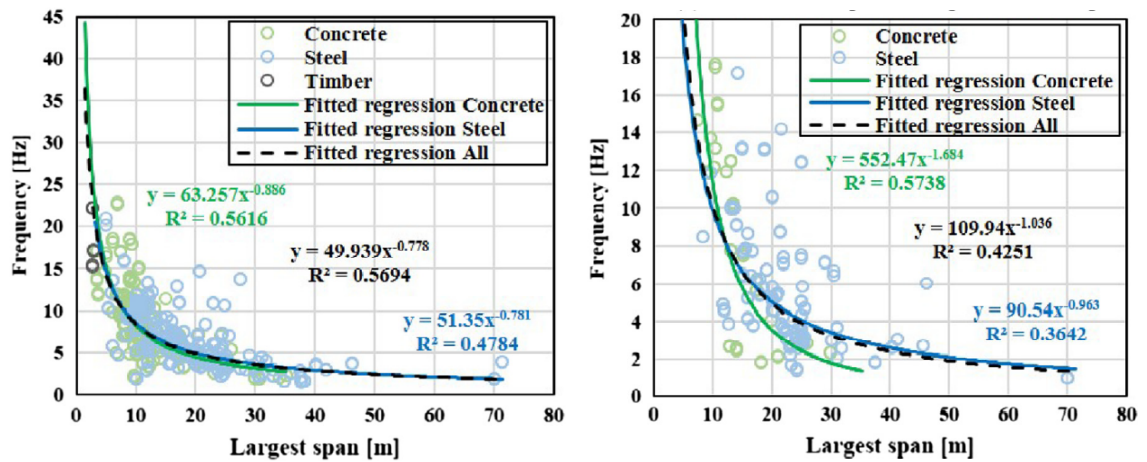


Figura 5.4. (a) Frecuencias verticales para puentes peatonales, (b) Frecuencias horizontales para puentes peatonales (Castellanos-Toro et al., 2018).

Si bien la IHE activa ha sido ampliamente estudiada, los efectos de la IHE pasiva han recibido menos atención. Ortiz et al. (2007) analizaron la tribuna occidental del Estadio Pascual Guerrero en Cali durante un concierto, observando cómo distintos géneros musicales influían en la estructura. Posteriormente, Ortiz et al. (2009) realizaron experimentos en laboratorio, instrumentando una viga rígida simplemente apoyada para medir fuerzas humanas en función del tiempo. Se aplicaron cinco combinaciones de carga, incluyendo impulsos de corta duración y la presencia de ocupantes pasivos (Figura 4.5). Se encontró que el amortiguamiento estructural aumentó hasta en 200 %, evidenciando que tratar a los ocupantes como masas estáticas es una aproximación incorrecta.

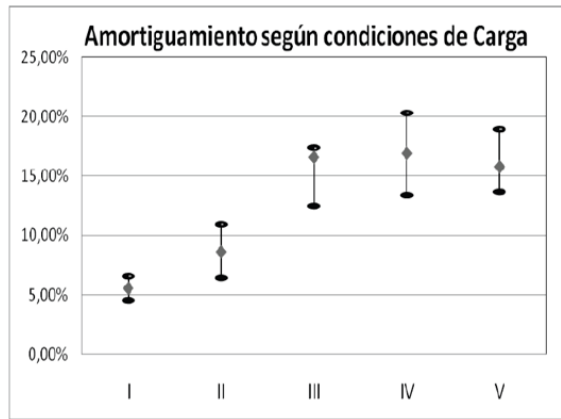


Figura 5.5. Amortiguamiento según las 5 combinaciones de carga descritas por Ortiz et al. (2009).

Ortiz et al. (2012) evaluaron la influencia de la IHE en una tribuna a escala, implementando un modelo de elementos finitos en SAP2000. Se realizaron pruebas con ocupantes en reposo y masas simuladas de arena, encontrando que el amortiguamiento estructural podía aumentar hasta un 27.8 %, afectando la respuesta vibratoria de la estructura. Estos hallazgos sugieren que los modelos actuales no contemplan adecuadamente los efectos de la ocupación humana en la dinámica estructural.

5.2 Estado del Arte:

5.2.1 IHE pasiva

La Interacción Humano-Estructura (IHE) es un área de investigación interdisciplinaria, por lo tanto se han realizado diversos estudios desde el área de la ingeniería, la medicina, la psicología, la ergonomía, entre otros. La IHE pasiva (sin movimiento voluntario de la persona) ha sido estudiada para comprender la respuesta biomecánica a vibraciones y su efecto en las propiedades dinámicas de las estructuras. Se debe tener en cuenta que existen dos aspectos claves fundamentales para lograr representar la IHE: la influencia del movimiento estructural sobre las respuestas activas ejercidas por el humano sobre la estructura misma y la influencia de los humanos sobre las propiedades dinámicas de la estructura que ocupan (García-Diéguez et al., 2021).

Es fundamental reconocer los desafíos asociados con el modelado de las características del cuerpo humano, dado que su comportamiento es inherentemente estocástico. Esto implica que se deben tener en cuenta diversos factores que influyen en la Interacción Humano-Estructura, como la postura, que afecta directamente la distribución de fuerzas y las propiedades dinámicas. Además, es necesario considerar la variabilidad intersujeto, que indica que cada individuo presenta respuestas dinámicas únicas, y la variabilidad intrasujeto, que refleja cómo el mismo sujeto puede mostrar resultados diferentes al someterse a la misma prueba. Estos factores destacan la complejidad de modelar con precisión el cuerpo humano en sistemas dinámicos (Busca et al., 2014).

Estudios recientes, como el de W. Kim et al. (2020), han explorado el impacto de las posturas sobre la rigidez aparente y el amortiguamiento inducido por ocupantes, mostrando que incluso pequeños ajustes en la postura pueden modificar de manera significativa las frecuencias naturales de las estructuras. Además, investigaciones experimentales han empleado tecnologías avanzadas como escáneres corporales y plataformas instrumentadas para caracterizar las respuestas dinámicas específicas de diferentes perfiles antropométricos.

El efecto de las personas se ha representado de diversas formas a través del tiempo. Inicialmente se simulaba simplemente con masas impuestas, sin embargo diversos estudios han demostrado que no es una forma representativa del sistema acoplado Humano-Estructura. Shahabpoor et al. (2017) llevaron a cabo simulaciones numéricas

de una pasarela peatonal, modelando a los ocupantes tanto como masas impuestas concentradas como mediante modelos biomecánicos detallados. Observaron que los modelos biomecánicos predecían mejor las mediciones experimentales; Y. Kim et al. (2022) llevaron a cabo recientemente ensayos en un modelo a escala de edificio, comparando la respuesta a impactos con y sin ocupantes simulados. Las masas impuestas no predijeron adecuadamente el amortiguamiento observado con sujetos reales.

Mediante ensayos de laboratorio con sujetos sobre plataformas vibrantes o pisos instrumentados, se han caracterizado las funciones de impedancia mecánica y transmisibilidad que describen la respuesta dinámica del cuerpo humano en estado pasivo. Estas mediciones han permitido una comprensión detallada del efecto biomecánico de los ocupantes sobre estructuras ligeras y dinámicamente sensibles. Los modelos biodinámicos han evolucionado significativamente, permitiendo simulaciones computacionales que incluyen parámetros como masa aparente, rigidez y amortiguamiento del cuerpo humano. Amirouche y Xie (2001) y Wei y Griffin (1998) lideraron los desarrollos iniciales en esta área, estableciendo modelos de referencia para describir el comportamiento del sistema Humano-Estructura bajo vibraciones. Estudios más recientes, como los de Busca et al. (2014), han introducido mediciones experimentales precisas de la masa aparente de los ocupantes y han demostrado la importancia de considerar este parámetro en el diseño estructural. Estos hallazgos subrayan que tratar a los ocupantes como masas estáticas conduce a predicciones inexactas de las respuestas dinámicas, enfatizando la necesidad de incluir modelos biodinámicos avanzados en las simulaciones estructurales.

Con respecto al modelado del cuerpo humano, los enfoques recientes han avanzado significativamente más allá del modelo biodinámico clásico lineal, buscando representaciones más realistas y precisas del cuerpo humano en la interacción con estructuras. El modelado del cuerpo humano en el contexto de la IHE pasiva ha evolucionado significativamente en los últimos años, incorporando enfoques cada vez más sofisticados para capturar sus propiedades dinámicas. Tradicionalmente, el cuerpo humano se modelaba como una masa estática fija, lo cual resultó ser insuficiente para representar adecuadamente esta interacción. Estudios más recientes han adoptado modelos biodinámicos que representan al cuerpo como un sistema masa-resorte-amortiguador, ajustable según parámetros como la postura y las características antropométricas del ocupante. Han y Huang (2021) propusieron un modelo numérico no lineal donde los

parámetros de rigidez y amortiguamiento del cuerpo humano varían dinámicamente en función de las condiciones estructurales. Subashi et al. (2019) propusieron modelos que simulan numéricamente las respuestas biomecánicas humanas bajo vibraciones, permitiendo analizar cómo estas respuestas afectan las propiedades dinámicas del sistema acoplado Humano-Estructura. Además, el uso de redes neuronales ha surgido como una herramienta innovadora en este campo; Ma (2022) entrenaron modelos basados en inteligencia artificial con datos experimentales, logrando predecir las respuestas dinámicas humanas sin necesidad de una representación explícita del sistema físico. Estos avances han transformado el modelado del cuerpo humano, permitiendo capturar de manera más precisa los efectos de la interacción pasiva sobre las propiedades dinámicas de las estructuras.

5.2.2 Plantillas de presión

Las plantillas de presión han demostrado ser una herramienta esencial para el análisis de la Interacción Humano-Estructura debido a su capacidad para medir con precisión las fuerzas aplicadas por los ocupantes en diferentes contextos. Esta herramienta proporciona datos fundamentales para comprender y modelar cómo las fuerzas de las personas influyen en las propiedades dinámicas de las estructuras ocupadas.

Ahmadi et al. (2018) desarrollaron un marco experimental que utiliza plantillas de presión para medir las fuerzas ejercidas por personas en estado pasivo sobre una pasarela peatonal. Este estudio analizó la IHE en condiciones de vibración y no vibración, observando cómo los ocupantes adaptaban inconscientemente su postura para reducir la incomodidad en respuesta a las vibraciones estructurales. Los resultados demostraron que incluso en estado pasivo, los ocupantes modifican la distribución de las fuerzas aplicadas, lo que afecta las propiedades dinámicas de la estructura, como su frecuencia natural y amortiguamiento.

Leal-Junior et al. (2019) introdujeron una plantilla de presión equipada con sensores de fibra óptica diseñada para medir dinámicamente las fuerzas plantares durante el reposo. Esta tecnología ofrece datos en tiempo real sobre la distribución de la presión plantar, lo que es particularmente útil en la IHE pasiva, donde los patrones de carga son menos dinámicos pero igualmente influyentes en la respuesta estructural. Las

plantillas inteligentes también permiten identificar cambios sutiles en la distribución de la presión debido a la postura estática, lo que tiene implicaciones directas en la predicción del comportamiento dinámico de estructuras.

Chen et al. (2015) utilizaron datos obtenidos de plantillas de presión para diseñar simulaciones por elementos finitos que evalúan el impacto de las distribuciones de carga plantar en estructuras. Aunque estas investigaciones se centraron en aplicaciones médicas, los métodos utilizados pueden ser utilizados en la IHE pasiva, donde los datos de presión plantar en estado de reposo pueden integrarse en modelos dinámicos para predecir cómo los ocupantes afectan las propiedades dinámicas de las estructuras. Este enfoque es particularmente relevante para estructuras ligeras y sensibles, donde incluso pequeñas alteraciones en la distribución de la carga pueden generar cambios significativos en la respuesta estructural.

5.2.3 Simulación Híbrida en Tiempo Real

La Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR) se ha consolidado como una técnica avanzada para evaluar de manera precisa las interacciones dinámicas entre ocupantes en estado pasivo y las estructuras que ocupan. Este enfoque combina experimentos físicos y simulaciones numéricas, permitiendo modelar y analizar las respuestas dinámicas de sistemas acoplados Humano-Estructura bajo condiciones controladas. En el contexto de la interacción IHE pasiva, esta técnica ha demostrado ser particularmente útil para capturar los efectos del estado de reposo humano en las propiedades dinámicas de las estructuras ligeras y sensibles.

Van Nimmen, Pavic, y Van den Broeck (2021) emplearon simulaciones híbridas en tiempo real para estudiar el comportamiento dinámico de estructuras ocupadas por personas en estado pasivo. Utilizando fuerzas registradas experimentalmente, replicaron las condiciones dinámicas de una estructura ocupada para evaluar cómo los cambios en las frecuencias naturales del sistema afectan la IHE. Este trabajo mencionó que incluso en estado pasivo, los ocupantes pueden alterar significativamente las frecuencias naturales y el amortiguamiento estructural, enfatizando la importancia de modelar de forma precisa la IHE Pasiva en el diseño de estructuras ligeras.

Han y Huang (2021) desarrollaron un modelo de Simulación Híbrida que permite ajustar en tiempo real parámetros fundamentales como la rigidez y el amortiguamiento del sistema acoplado Humano-Estructura en condiciones de reposo. Su trabajo exploró cómo diferentes configuraciones posturales en estado pasivo, como estar sentado o parado, afectan la estabilidad y el confort en estructuras ligeras. Los resultados revelaron que los ocupantes en estado pasivo contribuyen significativamente al comportamiento dinámico no lineal de las estructuras, destacando la necesidad de incluir modelos específicos para la interacción pasiva en simulaciones híbridas.

Ahmadi et al. (2018) integraron simulaciones híbridas y mediciones experimentales mediante plantillas de presión para analizar las fuerzas ejercidas por personas en estado pasivo sobre estructuras. Este enfoque combinó datos experimentales y simulaciones numéricas para validar modelos de IHE pasiva, demostrando cómo los patrones de distribución de carga en estado de reposo afectan las respuestas dinámicas del sistema estructural. Los hallazgos enfatizaron la importancia de integrar métodos híbridos en estudios donde las fuerzas humanas estáticas pueden alterar significativamente las propiedades dinámicas de las estructuras ligeras.

5.3 Modelos dinámicos

5.3.1 Estructura vacía (sistema 1 GDL)

La ecuación (1) presentada a continuación describe el movimiento vibratorio de una estructura vacía modelada como 1 grado de libertad (1 GDL) debido a una fuerza de excitación (Figura 4.6.a).

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = F_m \quad (1)$$

Donde, m_s denota la masa efectiva asociada al primer modo de vibración de la estructura, mientras que c_s representa el coeficiente de amortiguamiento que caracteriza la disipación de energía en el sistema. El parámetro k_s simboliza la rigidez efectiva de la estructura en la dirección vertical, un indicador de su capacidad para resistir deformaciones bajo carga. Por otro lado, F_m corresponde a la fuerza de excitación de la estructura. Las respuestas dinámicas de la estructura están descritas por los vectores $\ddot{u}_s$, $\dot{u}_s$ y u_s , que representan la aceleración, la velocidad y el desplazamiento, respecti-

vamente, en función del tiempo. Estos vectores permiten evaluar el comportamiento vibratorio y las propiedades dinámicas del sistema bajo excitación.

El sistema de 1 GDL es modelado numéricamente utilizando el enfoque de espacio de estados, lo que permite describir su comportamiento dinámico mediante un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden. En este contexto, la formulación de espacio de estados se define por:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (2,3)$$

donde $\mathbf{x}(t)$ corresponde al vector de estado que incluye las variables de desplazamiento y velocidad, $\dot{\mathbf{x}}(t)$ representa la derivada temporal del vector de estado, y $\mathbf{u}(t)$ es el vector de entrada, que en este caso corresponde a la fuerza externa o de excitación F_m . La matriz $\mathbf{A}$ describe la dinámica del sistema, $\mathbf{B}$ es la matriz de control que relaciona las entradas con las variables de estado, $\mathbf{C}$ es la matriz de salida que define la relación entre el vector de estado y las salidas observadas, y $\mathbf{D}$ es la matriz de transmisión directa. Esta representación facilita la simulación y análisis numérico de la respuesta de la estructura, capturando tanto la aceleración $\ddot{u}_s$, como la velocidad $\dot{u}_s$ y el desplazamiento u_s .

Las siguientes son las matrices de estado que describen el modelo de la estructura vacía donde la entrada corresponde a la fuerza de excitación aplicada, y la salida corresponde a la respuesta en aceleración de la estructura:

$$\mathbf{A}_{\text{est}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{\text{est}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_s} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_{\text{est}} = \begin{bmatrix} -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} \end{bmatrix} \quad \mathbf{D}_{\text{est}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_s} \end{bmatrix}$$

5.3.2 Estructura con ocupante modelado como 1GDL (Sistema 2GDL)

La siguiente formulación corresponde al caso en el que la estructura (1GDL) y la persona (1GDL) se acoplan para formar un sistema total de dos grados de libertad (2GDL) en la dirección vertical. En este caso, se modela tanto la estructura como la persona mediante un sistema masa-resorte-amortiguador (MCK) de un grado de libertad cada uno (Figura 4.6.b). Denotando:

$u_s(t)$ como el desplazamiento de la estructura

$u_p(t)$ como el desplazamiento de la persona

las ecuaciones de movimiento se pueden escribir como:

$$\begin{cases} m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s - C(\dot{u}_p - \dot{u}_s) - K(u_p - u_s) = F_m, \\ M \ddot{u}_p + C(\dot{u}_p - \dot{u}_s) + K(u_p - u_s) = 0, \end{cases} \quad (4,5)$$

donde:

- m_s es la masa efectiva de la estructura, y c_s, k_s sus parámetros de amortiguamiento y rigidez respectivamente.
- M es la masa de la persona, y C, K sus parámetros de amortiguamiento y rigidez.
- F_m es la fuerza de excitación aplicada a la estructura.
- $\ddot{u}_s$ y $\ddot{u}_p$ representan las aceleraciones, $\dot{u}_s$ y $\dot{u}_p$ las velocidades, y u_s y u_p los desplazamientos de la estructura y la persona, respectivamente.

Para analizar y simular el comportamiento dinámico del sistema acoplado se recurre a la representación en espacio de estados. Se define el vector de estado como:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} u_s(t) \\ \dot{u}_s(t) \\ u_p(t) \\ \dot{u}_p(t) \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{u}_s(t) \\ \ddot{u}_s(t) \\ \dot{u}_p(t) \\ \ddot{u}_p(t) \end{bmatrix}.$$

La fuerza externa se considera como la entrada al sistema:

$$\mathbf{u}(t) = F_m(t).$$

En forma compacta, las ecuaciones de primer orden y las matrices de estado se pueden expresar como:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_{2\text{gdl}} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_{2\text{gdl}} \mathbf{u}(t), \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_{2\text{gdl}} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{2\text{gdl}} \mathbf{u}(t). \quad (6,7)$$

$$\mathbf{A}_{2\text{gdl}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{(K+k_s)}{m_s} & -\frac{(C+c_s)}{m_s} & \frac{K}{m_s} & \frac{C}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K}{M} & \frac{C}{M} & -\frac{K}{M} & -\frac{C}{M} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{2\text{gdl}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{2\text{gdl}} = \begin{bmatrix} -\frac{(K+k_s)}{m_s} & -\frac{(C+c_s)}{m_s} & \frac{K}{m_s} & \frac{C}{m_s} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_{2\text{gdl}} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{m_s} \end{bmatrix}.$$

En estas expresiones, (m_s, c_s, k_s) corresponden a las propiedades dinámicas de la estructura y (M, C, K) a las propiedades dinámicas de la persona.

5.3.3 Estructura con ocupante modelado como 2GDL (Sistema 3GDL)

En este caso, la estructura se mantiene como un sistema de 1GDL, mientras que la persona se modela con 2GDL, sumando un total de 3 grados de libertad en la dirección vertical del sistema completo acoplado (Figura 4.6.c). Las ecuaciones de movimiento para ese sistema son descritas en las ecuaciones 4 y 5.

Se define entonces,

$u_s(t)$ como el desplazamiento de la estructura,

$u_1(t), u_2(t)$ como los desplazamientos de las dos masas que representan a la persona.

Los parámetros m_s, c_s, k_s describen la dinámica de la estructura, mientras que (M_1, c_1, k_1) y (M_2, c_2, k_2) corresponden a los dos subsistemas de la persona.

Se define entonces el vector de estado con seis variables, correspondientes a desplazamientos y velocidades:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} u_s(t) \\ \dot{u}_s(t) \\ u_1(t) \\ \dot{u}_1(t) \\ u_2(t) \\ \dot{u}_2(t) \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{u}_s(t) \\ \ddot{u}_s(t) \\ \dot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{bmatrix}.$$

La fuerza de entrada se conserva como:

$$\mathbf{u}(t) = F_m(t).$$

Las ecuaciones de primer orden y las matrices de estados correspondientes se definen como:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_{3\text{gdl}} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_{3\text{gdl}} \mathbf{u}(t), \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_{3\text{gdl}} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{3\text{gdl}} \mathbf{u}(t). \quad (8,9)$$

$$\mathbf{A}_{3\text{gdl}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{(k_s+k_1)}{m_s} & -\frac{(c_s+c_1)}{m_s} & \frac{k_1}{m_s} & \frac{c_1}{m_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{M_1} & \frac{c_1}{M_1} & -\frac{(k_1+k_2)}{M_1} & -\frac{(c_1+c_2)}{M_1} & \frac{k_2}{M_1} & \frac{c_2}{M_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{k_2}{M_2} & \frac{c_2}{M_2} & -\frac{k_2}{M_2} & -\frac{c_2}{M_2} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{3\text{gdl}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{3\text{gdl}} = \begin{bmatrix} -\frac{(k_s+k_1)}{m_s} & -\frac{(c_s+c_1)}{m_s} & \frac{k_1}{m_s} & \frac{c_1}{m_s} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{3\text{gdl}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_s} \end{bmatrix}.$$

En este sistema de tres grados de libertad (3 GDL), la rigidez total K_{total} y el amortiguamiento total C_{total} de la persona se determinan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{C_{\text{total}}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \quad (10)$$

$$\frac{1}{K_{\text{total}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (11)$$

5.3.4 Estructura con ocupante modelado como masa impuesta (Sistema 1GDL)

En este caso, la persona no posee propiedades dinámicas de rigidez ni amortiguamiento y, por lo tanto, no puede ser modelada como un sistema MCK. Debido a esto, el sistema se trata de la misma manera que en la sección 4.3.1, es decir, como un sistema de 1 GDL (Figura 4.6.d). La única diferencia es que la masa efectiva del sistema, M_s corresponde a la suma de la masa de la estructura vacía y la masa de la persona.

La siguiente imagen representa gráficamente los tres modelos descritos anteriormente:

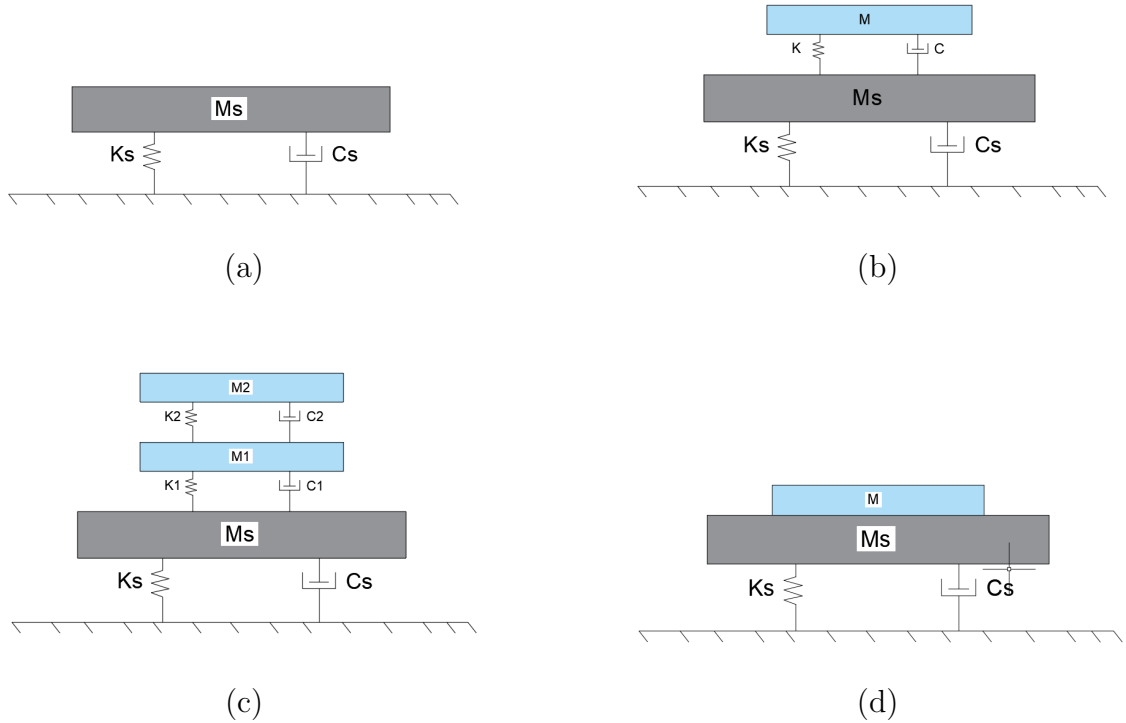


Figura 5.6. (a) Sistema de 1 GDL (Estructura vacía), (b) Sistema de 2 GDL, (c) Sistema de 3 GDL, (d) Sistema de 1 GDL (acoplado).

5.3.5 Ocupante como 1 GDL

Para modelar el comportamiento dinámico de una persona en estado pasivo, considerada un sistema de un grado de libertad (1GDL) representado por una masa M , una rigidez K y un amortiguamiento C . La ecuación de movimiento de este sistema está dada por:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (12)$$

donde:

x es el desplazamiento de la persona

$\dot{x}$ es la velocidad

$\ddot{x}$ es la aceleración

F es la fuerza aplicada

Reescribiendo esta ecuación en forma de espacio de estados, se define el vector de estado como:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

La representación en forma matricial es:

$$\dot{\mathbf{x}} = A_H \mathbf{x} + B_H \mathbf{u} \quad \mathbf{y} = C_H \mathbf{x} + D_H \mathbf{u} \quad (13, 14)$$

donde las matrices del sistema son:

$$A_H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{M} & -\frac{C}{M} \end{bmatrix}, \quad B_H = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K}{M} & \frac{C}{M} \end{bmatrix}$$

$$C_H = \begin{bmatrix} K & C \end{bmatrix}, \quad D_H = \begin{bmatrix} -K & -C \end{bmatrix}$$

Este modelo permite representar la respuesta dinámica de la persona en términos de su desplazamiento y velocidad.

5.3.6 Ocupante como 2 GDL

Para modelar el comportamiento dinámico de una persona en estado pasivo se considera un sistema de dos grados de libertad (2 GDL) representado por dos masas M_1 y M_2 , dos rigideces k_1 y k_2 y dos coeficientes de amortiguamiento c_1 y c_2 . La excitación base proviene de la estructura, a través del desplazamiento x_1 y la velocidad x_2 .

Las ecuaciones de movimiento del sistema son:

$$M_1 \ddot{x}_3 = k_1 x_1 + c_1 x_2 - (k_1 + k_2) x_3 - (c_1 + c_2) \dot{x}_3 + k_2 x_5 + c_2 \dot{x}_5, \quad (15)$$

$$M_2 \ddot{x}_5 = k_2 x_3 + c_2 \dot{x}_3 - k_2 x_5 - c_2 \dot{x}_5. \quad (16)$$

Definiendo además:

$$x_4 = \dot{x}_3, \quad x_6 = \dot{x}_5,$$

y el vector de estados de la persona como:

$$\mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix},$$

junto con la entrada (proveniente de la estructura)

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix},$$

la representación en forma de espacio de estados es:

$$\dot{\mathbf{x}}_p = A_H \mathbf{x}_p + B_H \mathbf{u}, \quad y = C_H \mathbf{x}_p + D_H \mathbf{u},$$

donde la salida y es la fuerza:

$$y = k_1 (x_3 - x_1) + c_1 (x_4 - x_2). \quad (17,18)$$

Las matrices del sistema son:

$$A_H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1 + k_2}{M_1} & -\frac{c_1 + c_2}{M_1} & \frac{k_2}{M_1} & \frac{c_2}{M_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{M_2} & \frac{c_2}{M_2} & -\frac{k_2}{M_2} & -\frac{c_2}{M_2} \end{bmatrix},$$

$$B_H = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_1}{M_1} & \frac{c_1}{M_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_H = \begin{bmatrix} k_1 & c_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_H = \begin{bmatrix} -k_1 & -c_1 \end{bmatrix}.$$

Este modelo en espacio de estados permite representar la dinámica de la persona de forma que, al recibir la excitación de la estructura, genere la fuerza y que retroalimenta a la misma. De esta forma se obtiene un sistema acoplado equivalente al modelo completo de 3 GDL.

5.4 Ecuación de FIT

El Índice de Ajuste (FIT) representado en la ecuación 19 es una métrica ampliamente utilizada en la validación de modelos numéricos, permite cuantificar la similitud entre una señal experimental y una generada por simulación. Su cálculo se basa en la norma de la diferencia entre ambas señales, normalizada con respecto a la variabilidad de la señal experimental. Valores cercanos al 1 indican una alta precisión del modelo numérico, valores cercanos a 0 indican que el modelo numérico presenta una baja concordancia con la señal experimental, evidenciando una discrepancia significativa entre ambas representaciones, y valores negativos indican que la diferencia entre la señal numérica y la señal experimental es mayor que la diferencia entre la señal experimental y su promedio. En este contexto, la ecuación fue utilizada para evaluar el grado de concordancia entre dos señales, específicamente una obtenida experimentalmente de la estructura de ensayos y otra generada mediante los modelos numéricos.

$$\text{FIT} = \left(1 - \frac{\|\vec{S}_{\text{exp}} - \vec{S}_{\text{num}}\|}{\|\vec{S}_{\text{exp}} - \vec{S}_{\text{promedio}}\|} \right) \quad (19)$$

Donde,

- $\vec{S}_{\text{exp}}$: Señal en el eje y obtenida experimentalmente de la estructura. Representa los datos en aceleración reales medidos durante las pruebas experimentales.
- $\vec{S}_{\text{num}}$: Señal en el eje y obtenida mediante modelos numéricos. Corresponde a la respuesta estructural en aceleración basada en el modelo numérico desarrollado.
- $\|\vec{S}_{\text{exp}} - \vec{S}_{\text{num}}\|$: Norma de la diferencia entre las señales experimental ($\vec{S}_{\text{exp}}$) y numérica ($\vec{S}_{\text{num}}$). Esta norma cuantifica el error absoluto entre ambos conjuntos de datos.
- $\|\vec{S}_{\text{exp}} - \vec{S}_{\text{promedio}}\|$: Norma de la diferencia entre la señal experimental ($\vec{S}_{\text{exp}}$) y su promedio ($\vec{S}_{\text{promedio}}$).

5.5 Razón de amortiguamiento (ζ)

La razón de amortiguamiento (ζ) es un parámetro fundamental en la caracterización dinámica de estructuras, ya que determina la capacidad del sistema para disipar energía tras una perturbación. Un alto valor de ζ indica una mayor disipación de energía y menor vibración residual en la estructura. Se calcula a partir del decremento logarítmico (Λ) de la amplitud de las oscilaciones sucesivas:

$$\Lambda = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_0}{x_n} \right) \quad (20)$$

Luego, la razón de amortiguamiento se obtiene con:

$$\zeta = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}} \quad (21)$$

donde x_0 y x_n son las amplitudes inicial y final, y n el número de ciclos.

5.6 Frecuencia natural (Fn)

La frecuencia natural (Fn) de un sistema dinámico es el valor característico asociado a la respuesta oscilatoria libre de la estructura, representa la tasa a la que el sistema vibra cuando no está sujeto a fuerzas externas, dependiendo de la masa y la rigidez del sistema. La Fn del sistema calculada mediante una señal experimental se determina a partir de la función de transferencia estimada, obtenida mediante el cociente entre

la densidad espectral cruzada $S_{xy}(f)$ (señal de entrada o fuerza del impacto) y la densidad espectral de potencia $S_{xx}(f)$ (relación entre la entrada, fuerza de impacto), y salida (respuesta en aceleración):

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (22)$$

Luego, la frecuencia natural se obtiene identificando el pico en la magnitud de la función de transferencia:

$$f_n = \arg \max |H(f)| \quad (23)$$

donde $|H(f)|$ representa la respuesta en magnitud del sistema en el dominio de la frecuencia.

5.7 Subestructuración y Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR)

La subestructuración es una técnica utilizada en la Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR) para descomponer un sistema dinámico en partes físicas y numéricas, permitiendo evaluar el comportamiento estructural con mayor fidelidad. Esta metodología permite capturar interacciones complejas entre subsistemas físicos y simulados. Un aspecto crítico de la subestructuración en SHTR es la retroalimentación y el retardo temporal (delay) que ocurre debido a la latencia en la comunicación entre el modelo numérico y el sistema físico. Estudios previos como los de Malloy (2018) han demostrado que la existencia de este retardo puede alterar significativamente la respuesta dinámica del sistema, generando discrepancias en la estimación de aceleraciones y amortiguamiento. En el caso de la IHE pasiva, la subestructuración permite modelar la estructura en un entorno computacional mientras que el comportamiento del ocupante es evaluado físicamente, facilitando una validación más precisa de los efectos de ocupación en las propiedades modales del sistema.

La plataforma mostrada en la Figura 4.7 constituye un sistema mecánico capaz de generar movimientos tanto en el plano vertical como en el plano horizontal, gracias a la incorporación de múltiples actuadores. El sistema cuenta con dos actuadores verticales, uno a cada lado de la caminadora como se muestra en la figura, cuyo objetivo es suministrar el movimiento o las vibraciones necesarias en esa dirección. Adicionalmente, el sistema incluye un subsistema de accionamiento lateral, lo que permite, en

conjunto, un control de varios grados de libertad de la plataforma.

Para la medición de las fuerzas inducidas por la presencia o interacción del sujeto, la plataforma está equipada con celdas de carga, dos a cada lado de la caminadora. En la imagen se aprecian estas celdas en un lado de la estructura, las cuales registran en tiempo real las fuerzas verticales que actúan sobre la plataforma. Estas mediciones resultan fundamentales para caracterizar la respuesta del sistema, ya que brindan datos precisos acerca de la magnitud y la distribución de las cargas que se generan durante el ensayo. La cinta de la caminadora se encuentra montada sobre la estructura donde convergen los actuadores y las celdas de carga. Este diseño hace posible, por un lado, la generación controlada de movimientos (vibraciones o desplazamientos) y, por otro, la adquisición de información dinámica relacionada con el comportamiento del sujeto o masa que se ubique sobre la plataforma.

La integración de los actuadores verticales, el mecanismo de accionamiento horizontal y las celdas de carga forman un conjunto que posibilita la aplicación de diferentes tipos de cargas y la medición simultánea de sus efectos. Desde un punto de vista teórico, la caminadora puede considerarse como un subsistema de ensayo que permite replicar, de forma controlada, condiciones dinámicas diversas, ofreciendo la versatilidad necesaria para el análisis de la interacción humano-estructura o el estudio de la respuesta de cuerpos sometidos a vibraciones.

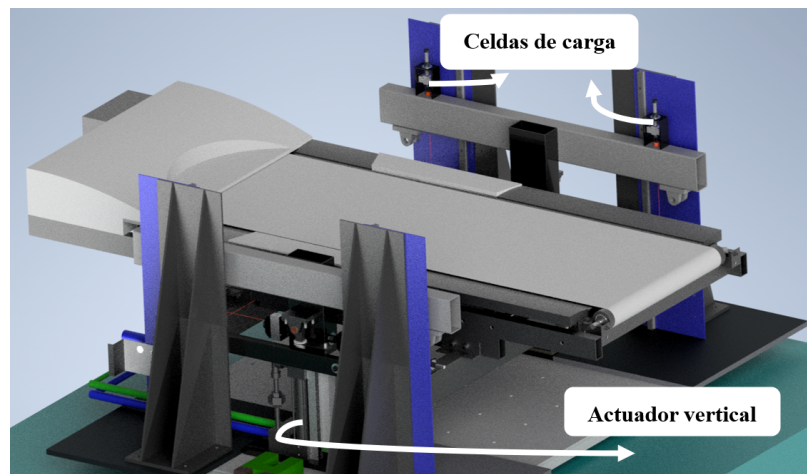


Figura 5.7. Instrumentación.

6. MARCO METODOLÓGICO

6.1 Estructura de ensayos

La estructura experimental utilizada para los ensayos fue una configuración en voladizo, ubicada en el Laboratorio de Dinámica Estructural de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle. Esta estructura fue desarrollada inicialmente por Salyards y Noss (2014) y modificada posteriormente Ortiz et al. (2012) (Figura 5.1). La estructura fue diseñada para representar de forma aproximada una tribuna en voladizo y permitir evaluar los efectos de la IHE mediante la variación de sus propiedades dinámicas.

La estructura consta de un marco de acero liviano arriostrado horizontalmente, diseñado para mantener una relación de carga muerta y carga viva similar a la de las estructuras propensas a vibraciones excesivas de origen antrópico. El marco de acero en voladizo consta de dos soportes fijos en el extremo y dos soportes móviles que se pueden desplazar para modificar la longitud del voladizo y, por tanto, su rigidez. Además, se puede modificar la masa de la estructura acoplando bloques de hormigón de diferentes masas para cubrir una mayor gama de frecuencias (3-10 Hz) en la dirección vertical.

En esta investigación se emplearon tres configuraciones distintas para evaluar la Interacción Humano-Estructura pasiva. Todas las configuraciones utilizaron un voladizo de 2.5 metros de longitud como base. En la primera configuración, se situaron tres bloques de concreto de dimensiones $27 \times 10 \times 180$ cm distribuidos de la siguiente forma: un bloque en cada extremo de la estructura y un último bloque en el punto intermedio de la estructura (Figura 5.1.a). En la segunda configuración, se ubicaron dos bloques de concreto, uno en el extremo del voladizo y el segundo a una distancia de 1.20 metros desde el marco del voladizo (Figura 5.1.b). Por último, para la tercera configuración se ubicaron tres bloques juntos en el extremo del marco del voladizo (Figura 5.1.c). Estas configuraciones permitieron representar tres conjuntos distintos

de propiedades dinámicas verticales en la estructura experimental, facilitando así el análisis de su comportamiento bajo tres diferentes condiciones.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.1. (a) Estructura de ensayos bajo configuración 1, (b) Estructura de ensayos bajo configuración 2, (c) Estructura de ensayos bajo configuración 3.

6.2 Instrumentación

6.2.1 Martillo de impacto instrumentado

Para generar las vibraciones verticales necesarias en la estructura se requirió una fuerza externa de excitación, para esto se utilizó un martillo de impacto instrumentado. Este martillo fue diseñado para aplicar golpes controlados sobre la estructura, específicamente en el centro del bloque de concreto ubicado en el extremo del voladizo del marco. Para asegurar una transmisión efectiva de la energía, se acopló una capa

de goma y dos placas de acero al martillo. Además, se instaló una celda de carga de bajo perfil en el bloque de concreto, la cual registraba la magnitud de fuerza de cada impacto respecto al tiempo (Figura 5.2).

6.2.2 Acelerómetros

Para todas las configuraciones se instaló un acelerómetro ENDEVCO Modelo 752A13 en la mitad de la cara inferior del bloque de concreto ubicado en el voladizo del marco para medir las aceleraciones verticales inducidas en la estructura. Este acelerómetro tiene una sensibilidad de 1 V/g y se conectó a un amplificador Wilcoxon Research Modelo P31, el cual permite ajustar la sensibilidad entre 10 V/g, 100 V/g y 1000 V/g (Figura 5.2).

6.2.3 Sistema de adquisición de datos

Se registraron los datos tanto de la celda de carga como del acelerómetro mediante un sistema de adquisición de alta frecuencia. La fuerza aplicada por el martillo instrumentado se muestreó a 2000 Hz, lo que permitió representar con mayor precisión el área bajo la curva de impacto, mientras que los datos de aceleración se capturaron a 200 Hz. (Figura 5.2).

6.2.4 Plantillas de presión

En los ensayos con sujetos de prueba, se utilizó la aplicación Stridalyzer junto con plantillas de presión equipadas con 8 sensores piezorresistivos. Estas plantillas permitieron medir la distribución de la carga y el balanceo de los individuos durante los ensayos. La información obtenida a través de Stridalyzer y las plantillas fue empleada para analizar cómo los sujetos interactúan pasivamente con la estructura y cómo sus movimientos voluntarios o involuntarios afectan la respuesta dinámica del sistema (Figura 5.3).

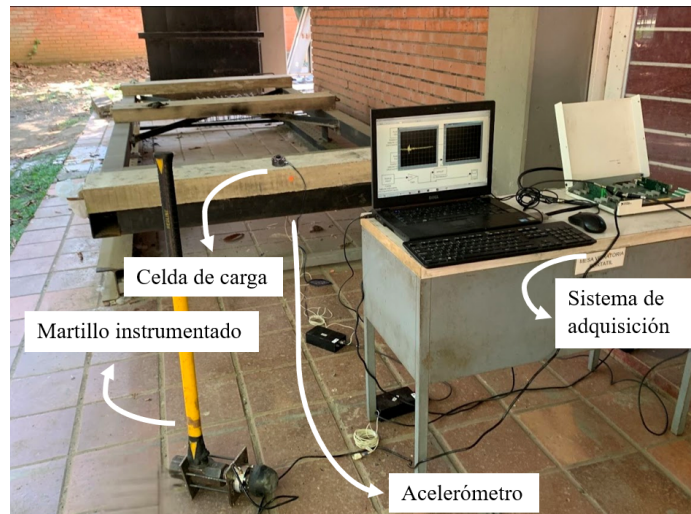


Figura 6.2. Instrumentación.



Figura 6.3. Plantillas de presión.

6.3 Metodología

La metodología de los ensayos se diseñó para evaluar las propiedades dinámicas de la estructura de ensayos bajo tres condiciones que incluían dos campañas experimentales para cada una de las configuraciones de la estructura de ensayos: estructura vacía; estructura ocupada por sujetos en estado pasivo (primera campaña experimental) y, por último, la estructura ocupada con cargas inertes que simulaban la masa de los ocupantes (segunda campaña experimental). El objetivo principal de estos ensayos fue inducir vibraciones controladas en la estructura para analizar las variaciones en

sus frecuencias naturales, rigideces efectivas y razones de amortiguamiento.

Una vez finalizada la metodología experimental, se procede a la elaboración de modelos numéricos que representan de manera fiel las pruebas realizadas. Estos modelos fueron desarrollados con el objetivo de replicar con precisión el comportamiento dinámico observado en los ensayos experimentales. Posteriormente, se evaluó la precisión de dichos modelos mediante una comparación detallada de sus resultados con los datos obtenidos experimentalmente, utilizando el índice de ajuste FIT (ecuación 19). Además, se exploró la implementación de estos modelos en Simulaciones Híbridas en Tiempo Real (SHTR), analizando su integración en entornos de simulación interactivos a través de un modelo en Simulink. En este proceso, se evaluó la influencia del retardo temporal (delay) en las pruebas, determinando su impacto en la precisión y estabilidad de la simulación.

A continuación, se describen las distintas etapas que conforman la metodología:

6.3.1 Estructura vacía

La primera etapa de los ensayos experimentales consistió en la evaluación y caracterización de la estructura vacía. Se realizaron cinco pruebas, cada una con un impacto aplicado en la celda de carga ubicada en el centro del bloque de concreto en el voladizo mediante el martillo instrumentado. Se registraron las aceleraciones verticales y fuerzas de impacto generadas por el martillo en cada ensayo. Estos datos proporcionaron una línea base para comparar las propiedades dinámicas de la estructura sin influencias externas.

6.3.2 Campaña experimental 1: Sujetos de prueba

En la primera campaña experimental participaron 7 sujetos de prueba (5 hombres y 2 mujeres) con edades comprendidas entre los 22 y 32 años. La altura promedio de los sujetos fue 1.7 metros, con un rango de 1.56 a 1.85 metros. El peso corporal promedio fue de 68.93 kg, variando entre 54.5 a 85 kg. Ninguno de los participantes mencionó tener una enfermedad o condición médica que pudiera afectar el resultado de las pruebas.

Durante los ensayos, los sujetos permanecieron de pie sobre la viga de concreto, manteniendo una postura erguida y relajada, con los pies alineados a la anchura de los hombros (Figura 5.4.a). Se les indicó que evitaran cualquier movimiento voluntario durante la prueba para garantizar la estabilidad de la medición. Cada sujeto participó en tres pruebas para cada configuración de la estructura de ensayos, en las cuales se aplicó un impacto con el martillo en cada ocasión. De manera simultánea, se registraron las aceleraciones verticales, la fuerza del impacto y las cargas plantares a lo largo del tiempo, utilizando plantillas de presión y la aplicación Stridalalyzer para la captura de datos.

6.3.3 Campaña experimental 2: Masas inertes

En la segunda campaña se simularon los ocupantes mediante cargas inertes impuestas sobre la estructura (Figura 5.4.b). Se utilizaron sacos de arena y cemento con las mismas masas y en la misma posición de los sujetos de prueba de la primera campaña. El protocolo experimental de la segunda campaña fue similar al de la primera, pero sin la presencia de sujetos reales. Se realizaron 3 pruebas por cada masa representativa para cada configuración experimental y se registraron aceleraciones verticales, además de la fuerza de impacto mediante el sistema de adquisición de datos.



(a)



(b)

Figura 6.4. (a) Campaña experimental 1, (b) Campaña experimental 2.

6.3.4 Análisis y procesamiento de datos

Los datos recolectados durante las pruebas experimentales fueron procesados para determinar las propiedades dinámicas de frecuencia natural (F_n) y razones de amortiguamiento (ζ) para cada caso de las tres configuraciones experimentales. Inicialmente, se analizó la estructura vacía sin la influencia de cargas externas con el fin de establecer una línea base de sus propiedades dinámicas. Posteriormente, se evaluó la estructura ocupada por sujetos en estado pasivo, lo que permitió identificar cómo la Interacción Humano-Estructura modifica estas propiedades dinámicas. Para ello, se analizaron los registros de aceleraciones verticales, las fuerzas de impacto y las fuerzas medidas por las plantillas de presión. Finalmente, se estudió la estructura con masas inertes, permitiendo evaluar los efectos de cargas estáticas sobre la respuesta del sistema y comparar sus resultados con aquellos obtenidos con sujetos reales.

En particular, los datos de las plantillas de presión fueron procesados sumando para cada pie la fuerza obtenida mediante la aplicación Stridalyzer en cada uno de los ocho sensores de presión incluidos en las plantillas. Este procedimiento permitió obtener una distribución detallada de las cargas plantares ejercidas por los sujetos durante las pruebas, proporcionando información clave sobre la interacción entre los individuos y la estructura en estado pasivo. Se determinó la carga plantar para 3 momentos de la prueba (inicio, mitad y final), como se muestra en la Figura 5.5.

La determinación de las propiedades dinámicas incluyó el cálculo de la frecuencia natural (F_n) de la estructura en cada una de las pruebas experimentales. Esta frecuencia se obtuvo mediante el análisis de la función de transferencia estimada, identificando el pico en la magnitud de la respuesta en el dominio de la frecuencia (ecuación 23). Por otro lado, la razón de amortiguamiento (ζ) del sistema acoplado fue calculada a partir del decremento logarítmico, utilizando la ecuación 21, lo que permitió caracterizar la disipación de energía en la estructura en presencia de ocupantes en estado pasivo y cargas inertes.

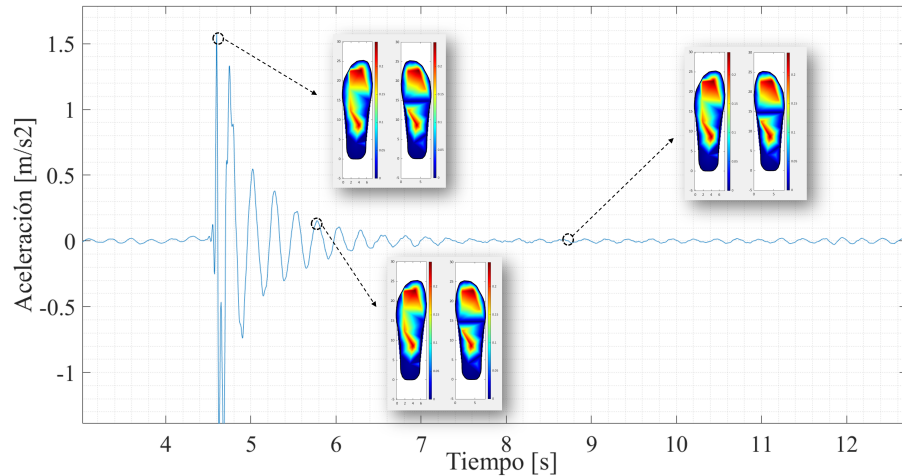


Figura 6.5. Esquema metodológico de la medición de la carga plantar en tres momentos de la prueba (inicio, mitad y final).

6.3.5 Modelos numéricos

Las configuraciones de la estructura de ensayos permitieron identificar las frecuencias dominantes en la dirección vertical. Esto fue fundamental para simplificar el comportamiento dinámico de la estructura y modelarla como un sistema masa-resorte-amortiguador (MCK) de un grado de libertad (1GDL) en esa dirección específica. La elección de un modelo de 1GDL implicó la consideración de la estructura como un sistema simplificado que representa la interacción de la masa con un elemento elástico y un elemento amortiguador, reflejando de forma aproximada las respuestas dinámicas verticales.

A partir de los datos obtenidos y procesados en las pruebas experimentales se desarrolló un modelo numérico de la estructura vacía (sección 4.3.1) mediante un proceso de optimización de sus propiedades dinámicas: masa, rigidez y amortiguamiento para cada configuración; sobre esta base, se elaboraron tres modelos adicionales: el primero (2GDL) representa el sistema completo asignando un grado de libertad a la estructura y otro al ocupante, ambos bajo un esquema masa-resorte-amortiguador (MCK) (sección 4.3.2); el segundo modelo (3GDL) amplía el número de grados de libertad del ocupante a dos y conserva uno para la estructura, resultando en un sistema de tres grados de libertad en total (sección 4.3.3); finalmente, el tercer modelo incorpora la masa del ocupante al sistema de 1 GDL de la estructura vacía como una adición

directa a la masa de la estructura, sin recurrir a la formulación MCK para representar las propiedades dinámicas de la persona. Esto con el fin de determinar las propiedades dinámicas del sujeto y de la estructura para cada configuración propuesta.

Para cada modelo numérico empleado, la fuerza de entrada correspondió a la fuerza experimental medida mediante la celda de carga. Con los resultados obtenidos se evaluó la precisión de los datos determinados a través de los modelos numéricos bajo las tres configuraciones de la estructura, para ello se utilizó el índice de ajuste FIT (ecuación 19) para evaluar el índice de correlación entre señales.

6.3.6 Modelo de retroalimentación en Simulink

En este estudio se implementó un modelo de retroalimentación en Simulink con el objetivo de evaluar la respuesta dinámica de un sistema acoplado Estructura–Persona, considerando dos distribuciones de modelado. En la primera distribución, el análisis se dividió en tres partes principales: primero, un modelo numérico de la estructura vacía, representado como un sistema de un grado de libertad (1GDL) conforme a las ecuaciones de estado definidas en la Sección 4.3.1; segundo, un modelo numérico de la persona, igualmente representado como un sistema de 1GDL según las ecuaciones de la Sección 4.3.5; y por último, se consideró un sistema acoplado Persona-Estructura representado como 2GDL, de acuerdo con las ecuaciones de estado presentadas en la Sección 4.3.2.

La subestructuración se basó en modelar a la estructura mediante un sistema en espacio de estados, al cual se le introduce una fuerza de entrada, que corresponde a la fuerza experimental medida cuando la estructura real estaba ocupada por un sujeto (fuerza obtenida en la campaña experimental 1). Esta fuerza, al ingresar al modelo, genera desplazamientos de la estructura. Los desplazamientos resultantes son enviados como entrada al modelo numérico de la persona. En este proceso, la persona se modela en espacio de estados; en el primer análisis se utiliza un sistema de 1GDL, y en el segundo análisis se incrementa la complejidad empleando un modelo de 2GDL. A partir de estos desplazamientos, el modelo de la persona genera una fuerza de reacción, la cual se suma a la fuerza experimental original para retroalimentar el sistema. De esta forma, se establece un lazo de retroalimentación en el que la fuerza que ac-

túa sobre la estructura es el resultado de la interacción entre la fuerza inicial y la respuesta dinámica del ocupante. Las aceleraciones resultantes, determinadas por la doble derivada de los desplazamientos obtenidos (Figura 5.6), se comparan con las aceleraciones generadas por la misma fuerza pero ingresada al sistema acoplado de 2 GDL en el primer análisis y de 3 GDL en el segundo análisis, sin retardo (Figura 5.7).

Para evaluar el efecto del retardo en la transmisión de esta retroalimentación, se incorporó un bloque de delay entre la salida del modelo de la estructura (los desplazamientos) y la entrada del sistema de la persona. Este delay simula el retraso que existiría entre el cálculo computacional del modelo y la respuesta real en un entorno experimental híbrido. Se realizaron entonces simulaciones en dos escenarios: en el primero, sin retroalimentación, donde la interacción entre la estructura y la persona se resolvió de forma convencional con un modelo en espacio de estados de un sistema acoplado de 2GDL o 3GDL y sin considerar ningún retardo; y en el segundo, con retroalimentación que incorpora el delay, permitiendo analizar cómo este retardo afecta la precisión del modelo numérico y la predicción de la respuesta estructural. Con esta aproximación se buscó evidenciar el impacto del tiempo de procesamiento y la demora en la aplicación de fuerzas sobre la exactitud de la simulación híbrida.

Se realizaron simulaciones con distintos valores de delay (τ) para analizar su impacto en la respuesta dinámica del sistema. Los valores de τ considerados fueron $\tau = 0$ ms, que representa la condición ideal sin retardo, y $\tau = 1$ ms, 5 ms, 10 ms y 40 ms, que simulan diferentes escenarios de retraso en la transmisión de datos y retroalimentación del sistema. La variación del delay permitió evaluar cómo se altera la respuesta en aceleración del sistema acoplado.

Para validar la influencia del delay en la simulación, se comparó la respuesta en aceleración obtenida en los siguientes escenarios: (1) un modelo numérico sin retroalimentación, donde la respuesta del sistema acoplado es evaluada sin considerar la interacción retardada, (2) un modelo con retroalimentación y delay (τ), donde se introduce el retardo y se analiza su efecto en la precisión de la simulación como se muestra en la Figura 5.6 y en la Figura 5.7.



Figura 6.6. Modelo de subestructuración.



Figura 6.7. Modelo de subestructuración.

6.3.7 Implementación en SHTR

En la implementación de la Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR), se conserva el modelo numérico de la estructura, representado en espacio de estados y ejecutado en Simulink, mientras que la persona se incorpora de manera física al sistema. Para ello, se adaptó la caminadora que actúa como plataforma vibrante, la cual está diseñada para moverse tanto vertical como horizontalmente; sin embargo, en este ensayo se configura para que solo ejecute movimientos en el eje vertical, considerando que es la dirección de movimiento que estamos analizando.

La metodología consiste en que la persona se suba a la plataforma vibrante, que forma parte de la caminadora adaptada (Figura 5.8). La fuerza de impacto, previamente determinada en la primera campaña experimental, se utiliza para excitar el modelo numérico de la estructura vacía, representado en espacio de estados en Simulink. A partir de esta fuerza, el modelo numérico genera desplazamientos teóricos de la es-

tructura, los cuales se envían a la caminadora mediante el sistema de control. De esta forma, los desplazamientos calculados se traducen en movimientos reales de la plataforma, que actúan sobre la persona.

Simultáneamente, las celdas de carga integradas en la caminadora miden las fuerzas resultantes de la interacción física del sujeto con la plataforma. Estas lecturas, que reflejan la respuesta dinámica real, se incorporan en el modelo de Simulink como parte del lazo de retroalimentación. Así, se cierra el circuito híbrido: la fuerza de impacto inicia el proceso en el modelo numérico, se generan desplazamientos que se convierten en movimiento físico, y las fuerzas medidas por las celdas de carga retroalimentan el sistema, permitiendo evaluar la precisión del modelo y la efectividad de la simulación híbrida en tiempo real.

Entonces, se determinan los desplazamientos teóricos que el modelo indica a la caminadora que realice, y se registran los desplazamientos reales que ejecuta la plataforma. Con estos datos, se calcula la aceleración aplicando la segunda derivada de los desplazamientos, lo que permite cuantificar la respuesta dinámica del sistema. Además, se estima el delay entre los desplazamientos teóricos y los reales, es decir, entre lo que se le solicita a la caminadora y lo que en verdad hace, facilitando la identificación de discrepancias y del delay del sistema.



Figura 6.8. Ensayo de Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR): Sujeto sobre la Plataforma Vibrante.

7. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la investigación. En primer lugar, se incluyen los datos antropométricos de los sujetos participantes en los ensayos experimentales.

Seguidamente, se presentan los resultados de las propiedades dinámicas de masa (M_s), rigidez (K_s) y amortiguamiento (C_s) de las estructuras vacías bajo las tres configuraciones experimentales evaluadas. Estos parámetros han sido obtenidos a partir de los modelos numéricos de un grado de libertad (1GDL) desarrollados para cada configuración de la estructura. Asimismo, se incluye el índice de correlación FIT, permitiendo evaluar la precisión del modelo numérico en comparación de los resultados experimentales.

Posteriormente, se presentan los resultados de carga plantar obtenidos a partir de las plantillas de presión para los sujetos evaluados bajo las configuraciones empleadas para 3 momentos de cada prueba (inicio, mitad y final). Se presenta una tabla comparativa que resume los resultados de cargas plantares para todas las configuraciones, permitiendo una visión global de las mediciones obtenidas.

Para cada configuración experimental, se presentan inicialmente los valores de frecuencia natural (F_n) y razón de amortiguamiento (ζ) obtenidos a partir de los ensayos experimentales, diferenciando entre los casos de persona en estado pasivo y persona simulada como carga inerte para cada uno de los sujetos evaluados. Además, se muestra una representación gráfica que permite comparar las frecuencias naturales de cada sujeto bajo tres condiciones específicas: sujeto en estado pasivo, sujeto simulado como carga inerte y estructura vacía.

Posteriormente, se presentan los resultados de las propiedades dinámicas de la persona, detallando los valores de masa (M), rigidez (K) y amortiguamiento (C) para cada sujeto cuando la estructura se modela como un sistema acoplado de dos grados de libertad (2GDL) y tres grados de libertad (3GDL). No se incluyen los resultados

de las propiedades dinámicas de la persona en el caso de un sistema acoplado de un grado de libertad (1GDL), ya que, en este escenario, la persona no se modela como un sistema MKC, sino únicamente como una masa impuesta, sin propiedades dinámicas de rigidez y amortiguamiento. Sin embargo, los resultados de comparación de los sistemas para los tres modelos acoplados (1GDL, 2GDL y 3GDL) en comparación con los datos experimentales se presentan en la tabla de correlación de FIT, la cual complementa este análisis. Dicha tabla permite evaluar cuantitativamente el grado de ajuste entre los datos experimentales y los modelos numéricos empleados en el estudio. En anexos se muestra gráficamente la comparación de dichos modelos.

por último, se presentan los resultados obtenidos mediante la implementación del modelo de retroalimentación en Simulink, evaluados para propiedades dinámicas promedio de los sujetos bajo las tres configuraciones experimentales del estudio. Este análisis permite examinar el comportamiento del sistema ante distintos retardos temporales (delay), comparando las respuestas experimentales y numéricas y evaluando su grado de concordancia mediante el índice de correlación FIT.

7.1 Datos antropométricos

Se registraron los datos antropométricos de los sujetos de prueba, incluyendo su masa corporal, altura, índice de masa corporal (IMC), género y edad. La siguiente tabla muestra los datos de cada sujeto.

Datos antropométricos de los sujetos de prueba						
Sujeto	Masa [Kg]	Altura [m]	IMC	Nivel de peso	Género	Edad [años]
Sujeto 1	78.00	1.850	22.790	Normal	Masculino	28
Sujeto 2	85.00	1.740	26.590	Sobrepeso	Masculino	23
Sujeto 3	54.50	1.560	22.350	Normal	Femenino	22
Sujeto 4	62.00	1.680	20.940	Normal	Masculino	22
Sujeto 5	61.00	1.730	20.650	Normal	Masculino	32
Sujeto 6	74.00	1.720	24.780	Normal	Masculino	22
Sujeto 7	68.00	1.650	24.610	Normal	Masculino	22

Tabla 7.1. Datos antropométricos de los sujetos de prueba.

7.2 Plantillas de presión

Sujeto 1

Se observa que en todas las configuraciones, la fuerza plantar total del sujeto 1 disminuye progresivamente desde el inicio hasta la mitad de la prueba, con una leve recuperación en la fase final. La Configuración 1 muestra los valores más altos de carga plantar total, mientras que la Configuración 3 presenta los valores más bajos, lo que sugiere una mayor influencia de las características dinámicas de la estructura en la distribución de la carga plantar.

Sujeto 1 - Fuerza plantar normalizada respecto al peso del sujeto									
	Configuración 1			Configuración 2			Configuración 3		
	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total
Inicio	0.574	0.789	1.363	0.457	0.754	1.210	0.485	0.614	1.099
Mitad	0.468	0.738	1.206	0.490	0.663	1.154	0.396	0.560	0.956
Final	0.501	0.753	1.254	0.478	0.645	1.123	0.427	0.546	0.969

Tabla 7.2. Resultados de cargas plantares para el sujeto 1 bajo todas las configuraciones.

Sujeto 2

Para el sujeto 2 se destaca que la configuración 1 presenta una carga plantar total más elevada en comparación con las otras configuraciones, mientras que la configuración 3 muestra valores más bajos. A diferencia del sujeto 1, la variación de la carga plantar total a lo largo del tiempo no es tan pronunciada, lo que indica una posible diferencia en la respuesta biomecánica del sujeto ante las variaciones estructurales.

Sujeto 2 - Fuerza plantar normalizada respecto al peso del sujeto									
	Configuración 1			Configuración 2			Configuración 3		
	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total
Inicio	0.743	0.672	1.415	0.746	0.666	1.412	0.628	0.543	1.171
Mitad	0.697	0.697	1.394	0.693	0.649	1.342	0.589	0.549	1.138
Final	0.718	0.659	1.377	0.749	0.673	1.422	0.607	0.569	1.175

Tabla 7.3. Resultados de cargas plantares para el sujeto 2 bajo todas las configuraciones.

Sujeto 3

Se observa en el sujeto 3 que bajo la configuración 1 presenta un incremento de la carga plantar en la mitad y final de la prueba, mientras que en la configuración 3 se mantiene más estable. La configuración 2 muestra valores intermedios, lo que podría indicar un comportamiento dinámico diferenciado de la estructura que influye en la distribución de carga del sujeto.

Sujeto 3 - Fuerza plantar normalizada respecto al peso del sujeto									
	Configuración 1			Configuración 2			Configuración 3		
	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total
Inicio	0.610	0.491	1.101	0.758	0.636	1.393	0.516	0.518	1.034
Mitad	0.724	0.791	1.515	0.700	0.655	1.354	0.612	0.553	1.165
Final	0.711	0.802	1.513	0.784	0.665	1.354	0.601	0.668	1.269

Tabla 7.4. Resultados de cargas plantares para el sujeto 3 bajo todas las configuraciones.

Sujeto 4

Se evidencia que, en la Configuración 1, la carga plantar del sujeto 4 disminuye en la mitad de la prueba y aumenta en la fase final. En la configuración 2, los valores son relativamente estables, mientras que en la configuración 3 se observa la menor carga plantar total. Esto podría estar asociado a la interacción del sujeto con las propiedades dinámicas de cada configuración estructural.

Sujeto 4 - Fuerza plantar normalizada respecto al peso del sujeto									
	Configuración 1			Configuración 2			Configuración 3		
	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total
Inicio	0.627	0.627	1.254	0.742	0.594	1.336	0.530	0.482	1.012
Mitad	0.522	0.522	1.044	0.750	0.594	1.344	0.441	0.482	1.0923
Final	0.730	0.590	1.320	0.669	0.598	1.266	0.617	0.485	1.102

Tabla 7.5. Resultados de cargas plantares para el sujeto 4 bajo todas las configuraciones.

Sujeto 5

Se nota que en la configuración 1 los valores de carga plantar del sujeto 5 son relativamente estables a lo largo de las tres fases, mientras que en la configuración 2 hay una disminución en la mitad de la prueba y una recuperación en la fase final. La configuración 3, en contraste, muestra valores consistentemente más bajos, lo que sugiere un menor impacto de la estructura sobre la distribución de carga plantar.

Sujeto 5 - Fuerza plantar normalizada respecto al peso del sujeto									
	Configuración 1			Configuración 2			Configuración 3		
	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total
Inicio	0.639	0.637	1.276	0.712	0.701	1.413	0.572	0.558	1.130
Mitad	0.625	0.626	1.251	0.654	0.644	1.298	0.589	0.574	1.163
Final	0.625	0.616	1.241	0.691	0.681	1.372	0.599	0.584	1.182

Tabla 7.6. Resultados de cargas plantares para el sujeto 5 bajo todas las configuraciones.

Sujeto 6

En los resultados de cargas plantares correspondientes al sujeto 6 en la configuración 1 se observa un incremento en la fase final, mientras que en la configuración 2 la carga plantar alcanza su punto máximo en la mitad de la prueba. La configuración 3 presenta los valores más bajos y una tendencia descendente.

Sujeto 6 - Fuerza plantar normalizada respecto al peso del sujeto									
	Configuración 1			Configuración 2			Configuración 3		
	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total
Inicio	0.597	0.579	1.176	0.619	0.552	1.171	0.507	0.490	0.996
Mitad	0.450	0.612	1.062	0.704	0.539	1.243	0.515	0.456	0.971
Final	0.687	0.569	1.256	0.620	0.483	1.109	0.581	0.408	0.991

Tabla 7.7. Resultados de cargas plantares para el sujeto 6 bajo todas las configuraciones.

Sujeto 7

Se aprecia que las cargas plantares del sujeto 7 en la configuración 1 muestran una tendencia creciente a lo largo de la prueba, mientras que en la configuración 2 los

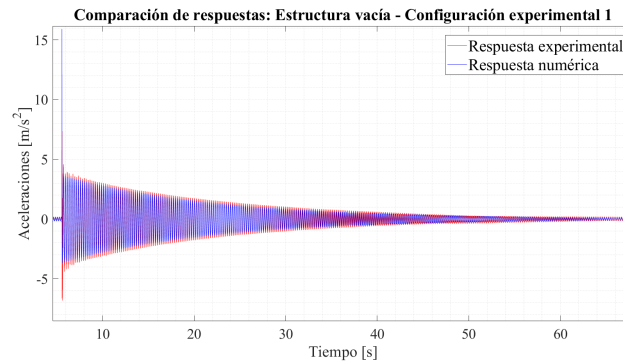
valores se mantienen relativamente estables. En la configuración 3, en cambio, se observa una disminución progresiva.

Sujeto 7 - Fuerza plantar normalizada respecto al peso del sujeto									
	Configuración 1			Configuración 2			Configuración 3		
	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total	Pie Izq.	Pie Der.	Total
Inicio	0.564	0.475	1.039	0.678	0.502	1.180	0.617	0.674	1.291
Mitad	0.622	0.495	1.117	0.670	0.493	1.163	0.689	0.417	1.106
Final	0.662	0.495	1.158	0.685	0.518	1.204	0.603	0.438	1.041

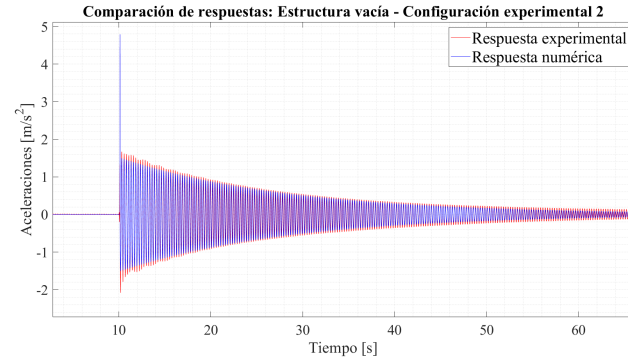
Tabla 7.8. Resultados de cargas plantares para el sujeto 7 bajo todas las configuraciones.

7.3 Propiedades dinámicas y modelos numéricos de estructuras vacías

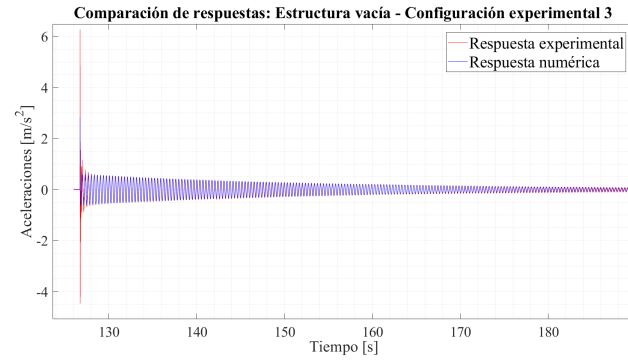
Con los resultados de las pruebas experimentales, se optimizaron los modelos numéricos correspondientes a la estructura vacía (1 GDL) para determinar sus propiedades dinámicas.



(a)



(b)



(c)

Figura 7.1. Comparación de respuestas experimentales y modelo numérico de la estructura vacía bajo: (a) Configuración 1, (b) Configuración 2, (c) Configuración 3.

Estructura vacía				
Configuración	Ms [Kg]	Ks [N/m]	Cs [N*s/m]	Fn [Hz]
Configuración experimental 1	312.247	286,928.003	36.820	4.82
Configuración experimental 2	255.345	157,235.926	27.802	3.95
Configuración experimental 3	429.000	143,000.000	27.410	2.91

Tabla 7.9. Propiedades dinámicas de la estructura vacía bajo las 3 configuraciones experimentales.

Estructura vacía	
Caso	FIT
Configuración experimental 1	0.732
Configuración experimental 2	0.852
Configuración experimental 3	0.910

Tabla 7.10. Índices de correlación FIT de modelos numéricos - estructura vacía.

7.4 Configuración 1 de la estructura de ensayos

7.4.1 Propiedades dinámicas experimentales

Resultados - Configuración experimental 1			
Sujeto	Caso	Fn [Hz]	ζ
1	Sujeto en estado pasivo	4.056	6.560 %
	Carga inerte	4.141	0.390 %
2	Sujeto en estado pasivo	3.904	6.320 %
	Carga inerte	4.118	0.560 %
3	Sujeto en estado pasivo	4.179	4.666 %
	Carga inerte	3.331	0.190 %
4	Sujeto en estado pasivo	4.148	3.490 %
	Carga inerte	4.331	0.590 %
5	Sujeto en estado pasivo	4.087	4.270 %
	Carga inerte	4.301	0.400 %
6	Sujeto en estado pasivo	4.087	3.290 %
	Carga inerte	4.209	0.430 %
7	Sujeto en estado pasivo	4.179	4.060 %
	Carga inerte	4.209	0.470 %

Tabla 7.11. Propiedades dinámicas experimentales del sistema acoplado Humano-Estructura bajo configuración experimental 1.

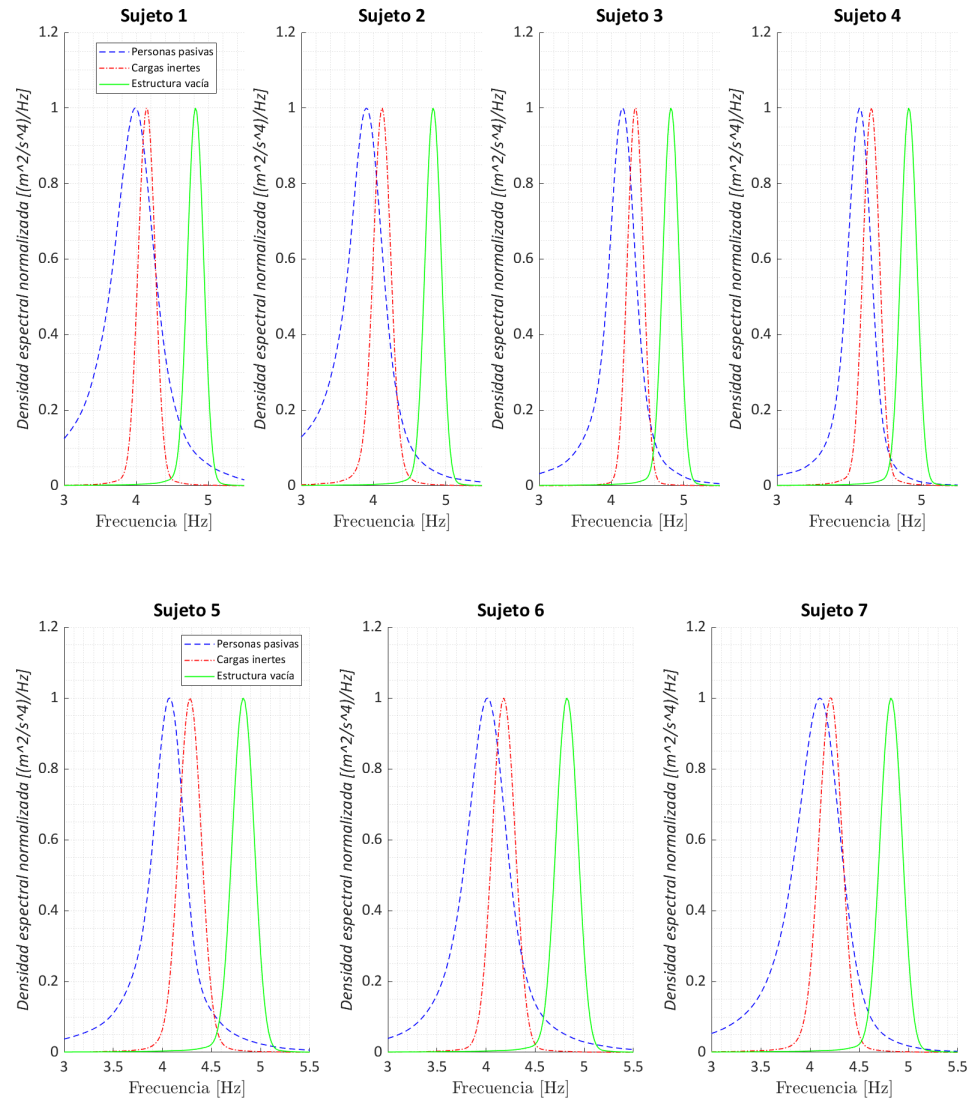


Figura 7.2. Comparación de frecuencias naturales bajo configuración experimental 1.

7.4.2 Modelos numéricos

Sistema acoplado de 2GDL

Configuración experimental 1 - Sistema acoplado 2GDL			
Sujeto	M [Kg]	K [N/m]	C [N*s/m]
1	78.000	57,248.81	1,438.906
2	85.000	71,179.51	1,243.453

Continúa en la siguiente página

Configuración experimental 1 (cont.)			
Sujeto	M [Kg]	K [N/m]	C [N*s/m]
3	54.500	48,741.59	716.933
4	62.000	64,499.22	902.504
5	61.000	51,120.12	648.806
6	74.000	65,392.39	994.708
7	68.000	70,381.74	1,041.955

Tabla 7.12. Propiedades dinámicas de los sujetos para el sistema de 2 GDL, bajo configuración experimental 1.

Sistema acoplado de 3GDL

Configuración experimental 1 - Sistema acoplado 3GDL									
Sujeto	M_total [Kg]	K1 [N/m]	K2 [N/m]	M1 [Kg]	M2 [Kg]	C1 [N*s/m]	C2 [N*s/m]	C_total [N*s/m]	K_total [N/m]
1	78.000	210,947.708	43,060.455	39.777	38.223	6,498.187	657.243	596.874	35,760.535
2	85.000	114,707.802	82,961.851	42.995	42.005	3,247.861	654.103	544.453	48,142.805
3	54.500	97,060.000	65,640.811	26.651	27.849	2,017.340	540.415	426.233	39,158.361
4	62.000	110,400.721	117,612.381	30.436	31.564	1,938.168	1,788.161	930.072	56,946.253
5	61.000	81,380.214	36,900.00	30.512	30.488	2,708.919	529.103	442.646	25,388.269
6	74.000	257,943.427	51,672.523	34.433	39.567	6,595.844	499.161	464.043	43,048.776
7	68.000	192,619.829	48,536.762	36.875	31.125	4,940.695	358.229	334.011	38,767.934

Tabla 7.13. Propiedades dinámicas de los sujetos para el sistema de 3 GDL, bajo configuración 1.

Índices de correlación

Configuración experimental 1			
FIT			
Caso	Sistema acoplado 1GDL	Sistema acoplado 2GDL	Sistema acoplado 3GDL
Sujeto 1	-9.582	0.798	0.833
Sujeto 2	-8.392	0.747	0.867
Sujeto 3	-8.266	0.821	0.783
Sujeto 4	-3.272	0.893	0.926
Sujeto 5	-7.817	0.760	0.763
Sujeto 6	-5.099	0.681	0.815
Sujeto 7	-4.060	0.704	0.958

Tabla 7.14. Índices de correlación FIT de modelos numéricos - configuración 1.

7.5 Configuración 2 de la estructura de ensayos

7.5.1 Propiedades dinámicas experimentales

Resultados - Configuración experimental 2			
Sujeto	Caso	Fn [Hz]	ζ
1	Sujeto en estado pasivo	3.357	5.050 %
	Carga inerte	3.479	0.200 %
2	Sujeto en estado pasivo	3.357	5.510 %
	Carga inerte	3.460	0.210 %
3	Sujeto en estado pasivo	3.540	1.710 %
	Carga inerte	3.580	0.200 %
4	Sujeto en estado pasivo	3.500	1.810 %
	Carga inerte	3.560	0.210 %
5	Sujeto en estado pasivo	3.418	1.640 %
	Carga inerte	3.520	0.200 %
6	Sujeto en estado pasivo	3.520	3.350 %
	Carga inerte	3.460	0.210 %
7	Sujeto en estado pasivo	3.557	2.570 %
	Carga inerte	3.607	0.210 %

Tabla 7.15. Propiedades dinámicas experimentales del sistema acoplado Humano-Estructura bajo configuración experimental 2.

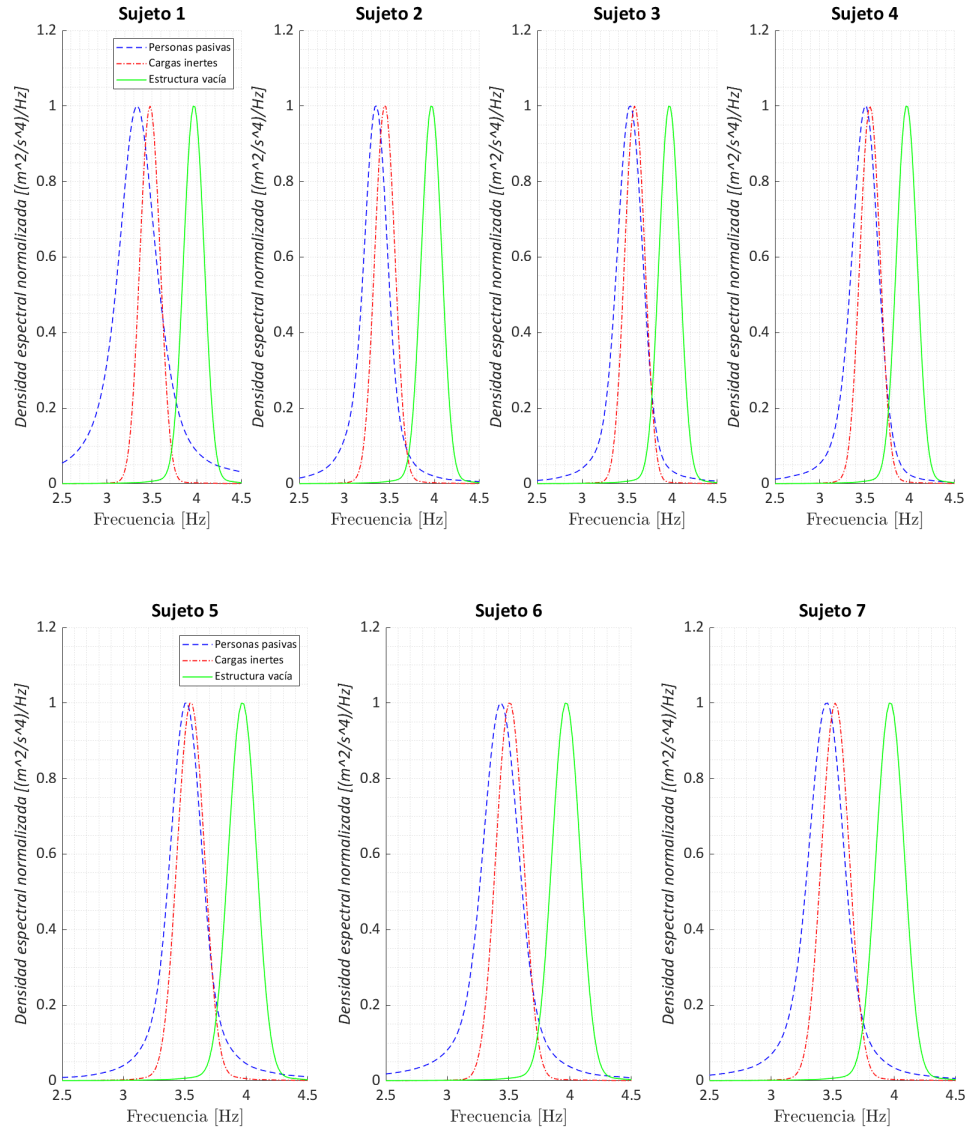


Figura 7.3. Comparación de frecuencias naturales bajo configuración experimental 2.

7.5.2 Modelos numéricos

Sistema acoplado de 2GDL

Configuración experimental 2 - Sistema acoplado 2GDL			
Sujeto	M [Kg]	K [N/m]	C [N*s/m]
1	78.000	48,940.821	1,523.974

Continúa en la siguiente página

Configuración experimental 2 - Sistema acoplado 2GDL (cont.)			
Sujeto	M [Kg]	K [N/m]	C [N*s/m]
2	85.000	92,636.847	1,797.927
3	54.500	53,377.270	1,228.030
4	62.000	80,830.363	1,432.711
5	61.000	68,005.003	855.430
6	74.000	93,002.441	1,201.513
7	68.000	73,508.350	1,768.403

Tabla 7.16. Propiedades dinámicas de los sujetos para el sistema de 2 GDL, bajo configuración 2.

Sistema acoplado de 3GDL

Configuración experimental 2 - Sistema acoplado 3GDL									
Sujeto	M_total [Kg]	K1 [N/m]	K2 [N/m]	M1 [Kg]	M2 [Kg]	C1 [N*s/m]	C2 [N*s/m]	C_total [N*s/m]	K_total [N/m]
1	78.000	151,883.658	53,656.966	41.905	36.095	7,437.189	1,672.967	1,365.747	39,649.662
2	85.000	211,100.266	147,841.666	51.017	33.983	6,478.322	4,327.481	2,594.422	86,948.368
3	54.500	97,888.282	118,478.887	35.667	18.333	3,675.579	2,916.776	1,626.254	53,601.916
4	62.000	125,419.318	76,769.318	42.791	19.209	4,622.248	2,420.231	1,588.490	47,622.098
5	61.000	145,619.369	116,344.750	41.997	19.003	7,359.704	4,424.745	2,763.372	64,673.167
6	74.000	96,582.198	184,788.868	51.118	22.882	4,433.146	4,098.242	2,129.560	63,429.816
7	68.000	117,042.092	96,456.859	42.386	25.614	6,330.568	4,613.801	2,668.768	52,878.539

Tabla 7.17. Propiedades dinámicas de los sujetos para el sistema de 3 GDL, bajo configuración experimental 2.

Índices de correlación

Configuración experimental 2			
FIT			
Caso	Sistema acoplado 1GDL	Sistema acoplado 2GDL	Sistema acoplado 3GDL
Sujeto 1	-4.366	0.739	0.921
Sujeto 2	-1.056	0.852	0.942
Sujeto 3	-0.253	0.827	0.891
Sujeto 4	-0.924	0.719	0.781
Sujeto 5	-0.678	0.752	0.771
Sujeto 6	-1.692	0.692	0.816
Sujeto 7	-1.267	0.713	0.915

Tabla 7.18. Índices de correlación FIT de modelos numéricos - configuración 2.

7.6 Configuración 3 de la estructura de ensayos

7.6.1 Propiedades dinámicas experimentales

Resultados - Configuración experimental 3			
Sujeto	Caso	Fn [Hz]	ζ
1	Sujeto en estado pasivo	2.840	1.180 %
	Carga inerte	2.880	0.160 %
2	Sujeto en estado pasivo	2.860	0.990 %
	Carga inerte	2.888	0.140 %
3	Sujeto en estado pasivo	2.860	0.760 %
	Carga inerte	2.910	0.190 %
4	Sujeto en estado pasivo	2.880	1.030 %
	Carga inerte	2.922	0.190 %
5	Sujeto en estado pasivo	2.880	1.350 %
	Carga inerte	2.920	0.100 %
6	Sujeto en estado pasivo	2.840	0.640 %
	Carga inerte	2.900	0.150 %
7	Sujeto en estado pasivo	2.880	0.760 %
	Carga inerte	2.900	0.140 %

Tabla 7.19. Propiedades dinámicas experimentales del sistema acoplado Humano-Estructura bajo configuración experimental 3.

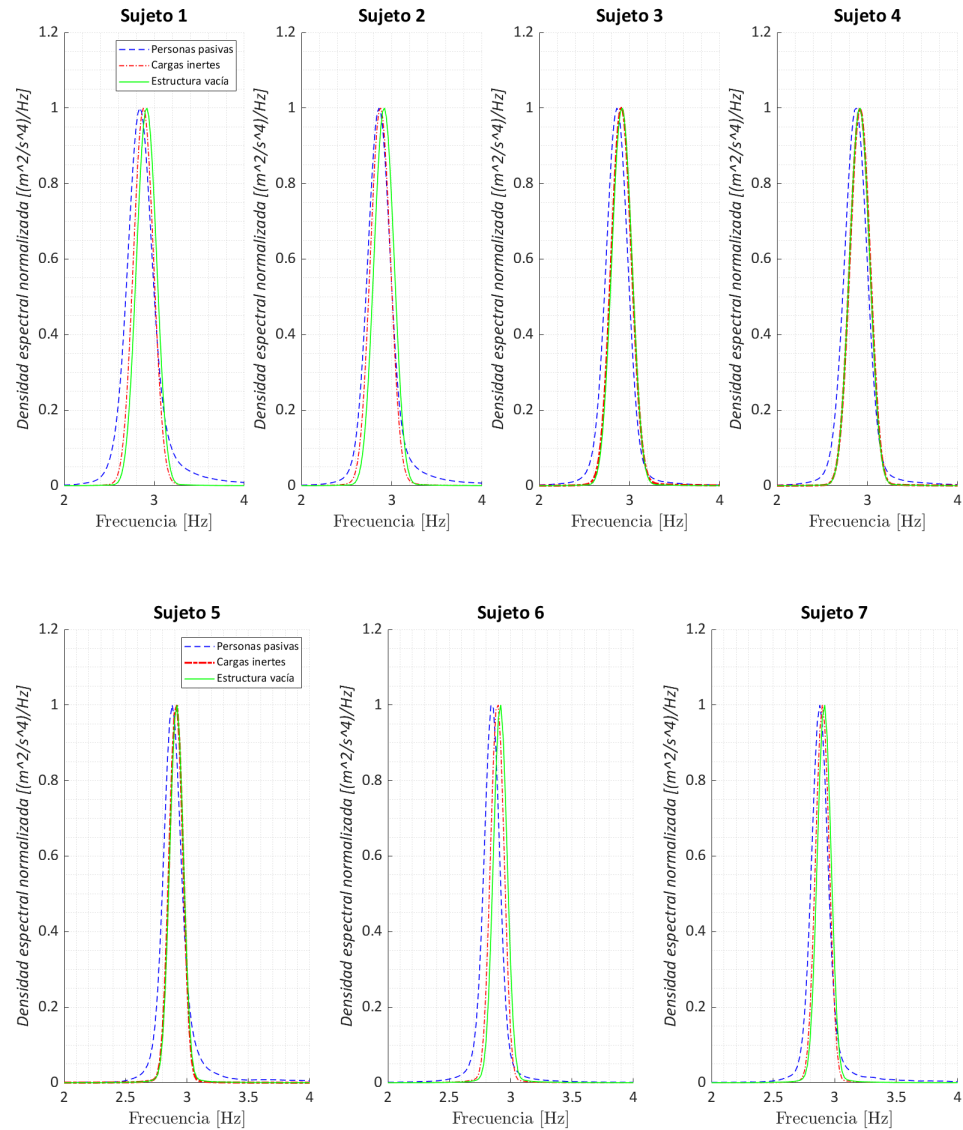


Figura 7.4. Comparación de frecuencias naturales bajo configuración experimental 3.

7.6.2 Modelos numéricos

Sistema acoplado de 2GDL

Configuración experimental 3 - Sistema acoplado 2GDL			
Sujeto	M [Kg]	K [N/m]	C [N*s/m]
1	78.000	539.180	166.275

Continúa en la siguiente página

Configuración experimental 3 - Sistema acoplado 2GDL (cont.)			
Sujeto	M [Kg]	K [N/m]	C [N*s/m]
2	85.000	393.000	146.216
3	54.500	409.460	107.000
4	62.000	235.355	108.959
5	71.000	245.158	103.701
6	74.000	465.210	127.496
7	68.000	412.843	133.102

Tabla 7.20. Propiedades dinámicas de los sujetos para el sistema de 2 GDL, bajo configuración 3.

Configuración experimental 3 - Sistema acoplado 3GDL									
Sujeto	M_total [Kg]	K1 [N/m]	K2 [N/m]	M1 [Kg]	M2 [Kg]	C1 [N*s/m]	C2 [N*s/m]	C_total [N*s/m]	K_total [N/m]
1	78.000	201,274.920	4,573.944	42.798	35.202	8,460.511	33,004.132	6,741.583	4,472.311
2	85.000	2,143.718	3,384.028	39.288	45.712	731.508	54,563.331	721.826	1,312.362
3	54.500	47,063.051	3,235.875	30.011	24.489	3,565.360	14,461.002	2,860.182	3,027.702
4	62.000	40,702.317	4,383.824	32.700	29.300	3,039.548	16,473.081	2,566.067	3,957.575
5	61.000	41,257.500	4,021.538	32.173	28.827	2,904.022	47,212.034	2,735.745	3,664.158
6	74.000	35,655.433	3,740.837	34.566	39.434	3,330.076	12,191.934	2,615.645	3,385.342
7	68.000	38,699.255	3,340.845	37.445	30.555	3,171.578	44,301.753	2,959.693	3,075.355

Tabla 7.21. Propiedades dinámicas de los sujetos para el sistema de 3 GDL, bajo configuración experimental 3.

Índices de correlación

Configuración experimental 3			
FIT			
Caso	Sistema acoplado 1GDL	Sistema acoplado 2GDL	Sistema acoplado 3GDL
Sujeto 1	-1.069	0.642	0.942
Sujeto 2	-1.041	0.868	0.922
Sujeto 3	-1.449	0.597	0.866
Sujeto 4	-1.721	0.612	0.945
Sujeto 5	-1.790	0.751	0.935
Sujeto 6	-1.019	0.682	0.943
Sujeto 7	-1.451	0.612	0.902

Tabla 7.22. Índices de correlación FIT de modelos numéricos - configuración 3.

7.7 Sistema con retroalimentación

Para la retroalimentación se seleccionaron, para cada una de las tres configuraciones, los valores promedios de rigidez, masa y amortiguamiento obtenidos de los sujetos, para las personas modelada como 1 GDL y 2 GDL. Con dichos parámetros se desarrolló un modelo en Simulink basado en retroalimentación, lo que permitió comparar las respuestas en aceleración del sistema al aplicar la retroalimentación con los resultados obtenidos del sistema acoplado completo. En este análisis se consideraron dos casos: en el primero se modeló a la persona como un sistema de 1 grado de libertad (GDL) y se comparó con el sistema acoplado de 2 GDL; en el segundo caso se representó a la persona como un sistema de 2 GDL y se comparó con el sistema acoplado de 3 GDL. Se determinaron los valores de amortiguamiento y la frecuencia natural para las tres configuraciones, evaluando el efecto de diferentes valores de retardo (delay).

La siguiente tabla presenta la variación de los parámetros dinámicos de frecuencia natural y razón de amortiguamiento en función del delay utilizado en la retroalimentación. Donde ζ_1 denota la razón de amortiguamiento del modelo numérico acoplado (configurado a 2 GDL o 3 GDL); ζ_2 y F_n representan, respectivamente, la razón de amortiguamiento y la frecuencia natural del sistema con retroalimentación, en el cual la persona se modela como 1 GDL o 2 GDL; y FIT indica el grado de similitud entre la señal obtenida del modelo numérico y la generada mediante el sistema de retroalimentación.

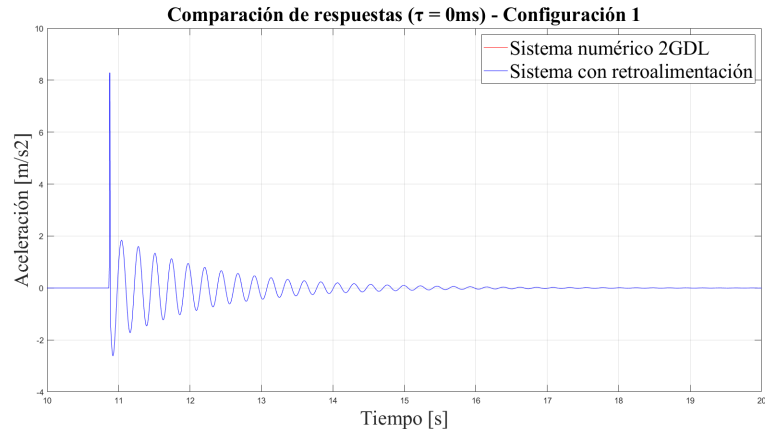
Comparación respuestas - Persona como 1GDL					Comparación respuestas - Persona como 2GDL				
Configuración 1					Configuración 1				
Delay [ms]	ζ_1	ζ_2	F _n [Hz]	FIT	Delay [ms]	ζ_1	ζ_2	F _n [Hz]	FIT
0	4.890 %	4.890 %	4.087	1.000	0	2.740 %	2.740 %	4.301	1.000
1	4.890 %	5.200 %	4.087	0.950	1	2.740 %	3.000 %	4.301	0.932
5	4.890 %	6.470 %	4.087	0.780	5	2.740 %	4.080 %	4.331	0.724
10	4.890 %	8.120 %	4.148	0.610	10	2.740 %	5.480 %	4.331	0.550
40	4.890 %	4.280 %	5.887	-0.692	40	2.740 %	14.920 %	6.375	0.015

Configuración 2					Configuración 2				
Delay [ms]	ζ_1	ζ_2	F _n [Hz]	FIT	Delay [ms]	ζ_1	ζ_2	F _n [Hz]	FIT
0	1.890 %	1.890 %	3.445	1.000	0	1.360 %	1.360 %	3.599	1.000
1	1.890 %	2.100 %	3.445	0.935	1	1.360 %	1.551 %	3.599	0.928
5	1.890 %	2.940 %	3.445	0.730	5	1.360 %	2.340 %	3.599	0.707
10	1.890 %	3.990 %	3.445	0.558	10	1.360 %	3.320 %	3.599	0.527
40	1.890 %	11.510 %	3.599	0.116	40	1.360 %	9.380 %	3.752	0.133

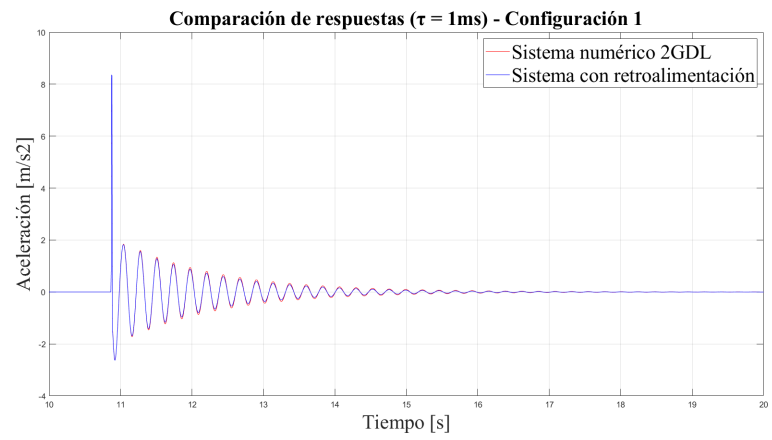
Configuración 3					Configuración 3				
Delay [ms]	ζ_1	ζ_2	F _n [Hz]	FIT	Delay [ms]	ζ_1	ζ_2	F _n [Hz]	FIT
0	0.910 %	0.910 %	2.898	1.000	0	1.110 %	1.110 %	2.745	1.000
1	0.910 %	0.910 %	2.898	0.995	1	1.110 %	1.210 %	2.745	0.967
5	0.910 %	0.900 %	2.898	0.976	5	1.110 %	1.600 %	2.745	0.850
10	0.910 %	0.890 %	2.898	0.952	10	1.110 %	2.080 %	2.745	0.729
40	0.910 %	0.710 %	2.898	0.800	40	1.110 %	4.880 %	2.806	0.320

Tabla 7.23. Comparación de parámetros dinámicos y respuestas en Aceleración para cada configuración y delays.

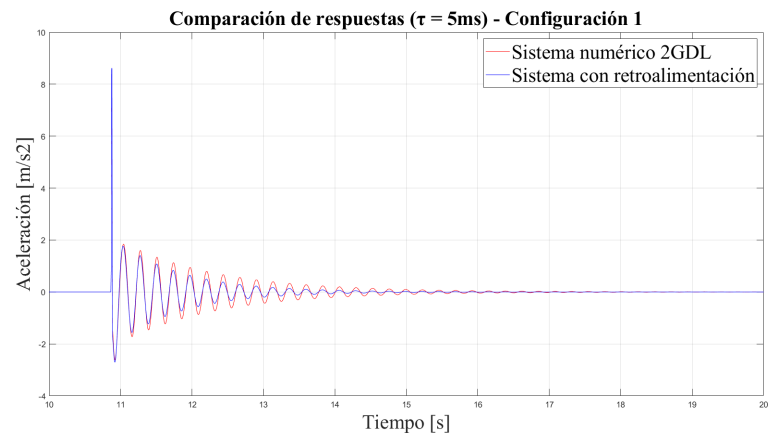
En la siguiente figura se observa la variación en la razón de amortiguamiento bajo la configuración 1.



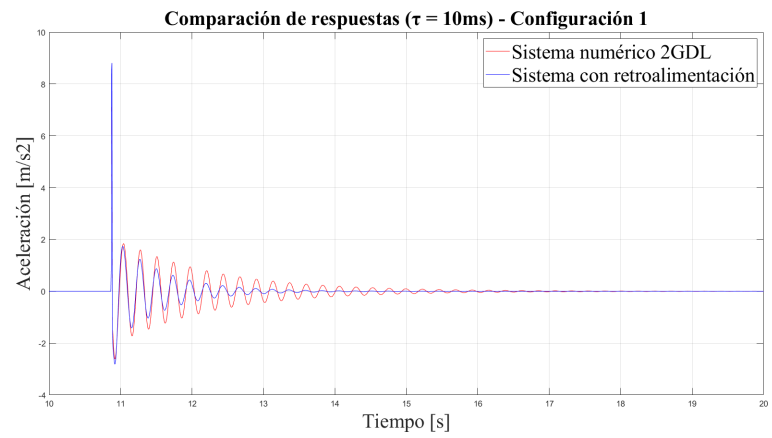
(a)



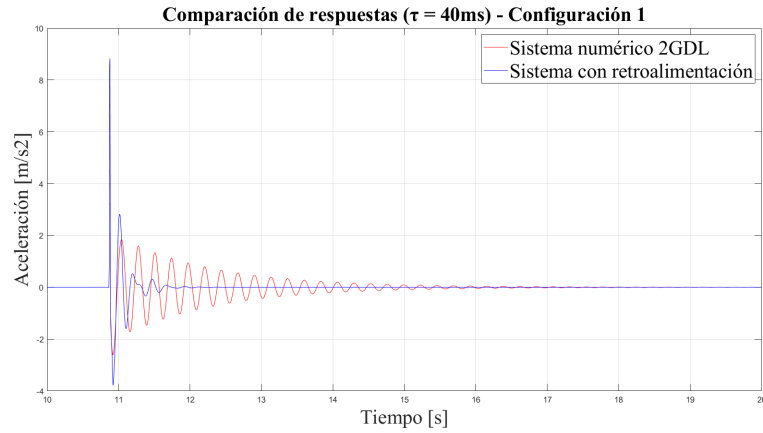
(b)



(c)



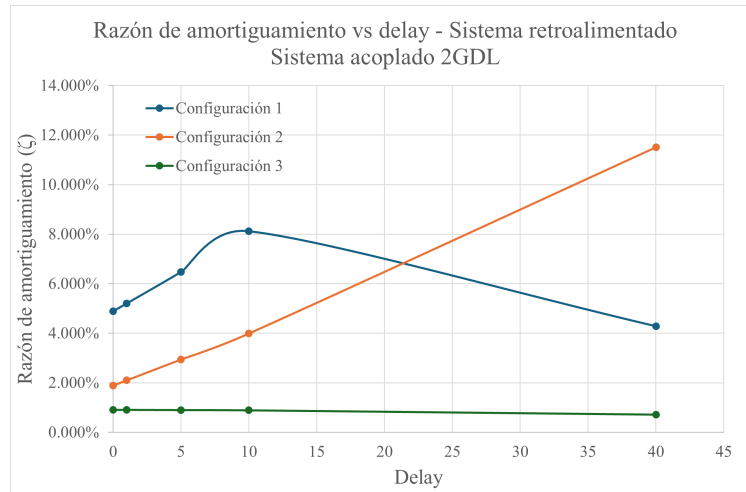
(d)



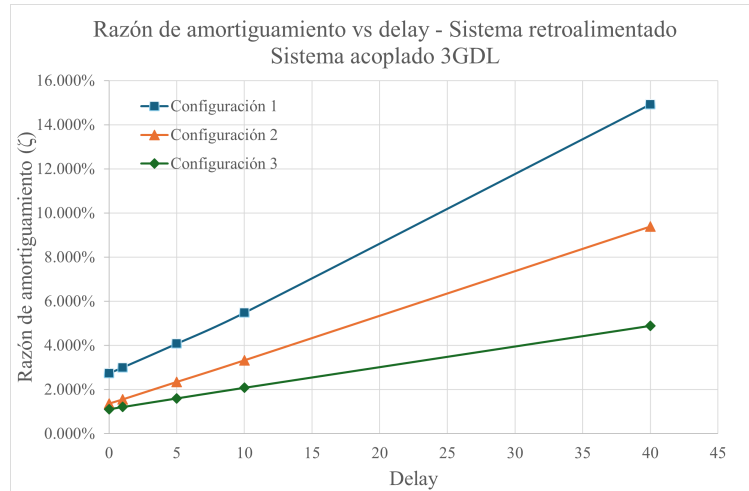
(e)

Figura 7.5. Comparación de las respuestas numéricas y mediante retroalimentación, bajo configuración 1 con valores de delay de (a) 0 ms, (b) 1 ms, (c) 5 ms, (d) 10 ms y (e) 40 ms.

A continuación se representa gráficamente la variación de la razón de amortiguamiento para las 3 configuraciones considerando al sujeto como un sistema de 1 GDL y 2 GDL.



(a)



(b)

Figura 7.6. Variación de la razón de amortiguamiento en relación con el delay para (a) sistema acoplado de 2 GDL, (b) sistema acoplado de 3GDL.

7.8 Implementación en SHTR

Como método de validación, se llevó a cabo una prueba en la plataforma vibrante para evaluar la SHTR. En dicha prueba se utilizó como entrada la fuerza obtenida experimentalmente mediante la celda de carga. Se seleccionó aleatoriamente a un sujeto (en este caso, el sujeto 2) para determinar, a través de la SHTR, el delay real de la simulación y analizar la variación en la respuesta experimental. Se utilizaron además las propiedades dinámicas de la estructura bajo la configuración 3. Las imágenes siguientes muestran la comparación entre la aceleración registrada experimentalmente y la obtenida mediante la SHTR, así como el retraso (delay) existente entre la señal enviada a la mesa vibratoria (referencia) y la señal medida.

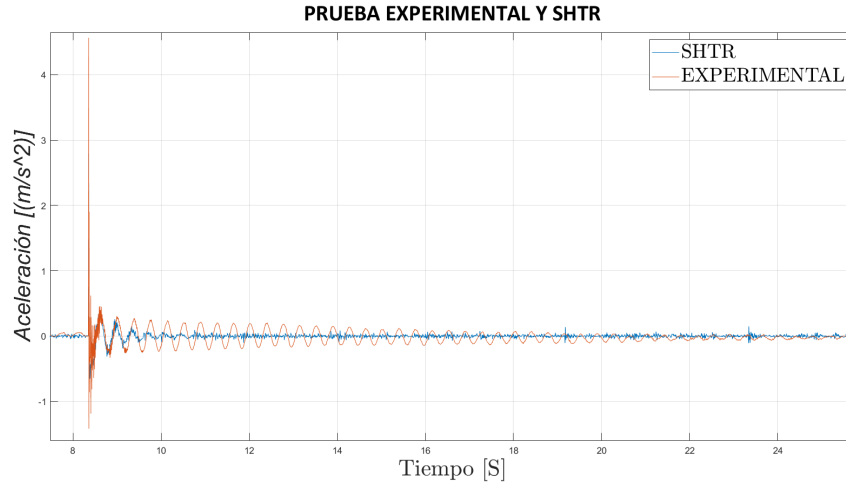


Figura 7.7. Comparación de respuestas experimental y SHTR para el sujeto 2 bajo configuración 3.

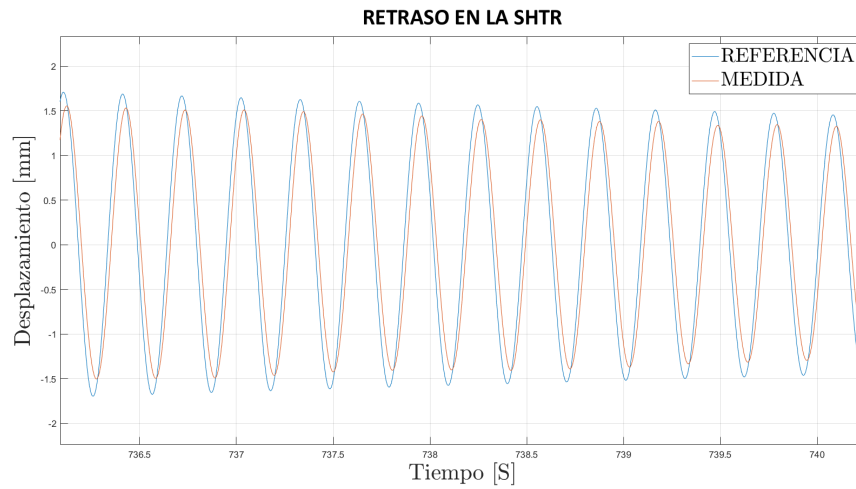


Figura 7.8. Delay en la SHTR.

Se determinó que el delay de la simulación es de 37.35 ms, lo cual corrobora las diferencias observadas en las respuestas en aceleración. En concreto, se obtuvo un valor de FIT de 0.0598 y una razón de amortiguamiento del 8.84 %, casi nueve veces mayor que la razón experimental del 0.99 % registrada para el sujeto 2 en la configuración experimental 3.

8. CONCLUSIONES

Este trabajo de grado ha permitido evaluar la Interacción Humano-Estructura (IHE) pasiva bajo distintas configuraciones estructurales, destacando el impacto de las propiedades dinámicas de la estructura en la respuesta biomecánica de los ocupantes. Se ha evidenciado que la presencia humana modifica significativamente la rigidez y el amortiguamiento del sistema, lo que subraya la importancia de considerar modelos más representativos que capturen estos efectos en el análisis estructural.

Un hallazgo clave de la investigación es la diferencia en la respuesta humana ante configuraciones estructurales con distintas frecuencias naturales. En la configuración 3, donde la frecuencia natural de la estructura es considerablemente más baja (por debajo de 3 Hz), los sujetos de prueba actuaron como un péndulo invertido, oscilando sutilmente para mantener el equilibrio, lo que se ve reflejado en las rigideces más bajas de las personas en esta configuración. Cuando la frecuencia natural de la estructura disminuye, el cuerpo humano reacciona ajustando su centro de gravedad mediante movimientos compensatorios, lo que reduce la rigidez efectiva del sistema acoplado.

Este fenómeno se evidencia en los datos obtenidos con las plantillas de presión, que muestran que, en la configuración 3, la fuerza plantar promedio de los sujetos se redujo entre un 15-20 % respecto a las configuraciones 1 y 2. Esta disminución se debe a que, al presentarse oscilaciones posturales más marcadas, la distribución de carga plantar varía constantemente, reduciendo la presión vertical efectiva sobre la superficie de apoyo. En otras palabras, debido a la menor estabilidad estructural, los ocupantes no ejercen una carga completamente vertical sobre la estructura, sino que distribuyen su peso de forma más dispersa a través de movimientos de balanceo, lo que afecta la interacción dinámica entre el sujeto y la estructura. Investigaciones llevadas a cabo por Ahmadi et al. (2018); Leal-Junior et al. (2019) demuestran que los pequeños ajustes en la postura de los ocupantes, incluso cuando se encuentran estáticos, tienen un impacto medible en las respuestas vibratorias de las estructuras.

En cambio, en las configuraciones 1 y 2, donde la frecuencia natural de la estructura es mayor, la mayor rigidez del sistema proporciona un soporte más estable, lo que reduce la necesidad de ajustes posturales. Como consecuencia, la distribución de carga plantar es más uniforme y constante, reflejando una mayor transmisión de carga vertical directa sobre la estructura y disminuyendo el efecto del balanceo corporal en la rigidez efectiva del sistema acoplado.

Por otro lado, los resultados obtenidos de los modelos de Interacción acoplada Humano-Estructura, uno de 2 grados de libertad (2GDL) y otro de 3 grados de libertad (3GDL), muestran que el modelo 3GDL presenta un ajuste superior con respecto a los datos experimentales. El modelo 3GDL presentó un índice de correlación (FIT) entre un 10 % y un 15 % superior al del modelo 2GDL, lo que evidencia que la representación con tres grados de libertad captura de manera más precisa la dinámica del sistema Humano-Estructura.

Desde una perspectiva numérica, se identificaron limitaciones en la Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR) debido a la alta sensibilidad de la respuesta estructural al retardo en la retroalimentación (delay). Se encontró que, cuando el delay supera los 10 ms, la razón de amortiguamiento del sistema se ve alterada de forma significativa, introduciendo un margen de error considerable en la simulación. El delay inherente en la SHTR depende tanto del hardware utilizado como de la eficiencia del modelo numérico. Esto significa que, si las pruebas se realizan en un sistema incapaz de gestionar retardos inferiores a 10 ms, la simulación no podrá replicar con precisión la disipación de energía del sistema, comprometiendo su capacidad para modelar interacciones dinámicas complejas como la Interacción Humano-Estructura (IHE). Por ejemplo, Han y Huang (2021) desarrollaron un modelo de simulación híbrida en tiempo real en el que se destaca cómo la existencia de un retardo en la retroalimentación puede alterar la respuesta del sistema, modificando la estimación de aceleraciones y amortiguamiento, lo que a su vez compromete la correlación entre la simulación y las mediciones experimentales.

Esta investigación reafirma la importancia de modelar la IHE desde un enfoque dinámico y estocástico, incorporando la variabilidad antropométrica y las limitaciones inherentes a la simulación numérica. Los resultados obtenidos destacan la necesidad

de considerar estos factores para una representación más precisa de la respuesta estructural en presencia de ocupantes.

9. PERSPECTIVAS

La presente investigación ha contribuido de manera significativa al avance en la comprensión y modelación de la Interacción Humano-Estructura pasiva mediante la implementación de la Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR). Los hallazgos obtenidos evidencian la importancia de considerar los efectos dinámicos y la variabilidad antropométrica en la evaluación de sistemas estructurales, lo que abre diversas líneas de mejora y extensión que se detallan a continuación.

Uno de los aspectos críticos identificados en este estudio es la alta sensibilidad del sistema al retardo (delay) en la retroalimentación. Los resultados experimentales indican que, cuando el delay supera los 10 ms, la razón de amortiguamiento simulada se incrementa de forma significativa, lo que afecta la fidelidad con la que se representa la disipación de energía del sistema acoplado. Esta limitación, atribuible tanto a la capacidad del hardware empleado como a la eficiencia del modelo numérico, resalta la necesidad de optimizar los elementos de la cadena de simulación. En este contexto, futuras investigaciones podrían enfocarse en la integración de sistemas de comunicación y procesamiento de alta velocidad que permitan gestionar retardos inferiores, garantizando una mayor concordancia entre la simulación y la respuesta experimental.

Aunque el presente estudio se ha centrado en la IHE pasiva, los resultados obtenidos sugieren que la variabilidad antropométrica y las adaptaciones posturales son factores críticos que inciden en la respuesta dinámica del sistema. Futuras investigaciones podrían incorporar modelos estocásticos o biomecánicos avanzados que consideren la heterogeneidad en las características físicas y las estrategias de control postural de los ocupantes. De esta manera, se lograría una representación más realista y detallada de la interacción, lo que permitiría un análisis más profundo de fenómenos como la redistribución de la carga plantar y los movimientos compensatorios en estructuras con baja frecuencia natural.

El desarrollo de la SHTR en este trabajo sienta las bases para la incorporación de tecnologías emergentes que podrían optimizar su desempeño. La implementación de

sensores de alta precisión, actuadores de respuesta rápida y sistemas de comunicación de baja latencia son elementos que, en conjunto, podrían reducir los delays y mejorar la sincronización entre la simulación y la respuesta física. Asimismo, la integración de plataformas de realidad virtual o aumentada podría facilitar la visualización en tiempo real de la Interacción Humano-Estructura, enriqueciendo el análisis y la interpretación de los datos experimentales. Estas innovaciones tecnológicas no solo mejorarían la capacidad predictiva de la simulación, sino que también contribuirían a establecer nuevos estándares en el diseño y la validación de infraestructuras modernas.

Aunque en el presente estudio se aplicó la SHTR en estructuras con alta rigidez, se plantea que esta metodología podría resultar especialmente efectiva en el análisis de estructuras menos rígidas. En sistemas con menor rigidez, la influencia del delay en la retroalimentación tiende a ser menos pronunciada, lo que permitiría que la SHTR reproduzca con mayor fidelidad la disipación de energía y la interacción dinámica entre el ocupante y la estructura. Además, estructuras más flexibles suelen responder de manera más sensible a las fuerzas de interacción, facilitando la calibración y validación de los modelos numéricos. En este contexto, futuras investigaciones podrían centrarse en aplicar y optimizar la SHTR en infraestructuras con propiedades mecánicas variadas, ampliando así el alcance y la utilidad de esta herramienta en el diseño y evaluación de sistemas estructurales modernos.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmadi, E., Caprani, C., Živanović, S., Evans, N., y Heidarpour, A. (2018). A framework for quantification of human-structure interaction in vertical direction. *Journal of Sound and Vibration*. Descargado de https://consensus.app/papers/framework-quantification-humanstructure-interaction-ahmadi/c6ccf9e07d33597d9d210c6bd1e26e91/?utm_source=chatgpt doi: 10.1016/J.JSV.2018.06.054
- Amirouche, F. M. L., y Xie, X. (2001). Modeling and simulation of human response to whole-body vibration using biodynamic models. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 3, 5–16. doi: 10.1007/s10237-001-0016-1
- Andriacchi, T., Ogle, J., y Galante, J. (1977). Walking speed as a basis for normal and abnormal gait measurements. *Journal of biomechanics*, 10(4), 261–268.
- Aramayo, A., y Martel, E. (s.f.). Vibración lateral sincronizada en puentes peatonales. cambio de paradigma en el análisis de vibraciones inducidas por peatones.
- Bachmann, H. (1995). *Vibration problems in structures: practical guidelines*. Springer Science & Business Media.
- Berardengo, M., Drago, L., Manzoni, S., y Vanali, M. (2019). An approach to predict human-structure interaction in the case of staircases. *Archive of Applied Mechanics*, 1-25. Descargado de https://consensus.app/papers/approach-predict-humanstructure-interaction-case-berardengo/916eeebdc36b5731a4c929d14c4721e2/?utm_source=chatgpt doi: 10.1007/S00419-019-01569-2
- Blanchard, J., Davies, B., y Smith, J. (1977). Design criteria and analysis for dynamic loading of footbridges. En *Proceeding of a symposium on dynamic behaviour of bridges at the transport and road research laboratory, crowthorne, berkshire, england, may 19, 1977*.

- Busca, G., Cappellini, A., Manzoni, S., Tarabini, M., y Vanali, M. (2014). Quantification of changes in modal parameters due to the presence of passive people on a slender structure. *Journal of Sound and Vibration*, 333(21), 5641–5652.
- Castellanos-Toro, S., Marmolejo, M., Marulanda, J., Cruz, A., y Thomson, P. (2018). Frequencies and damping ratios of bridges through operational modal analysis using smartphones. *Construction and Building Materials*, 188, 490–504.
- Cavanagh, P. R., y Gregor, R. J. (1975). Knee joint torque during the swing phase of normal treadmill walking. *Journal of Biomechanics*, 8(5), 337–344.
- Chen, W., Lee, S.-J., y Lee, P. (2015). Plantar pressure relief under the metatarsal heads: therapeutic insole design using three-dimensional finite element model of the foot. *Journal of biomechanics*, 48 4, 659-65. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.12.043
- Dallard, P., Fitzpatrick, A. J., Flint, A., Low, A., Smith, R., Willford, M., y Roche, M. (2001). The london millennium footbridge: Pedestrian-induced lateral vibration. *Journal of Bridge Engineering*, 6(6), 412-417. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:6(412)
- Galbraith, F., y Barton, M. (1970). Ground loading from footsteps. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 48(5B), 1288–1292.
- García-Diéguez, M., Racic, V., y Zapico-Valle, J. L. (2021). Complete statistical approach to modelling variable pedestrian forces induced on rigid surfaces. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 159, 107800.
- Goggins, J., Morrongiello, B., y Griffin, M. J. (2021). Directional transmissibility of seated body apparent mass and seat-to-head transmissibility. *Journal of Sound and Vibration*, 516, 116175.
- Gómez, D., Thomson, P., García, J. J., Cruz, A., Marmolejo, M., Chamorro, Á., y Gómez, S. (s.f.). Caracterización de la marcha humana cuando se presentan fenómenos de interacción humano-estructura (ihe).
- Grieve, D., y Gear, R. J. (1966). The relationships between length of stride, step frequency, time of swing and speed of walking for children and adults. *Ergonomics*, 9(5), 379–399.

- Han, Z. (2018). Research on dynamics modeling based on human-structure interaction. Descargado de https://consensus.app/papers/research-dynamics-modeling-based-humanstructure-han/7e75306ac4a450608607076c403cc501/?utm_source=chatgpt doi: 10.23977/CSIC.2018.0941
- Han, Z., y Huang, S. (2021). The influence of human-structure interaction on structural dynamic properties. En *Iop conference series: Earth and environmental science* (Vol. 787). Descargado de https://consensus.app/papers/influence-humanstructure-interaction-structural-han/601bf7a5db7559c8b0bb1c5b2ff9d269/?utm_source=chatgpt doi: 10.1088/1755-1315/787/1/012124
- Huang, Q., Chen, J., Mirjalili, V., y He, X. (2020). Biodynamic response of seated occupants exposed to vertical whole-body vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 82, 103062.
- Jacobs, N., Skorecki, J., y Charnley, J. (1972). Analysis of the vertical component of force in normal and pathological gait. *Journal of Biomechanics*, 5(1), 11–34.
- Joint Working Group. (2005). *Guidelines for Modeling Human-Structure Interaction in Civil Engineering* (Inf. Téc.). Reino Unido: Institution of Structural Engineers.
- Kerr, S., y Bishop, N. (2001). Human induced loading on flexible staircases. *Engineering structures*, 23(1), 37–45.
- Kim, W., Kim, N., Lyons, J., y Nam, C. (2020). Factors affecting trust in high-vulnerability human-robot interaction contexts: A structural equation modelling approach. *Applied Ergonomics*, 85, 103056. Descargado de https://consensus.app/papers/factors-affecting-trust-in-highvulnerability-humanrobot-kim-kim/802f6f0010a15557a2e455d8743791a2/?utm_source=chatgpt doi: 10.1016/j.apergo.2020.103056
- Kim, Y., Chen, J., Zhang, Y., y Huang, Q. (2022). Experimental parametric study of structure-occupant dynamic interaction subjected to heel-drop impacts. *Engineering Structures*, 254, 114080.
- Lamoreux, L. W. (1971). Kinematic measurements in the study of human walking. *Bull Prosthet Res*, 10(15), 3–84.

- Leal-Junior, A., Díaz, C., Marques, C., Pontes, M., y Frizera, A. (2019). 3d-printed pof insole: Development and applications of a low-cost, highly customizable device for plantar pressure and ground reaction forces monitoring. *Optics Laser Technology*. doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2019.03.035
- Ma, e. a. (2022). Modeling human-structure interaction in complex systems using neural networks. *Computers and Structures*. Descargado de https://consensus.app/papers/modeling-human-structure-interaction-complex-ma/94f9e30712e55434aa9a8b2fae91c8f3/?utm_source=chatgpt doi: 10.1016/j.compstruc.2022.103621
- Malloy, R. (2018). Development of procedures for real-time hybrid simulation and testing of a buckling-restrained braced structure. Descargado de https://consensus.app/papers/development-of-procedures-for-realtime-hybrid-simulation-malloy/592202a41f8c5ae3abd8192c9ae60a60/?utm_source=chatgpt (Accessed: 2025-03-05)
- Matsumoto, Y., Sato, S., Nishioka, T., y Shiojiri, H. (1972). A study on dynamic design of pedestrian over-bridges tn consideration of characteristics of pedetrians. En *Proceedings of the japan society of civil engineers* (Vol. 1972, pp. 63–70).
- Murray, M. P., Kory, R. C., Clarkson, B. H., y Sepic, S. (1966). Comparison of free and fast speed walking patterns of normal men. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 45(1), 8–24.
- Ortiz, A. R., Gómez, D., y Thomson, P. (2009). Caracterización del efecto de la interacción humano-estructura en el estadio olímpico en cali, colombia. *Ingeniería e Investigación*, 29(1), 13–23.
- Ortiz, A. R., Gómez, D., y Thomson, P. (2012). Efectos de la interacción humano-estructura en las propiedades dinámicas de una tribuna. *Ingeniería y Competitividad*, 14(1), 63–73.
- Ortíz, A. R., Marulanda, J., y Thomson, P. (2007). Caracterización del comportamiento dinámico de la tribuna occidental del estadio pascual guerrero durante un concierto musical. *Ingeniería y Competitividad*, 9(2), 33–48.

- Pedersen, L. (2011). Interaction between structures and their occupants. En *Modal analysis topics, volume 3: Proceedings of the 29th imac, a conference on structural dynamics, 2011* (pp. 445–450).
- Rainer, J., Pernica, G., y Allen, D. E. (1988). Dynamic loading and response of footbridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 15(1), 66–71.
- Reglamento colombiano de construcción sismo resistente nsr-10*. (2010). Bogotá, Colombia: Congreso de Colombia. (Norma Técnica Colombiana sobre Construcción Sismo Resistente)
- Sachse, R., Pavic, A., y Reynolds, P. (2003). Human-structure dynamic interaction in civil engineering dynamics: A literature review. *Shock and Vibration Digest*, 35(1), 3–18.
- Salyards, K. A., y Noss, N. C. (2014). Experimental evaluation of the influence of human-structure interaction for vibration serviceability. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(3), 458–465.
- Sánchez, J. A., Gómez, D., y Thomson, P. (2013). Análisis de la interacción humano-estructura en puentes peatonales de santiago de cali. *Dyna*, 80(177), 86–94.
- Shahabpoor, E., Pavic, A., y Racic, V. (2017). Comparison between simplified and detailed methods of modeling walking excitation forces on footbridges. *Journal of Sound and Vibration*, 410, 39–56.
- Subashi, G., Griffin, M. J., y Rouillard, V. (2019). Modelling resonances of the standing body exposed to vertical whole-body vibration: Effects of posture. *Journal of Sound and Vibration*, 443, 561–577.
- Tadeu, A., Romero, A., Dias, S., Pedro, F., Brett, M., Serra, M., ... Bandeira, F. (2022). Vibration serviceability assessment of the world's longest suspended footbridge in 2020. *Structures*, 44, 457–475. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012422006683> doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.015>
- Van Nimmen, K., Pavic, A., y Van den Broeck, P. (2021). A simplified method to account for vertical human-structure interaction. En *Structures* (Vol. 32, pp. 2004–2019).

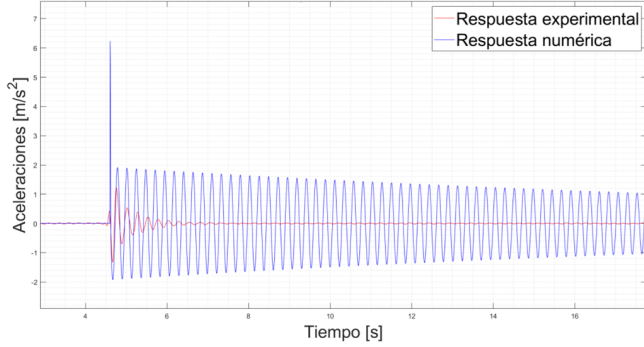
- Van Nimmen, K., Reynders, E., Lombaert, G., y De Roeck, G. (2021). Identification and modelling of pedestrian-induced structural vibrations: A review. *Journal of Sound and Vibration*, 491, 115741. doi: 10.1016/j.jsv.2020.115741
- Wei, L., y Griffin, M. (1998). The biodynamic response of the seated human body to vibration and the influence of posture and vibration magnitude. *Journal of Sound and Vibration*, 215(4), 793–812. doi: 10.1006/jsvi.1998.1606
- Wheeler, J. E. (1982). Prediction and control of pedestrian-induced vibration in footbridges. *Journal of the structural division*, 108(9), 2045–2065.
- Xiong, J., Chen, J., y Caprani, C. (2021). Spectral analysis of human-structure interaction during crowd jumping. *Applied Mathematical Modelling*, 89, 610–626. Descargado de [https://consensus.app/papers/analysis-humanstructure-interaction-crowd-jumping-xiong/2b9f4ef038855457a97a7ff0406a6ee3/](https://consensus.app/papers/analysis-humanstructure-interaction-crowd-jumping-xiong/2b9f4ef038855457a97a7ff0406a6ee3/?utm_source=chatgpt) doi: 10.1016/j.apm.2020.07.030
- Živanović, S., Pavic, A., y Reynolds, P. (2005a). Human–structure dynamic interaction in footbridges. En *Proceedings of the institution of civil engineers-bridge engineering* (Vol. 158, pp. 165–177).
- Živanović, S., Pavic, A., y Reynolds, P. (2005b). Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of sound and vibration*, 279(1-2), 1–74.

11. ANEXOS

11.1 Modelos numéricos

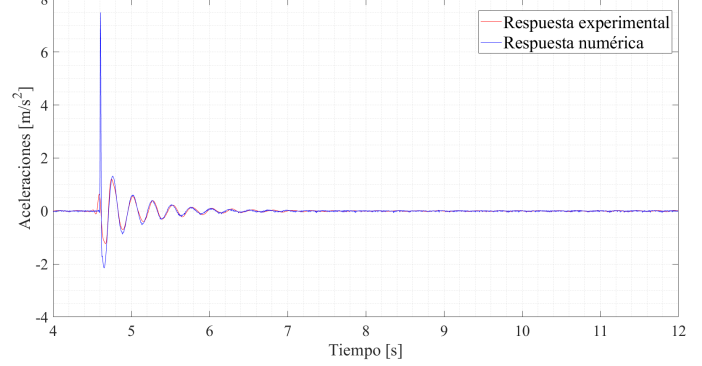
11.1.1 Sujeto 1

Comparación de respuestas: Sujeto 1 - Configuración experimental 1 (Sistema 1GDL)



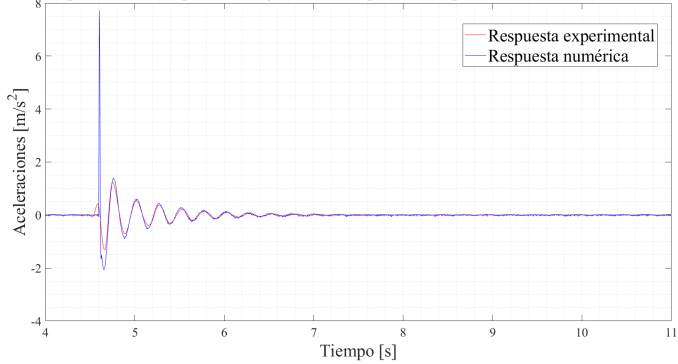
(a)

Comparación de respuestas: Sujeto 1 - Configuración experimental 1 (Sistema 2GDL)



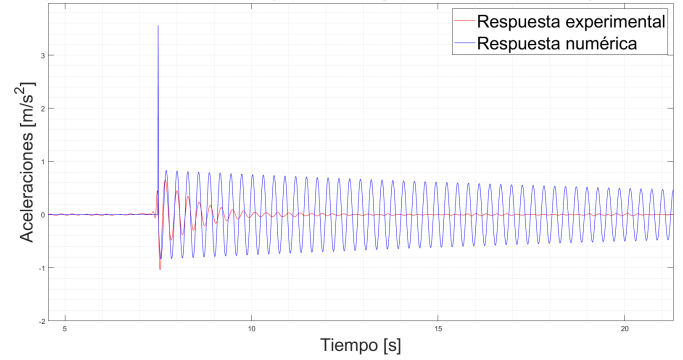
(b)

Comparación de respuestas: Sujeto 1 - Configuración experimental 1 (Sistema 3GDL)

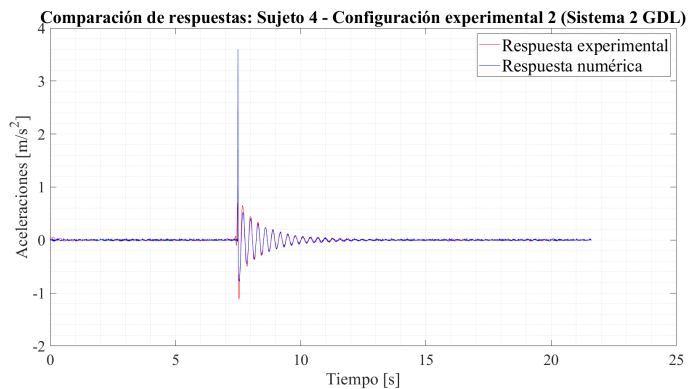


(c)

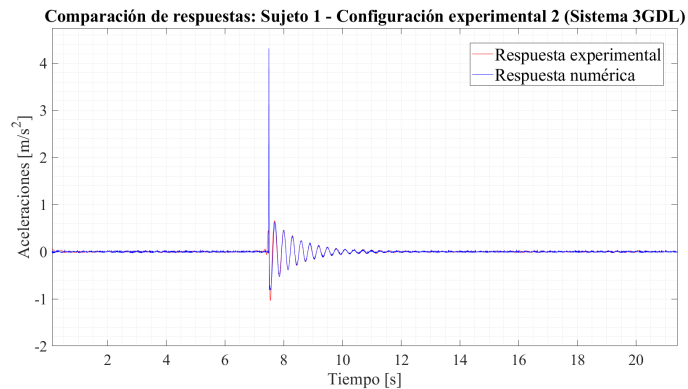
Comparación de respuestas: Sujeto 1 - Configuración experimental 2 (Sistema 1GDL)



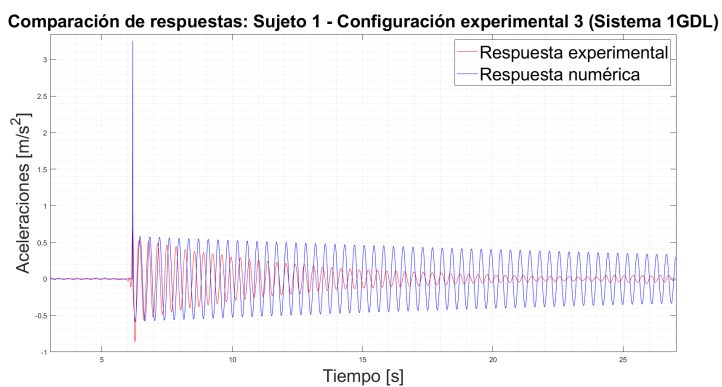
(d)



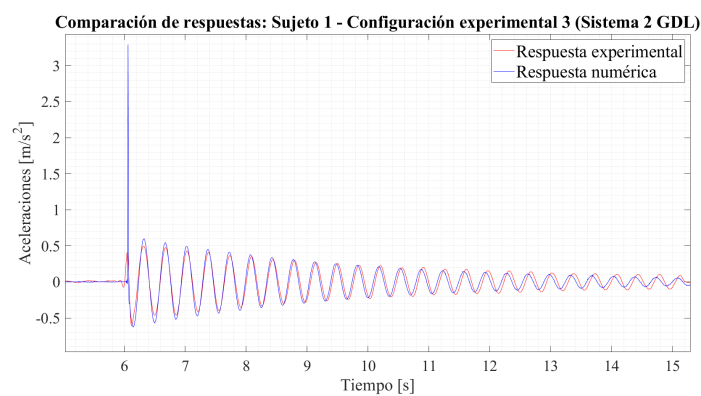
(e)



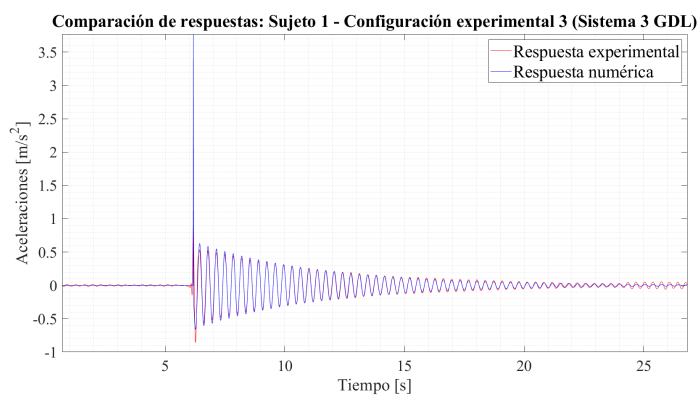
(f)



(g)



(h)

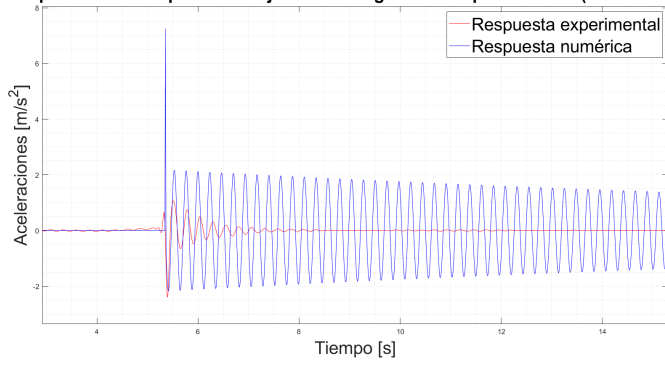


(i)

Figura 11.1. Comparación de respuestas: experimental y numérica para el sujeto 1.

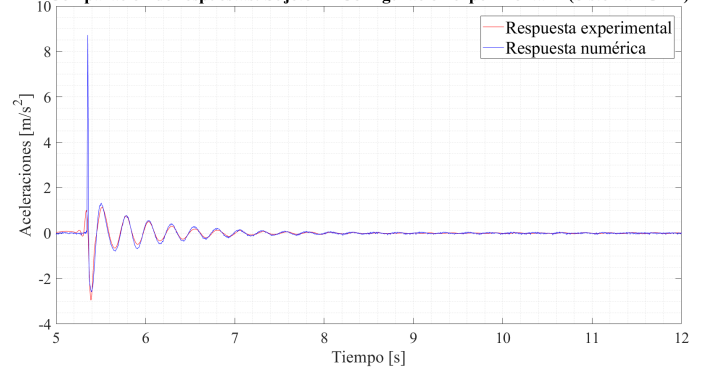
11.1.2 Sujeto 2

Comparación de respuestas: Sujeto 2 - Configuración experimental 1 (Sistema 1GDL)



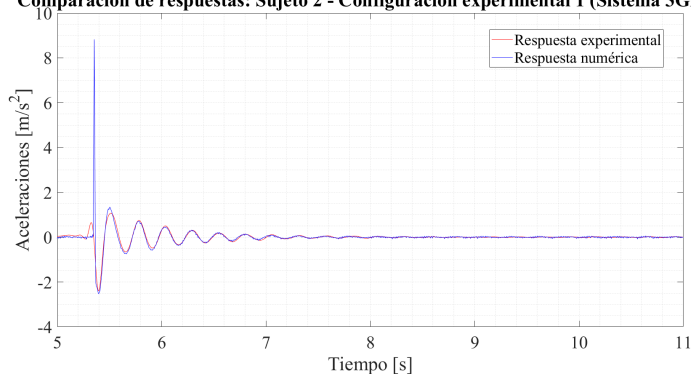
(a)

Comparación de respuestas: Sujeto 2 - Configuración experimental 1 (Sistema 2GDL)



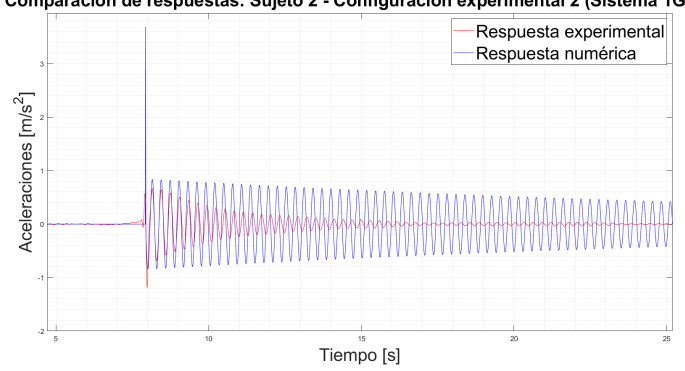
(b)

Comparación de respuestas: Sujeto 2 - Configuración experimental 1 (Sistema 3GDL)



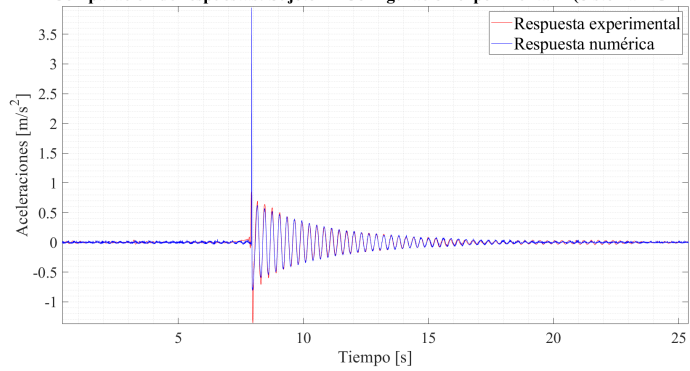
(c)

Comparación de respuestas: Sujeto 2 - Configuración experimental 2 (Sistema 1GDL)



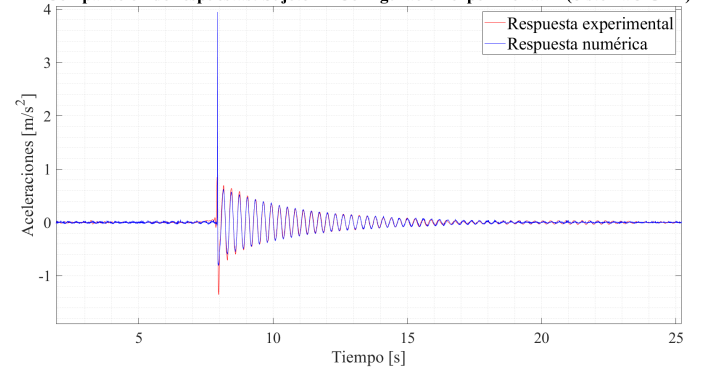
(d)

Comparación de respuestas: Sujeto 2 - Configuración experimental 2 (Sistema 2 GDL)



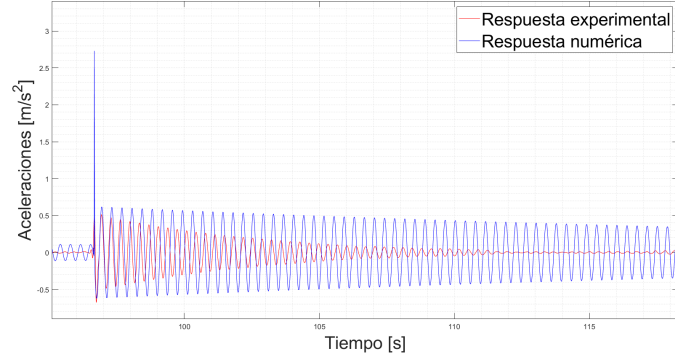
(e)

Comparación de respuestas: Sujeto 2 - Configuración experimental 2 (Sistema 3 GDL)



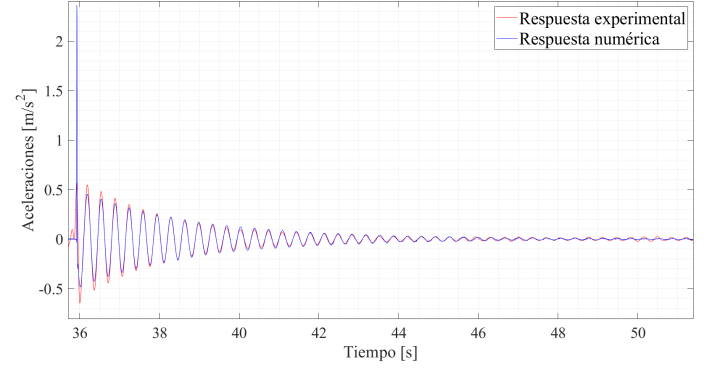
(f)

Comparación de respuestas: Sujeto 2 - Configuración experimental 3 (Sistema 1GDL)



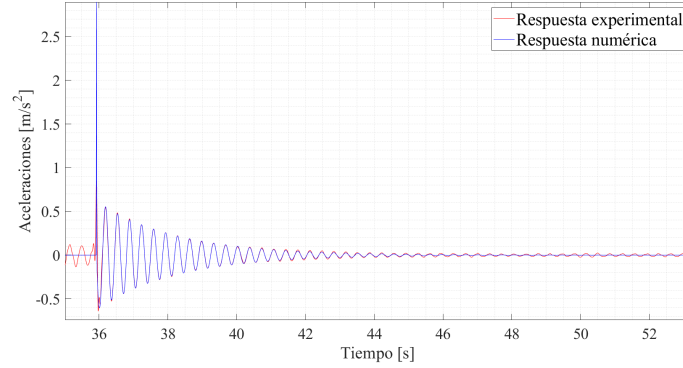
(g)

Comparación de respuestas: Sujeto 2 - Configuración experimental 3 (Sistema 2 GDL)



(h)

Comparación de respuestas: Sujeto 2 - Configuración experimental 3 (Sistema 3 GDL)

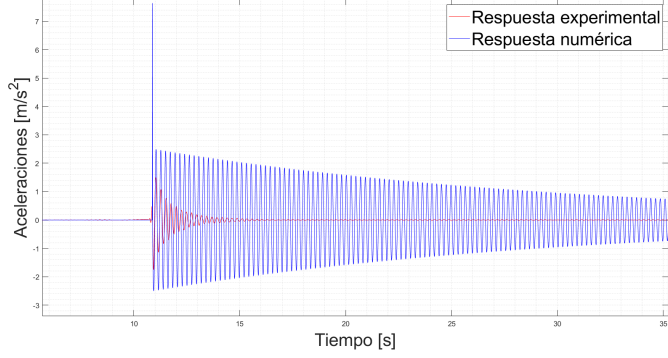


(i)

Figura 11.2. Comparación de respuestas: experimental y numérica para el sujeto 2.

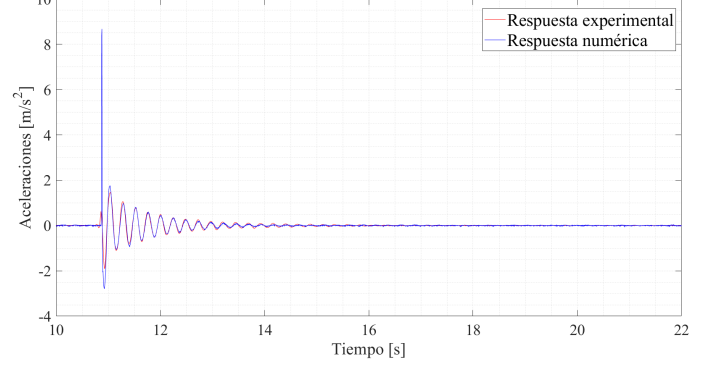
11.1.3 Sujeto 3

Comparación de respuestas: Sujeto 3 - Configuración experimental 1 (Sistema 1GDL)



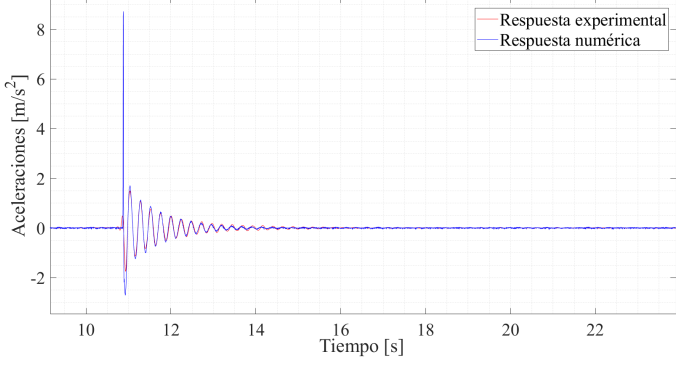
(a)

Comparación de respuestas: Sujeto 3 - Configuración experimental 1 (Sistema 2GDL)



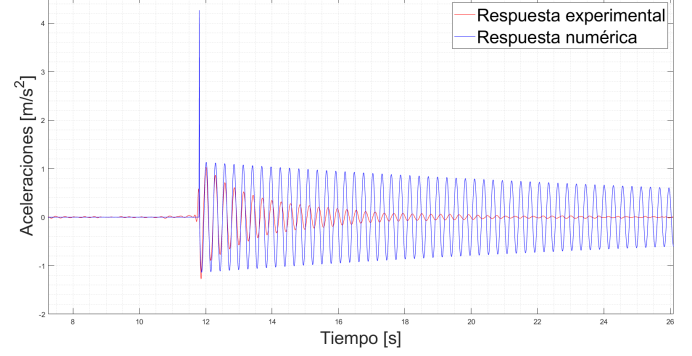
(b)

Comparación de respuestas: Sujeto 3 - Configuración experimental 1 (Sistema 3GDL)



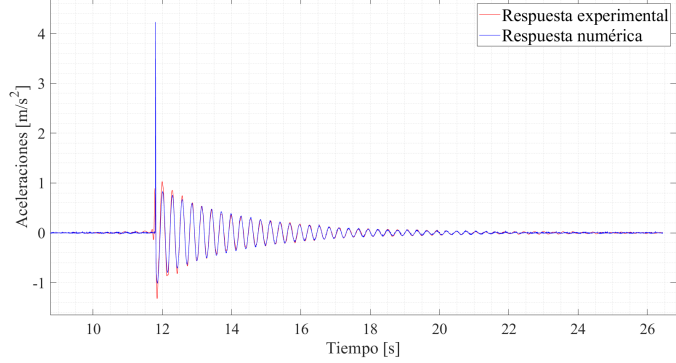
(c)

Comparación de respuestas: Sujeto 3 - Configuración experimental 2 (Sistema 1GDL)



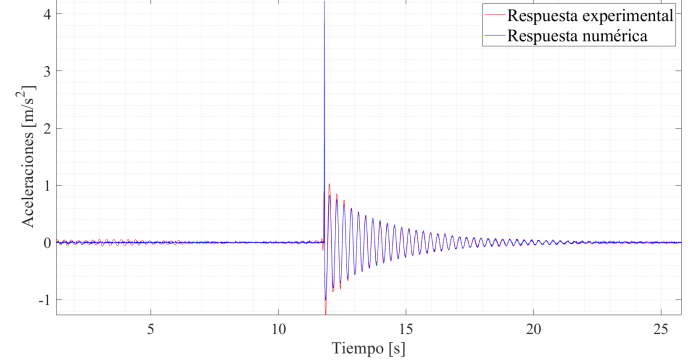
(d)

Comparación de respuestas: Sujeto 3 - Configuración experimental 2 (Sistema 2 GDL)



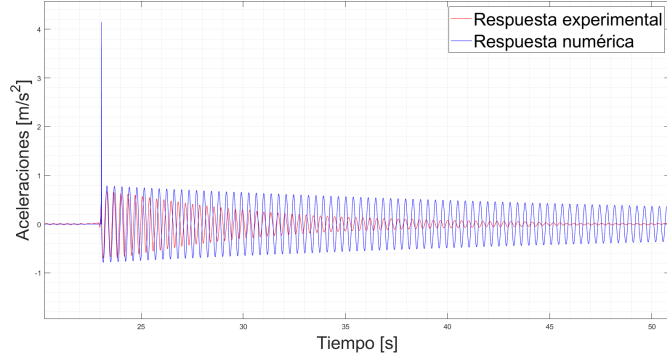
(e)

Comparación de respuestas: Sujeto 3 - Configuración experimental 2 (Sistema 3 GDL)



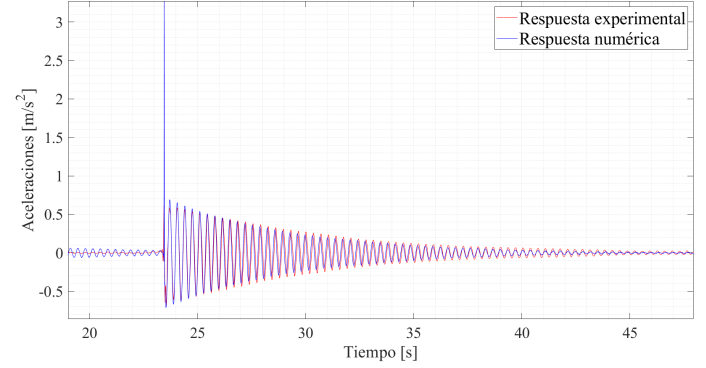
(f)

Comparación de respuestas: Sujeto 3 - Configuración experimental 3 (Sistema 1GDL)



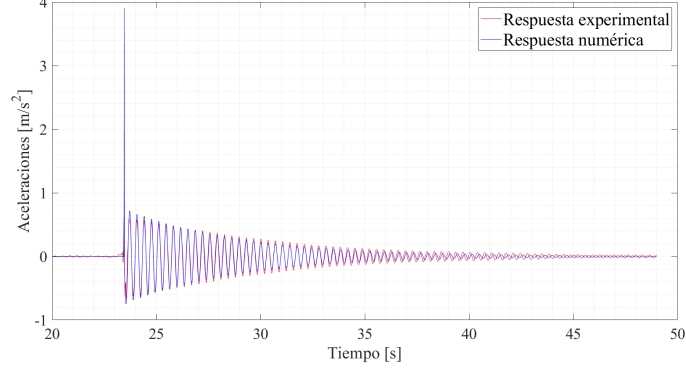
(g)

Comparación de respuestas: Sujeto 3 - Configuración experimental 3 (Sistema 2 GDL)



(h)

Comparación de respuestas: Sujeto 3 - Configuración experimental 3 (Sistema 3 GDL)

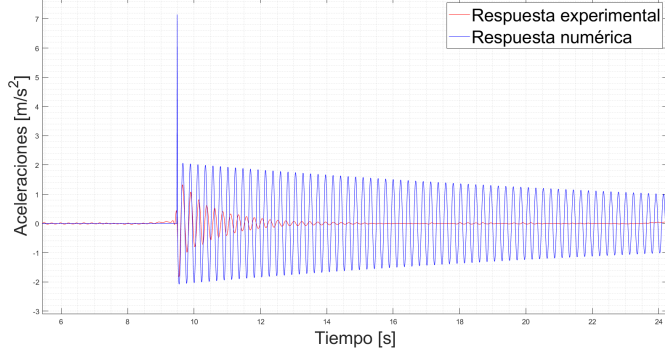


(i)

Figura 11.3. Comparación de respuestas: experimental y numérica para el sujeto 3.

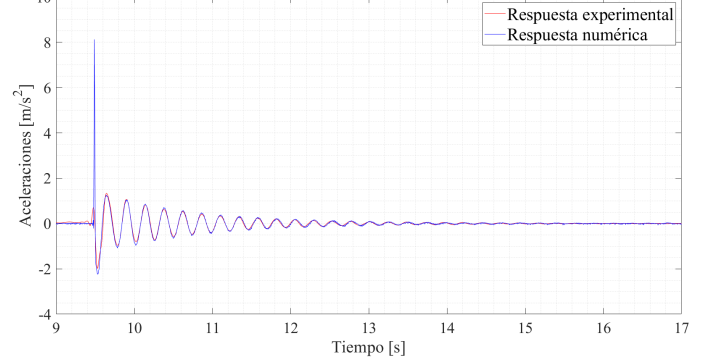
11.1.4 Sujeto 4

Comparación de respuestas: Sujeto 4 - Configuración experimental 1 (Sistema 1GDL)



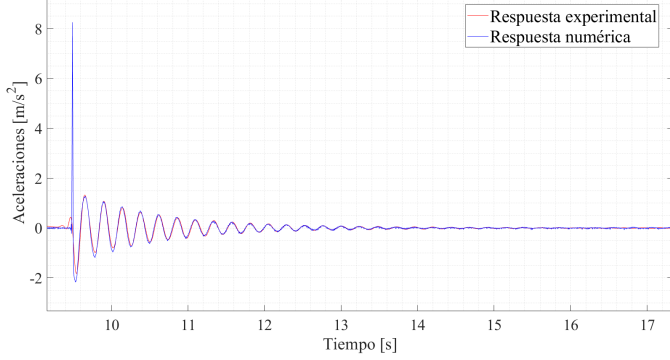
(a)

Comparación de respuestas: Sujeto 4 - Configuración experimental 1 (Sistema 2GDL)



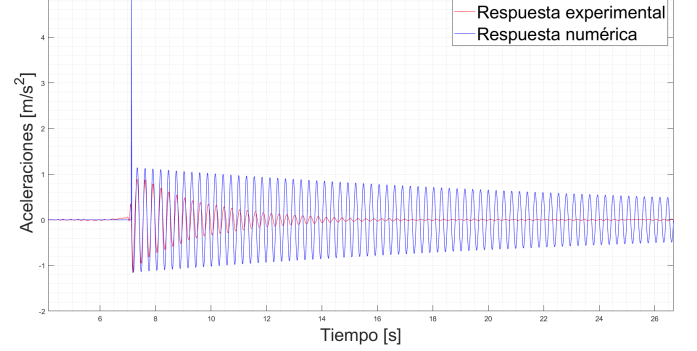
(b)

Comparación de respuestas: Sujeto 4 - Configuración experimental 1 (Sistema 3 GDL)



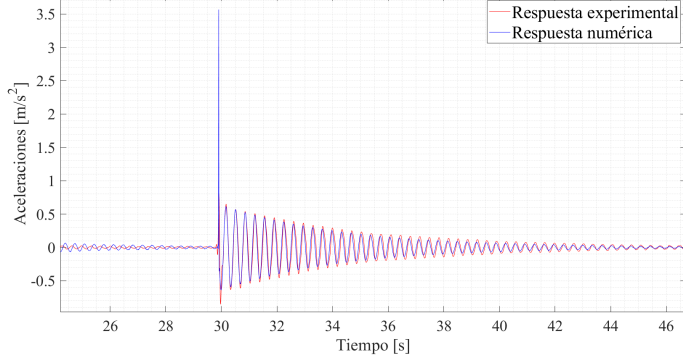
(c)

Comparación de respuestas: Sujeto 4 - Configuración experimental 2 (Sistema 1GDL)



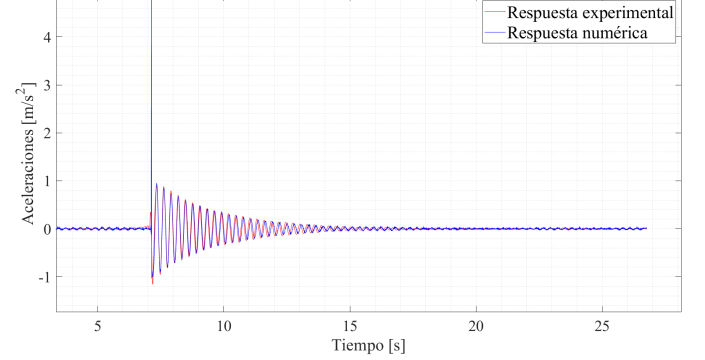
(d)

Comparación de respuestas: Sujeto 4 - Configuración experimental 2 (Sistema 2 GDL)



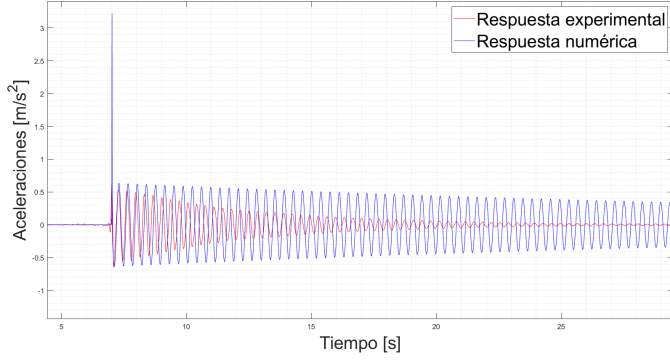
(e)

Comparación de respuestas: Sujeto 4 - Configuración experimental 2 (Sistema 3GDL)



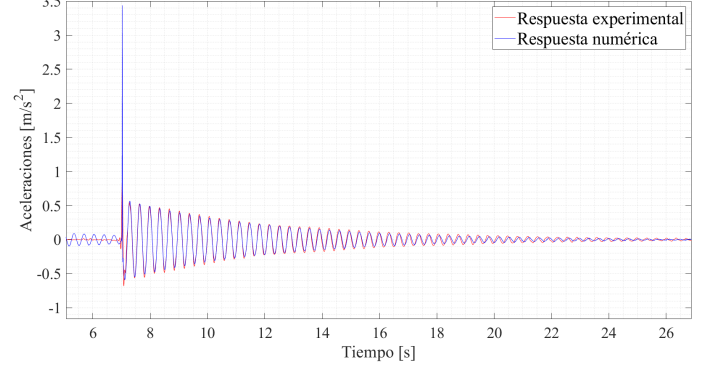
(f)

Comparación de respuestas: Sujeto 4 - Configuración experimental 3 (Sistema 1GDL)



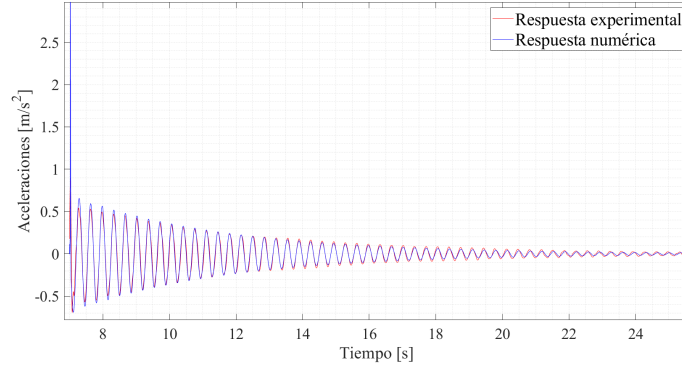
(g)

Comparación de respuestas: Sujeto 4 - Configuración experimental 3 (Sistema 2 GDL)



(h)

Comparación de respuestas: Sujeto 4 - Configuración experimental 3 (Sistema 3 GDL)

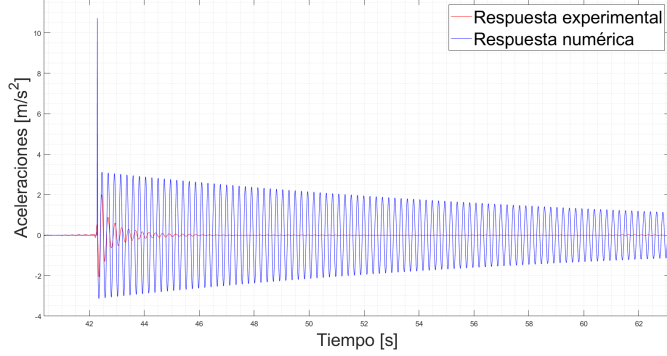


(i)

Figura 11.4. Comparación de respuestas: experimental y numérica para el sujeto 4.

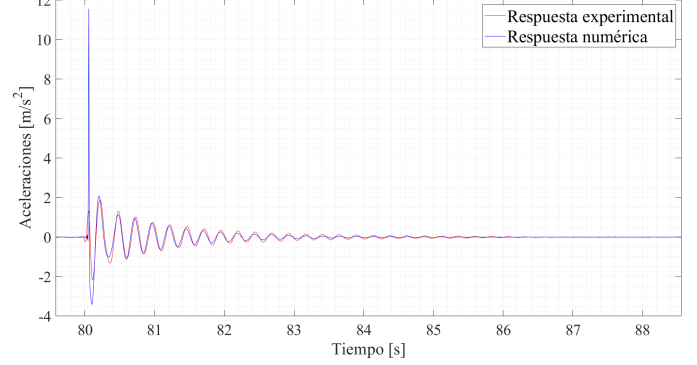
11.1.5 Sujeto 5

Comparación de respuestas: Sujeto 5 - Configuración experimental 1 (Sistema 1GDL)



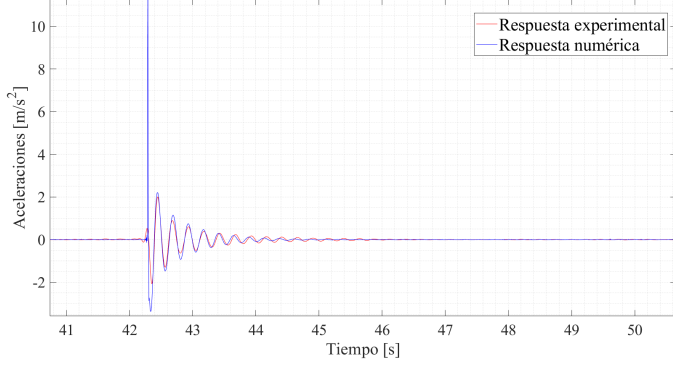
(a)

Comparación de respuestas: Sujeto 5 - Configuración experimental 1 (Sistema 2GDL)



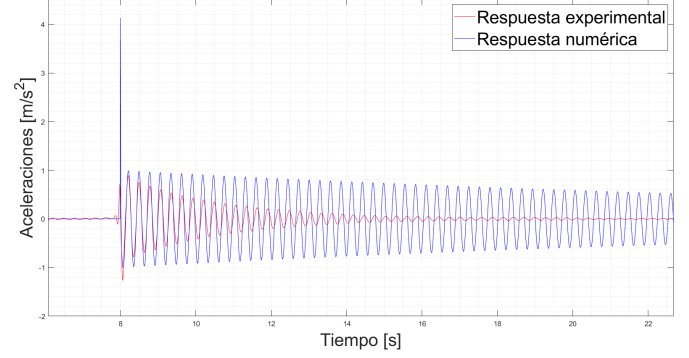
(b)

Comparación de respuestas: Sujeto 5 - Configuración experimental 1 (Sistema 3GDL)



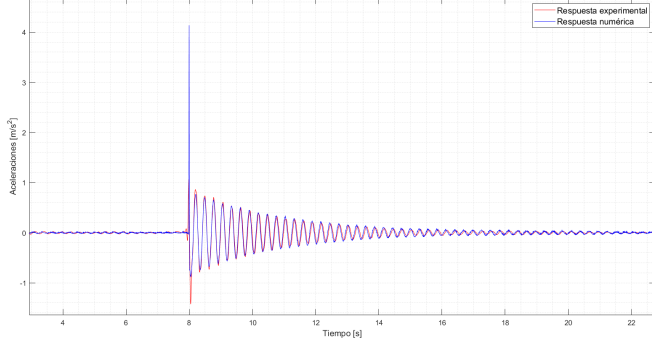
(c)

Comparación de respuestas: Sujeto 5 - Configuración experimental 2 (Sistema 1GDL)



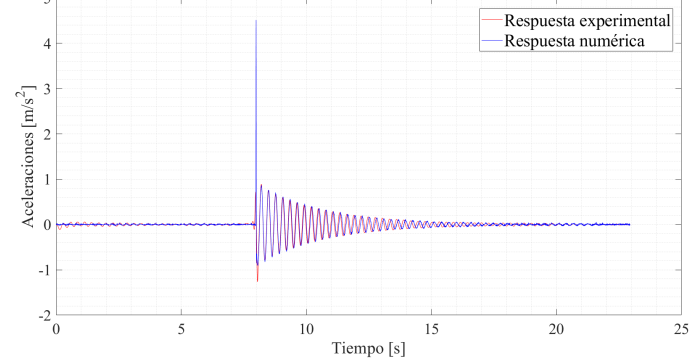
(d)

Comparación de respuestas: Sujeto 5 - Configuración experimental 2



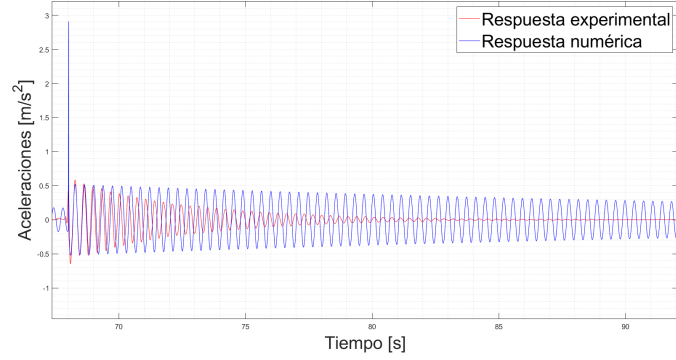
(e)

Comparación de respuestas: Sujeto 5 - Configuración experimental 4 (Sistema 3GDL)



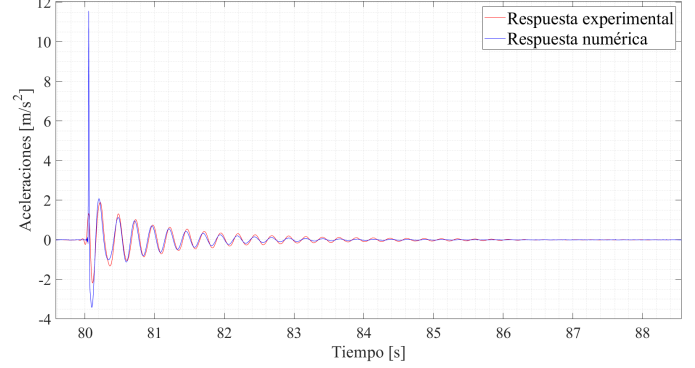
(f)

Comparación de respuestas: Sujeto 5 - Configuración experimental 2 (Sistema 1GDL)



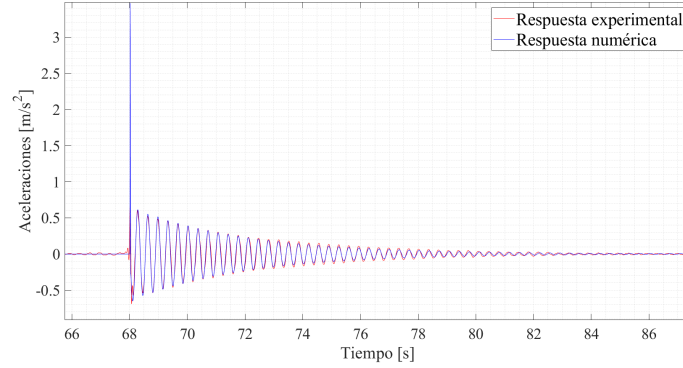
(g)

Comparación de respuestas: Sujeto 5 - Configuración experimental 1 (Sistema 2GDL)



(h)

Comparación de respuestas: Sujeto 5 - Configuración experimental 3 (Sistema 3 GDL)

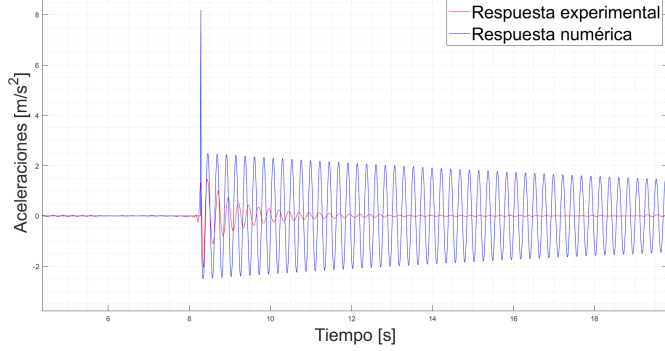


(i)

Figura 11.5. Comparación de respuestas: experimental y numérica para el sujeto 5.

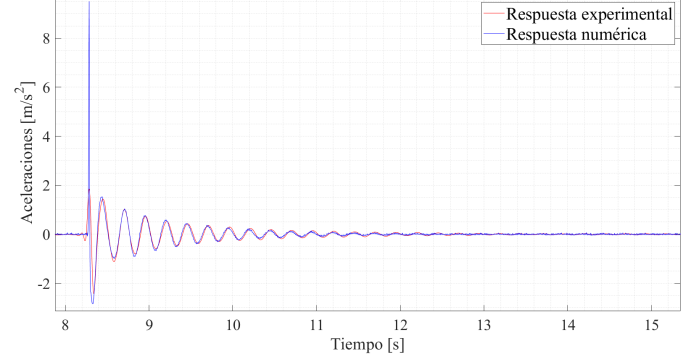
11.1.6 Sujeto 6

Comparación de respuestas: Sujeto 6 - Configuración experimental 1 (Sistema 1GDL)



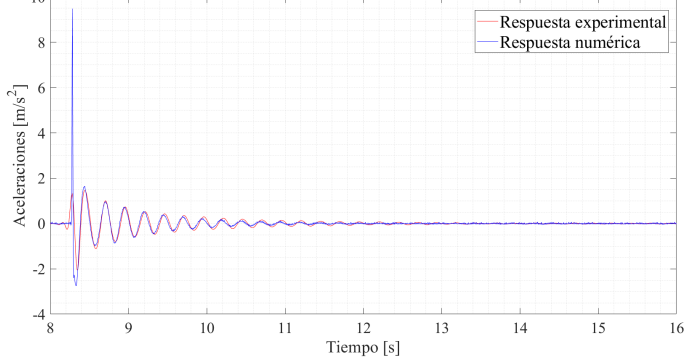
(a)

Comparación de respuestas: Sujeto 6 - Configuración experimental 1 (Sistema 2GDL)



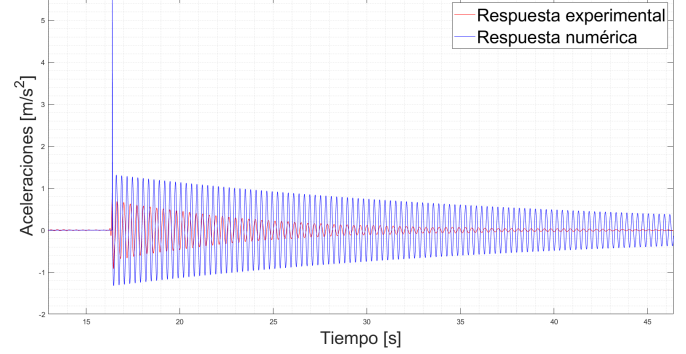
(b)

Comparación de respuestas: Sujeto 6 - Configuración experimental 1 (Sistema 3GDL)



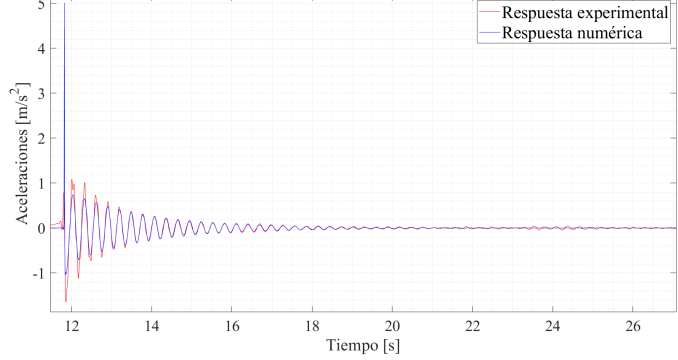
(c)

Comparación de respuestas: Sujeto 6 - Configuración experimental 2 (Sistema 1GDL)



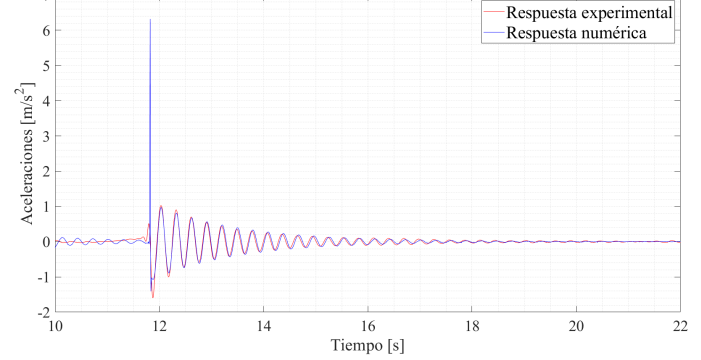
(d)

Comparación de respuestas: Sujeto 6 - Configuración experimental 2 (Sistema 2GDL)



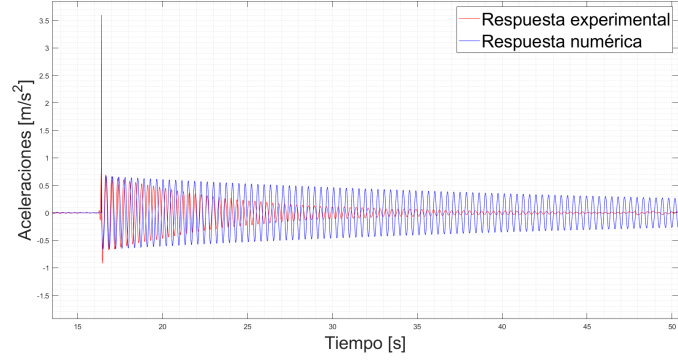
(e)

Comparación de respuestas: Sujeto 6 - Configuración experimental 2 (Sistema 3GDL)



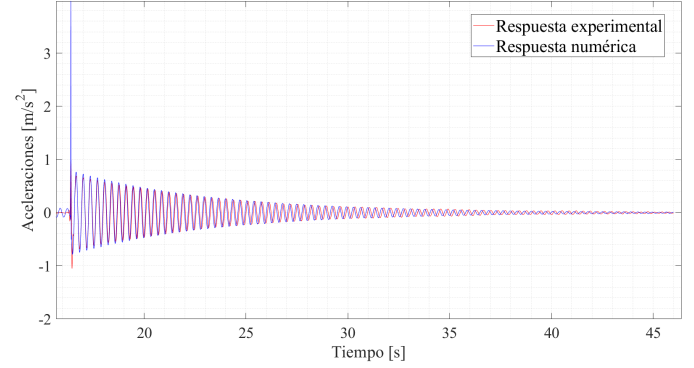
(f)

Comparación de respuestas: Sujeto 6 - Configuración experimental 3 (Sistema 1GDL)



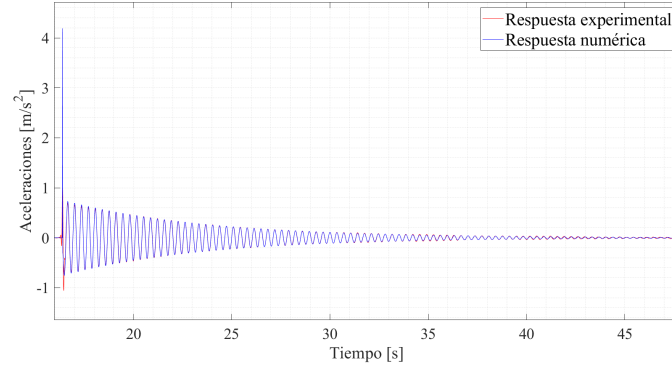
(g)

Comparación de respuestas: Sujeto 6 - Configuración experimental 3 (Sistema 2 GDL)



(h)

Comparación de respuestas: Sujeto 6 - Configuración experimental 3 (Sistema 3 GDL)

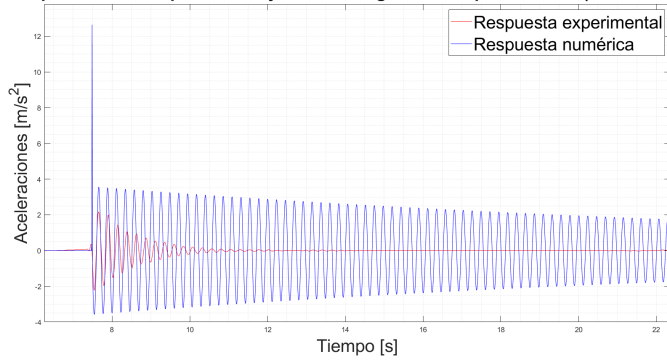


(i)

Figura 11.6. Comparación de respuestas: experimental y numérica para el sujeto 6.

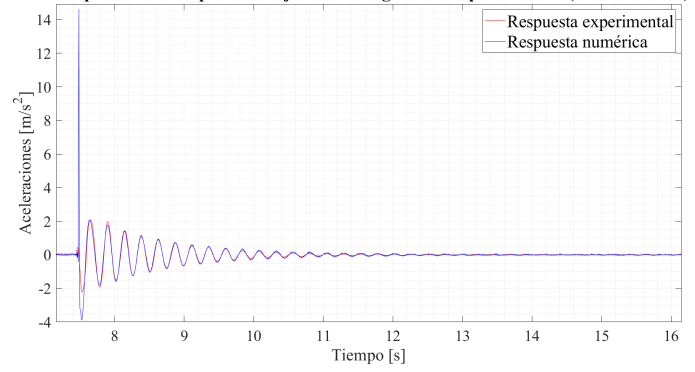
11.1.7 Sujeto 4

Comparación de respuestas: Sujeto 7 - Configuración experimental 1 (Sistema 1GDL)



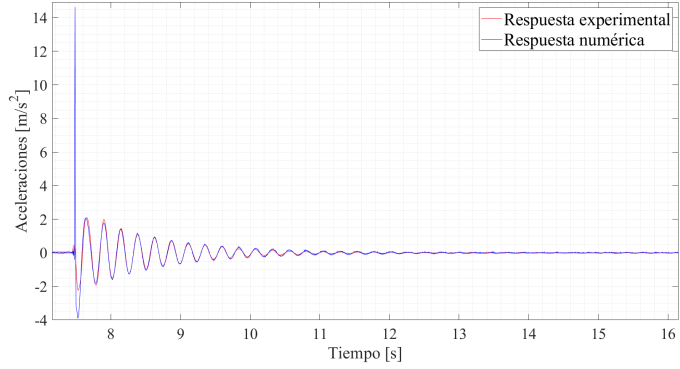
(a)

Comparación de respuestas: Sujeto 7 - Configuración experimental 1 (Sistema 2GDL)



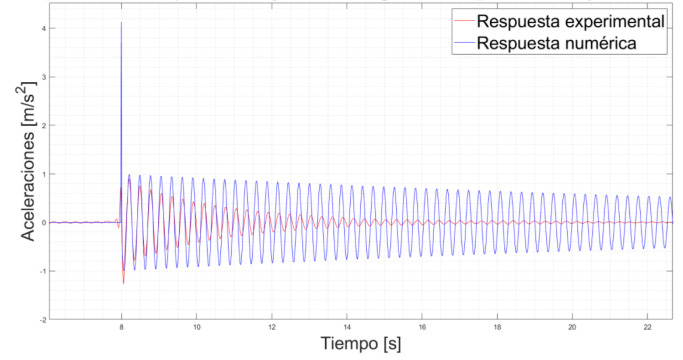
(b)

Comparación de respuestas: Sujeto 7 - Configuración experimental 1 (Sistema 3 GDL)



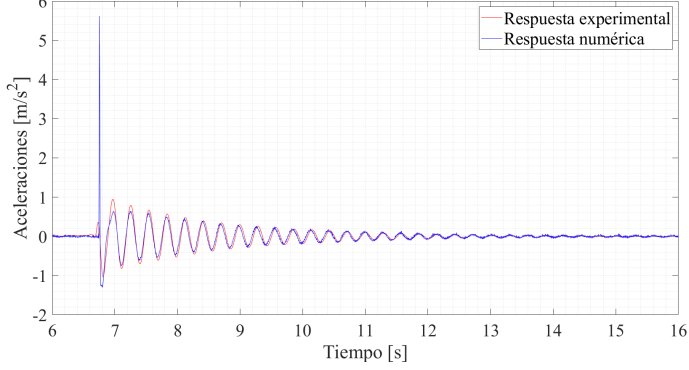
(c)

Comparación de respuestas: Sujeto 7 - Configuración experimental 2 (Sistema 1GDL)



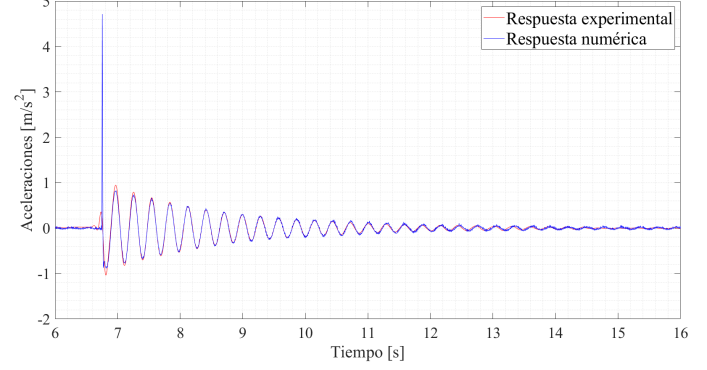
(d)

Comparación de respuestas: Sujeto 7 - Configuración experimental 2 (Sistema 2 GDL)



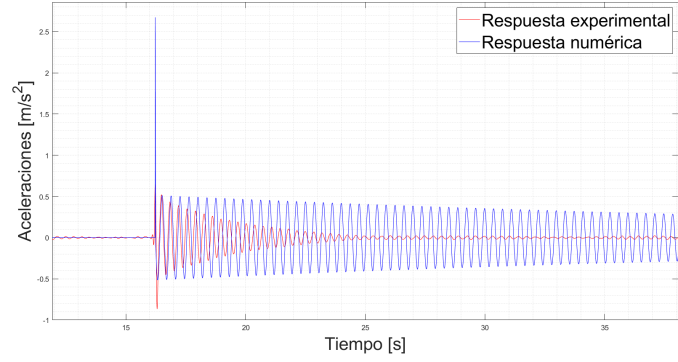
(e)

Comparación de respuestas: Sujeto 7 - Configuración experimental 2 (Sistema 3 GDL)



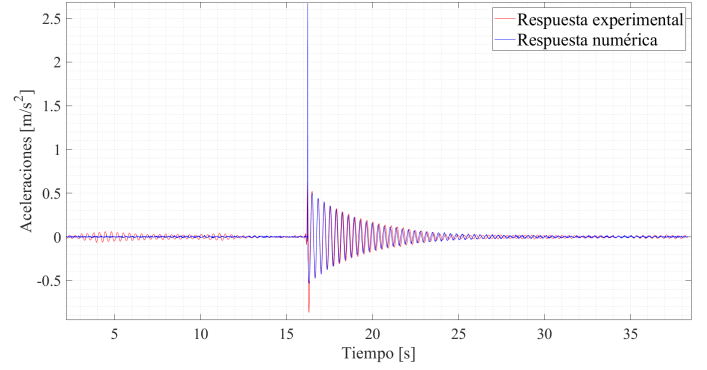
(f)

Comparación de respuestas: Sujeto 7 - Configuración experimental 2 (Sistema 1 GDL)



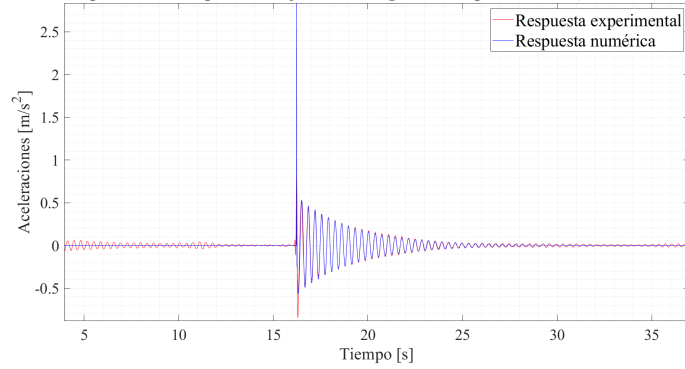
(g)

Comparación de respuestas: Sujeto 7 - Configuración experimental 3 (Sistema 2 GDL)



(h)

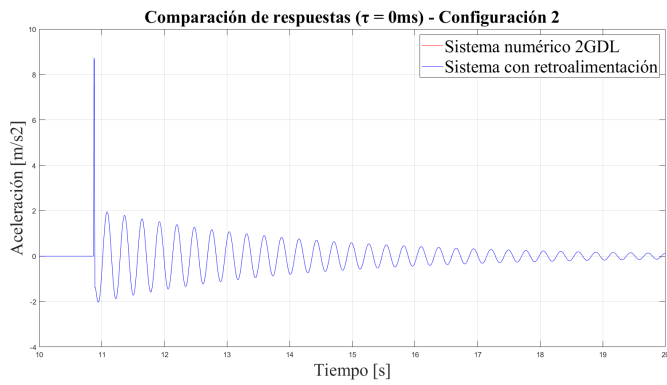
Comparación de respuestas: Sujeto 7 - Configuración experimental 3 (Sistema 3 GDL)



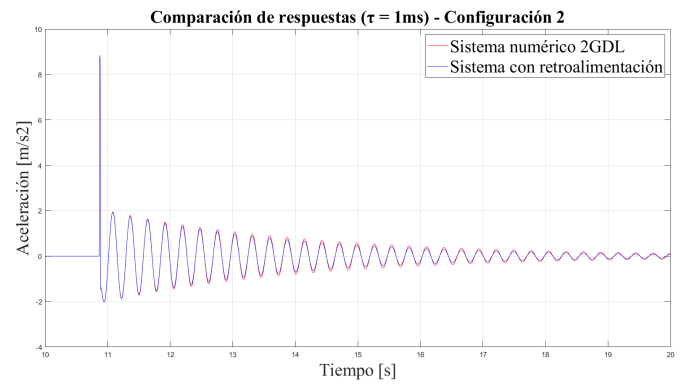
(i)

Figura 11.7. Comparación de respuestas: experimental y numérica para el sujeto 7.

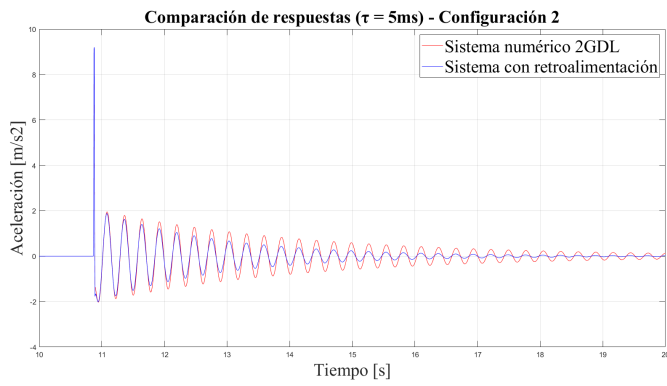
11.2 Delay



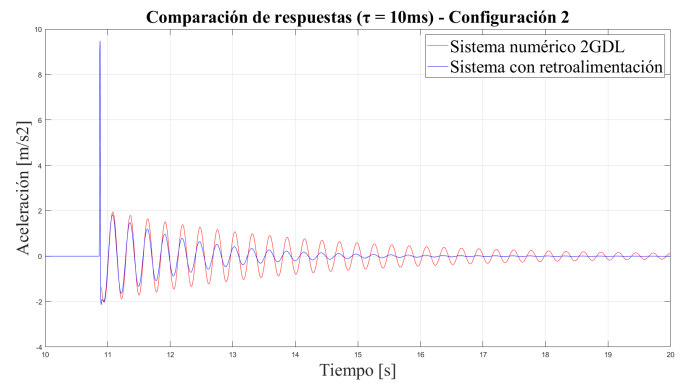
(a)



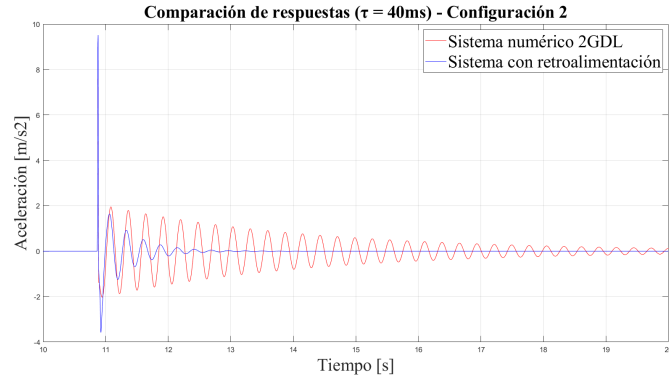
(b)



(c)

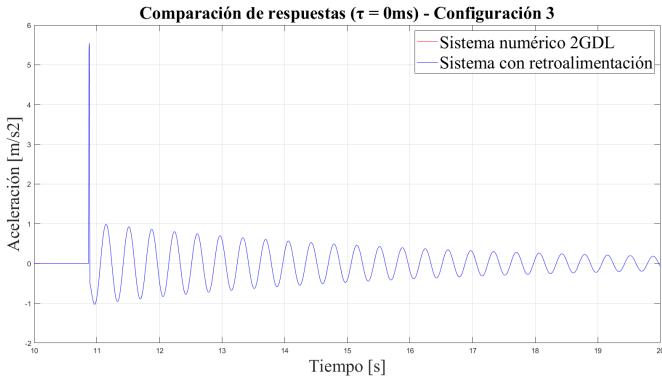


(d)

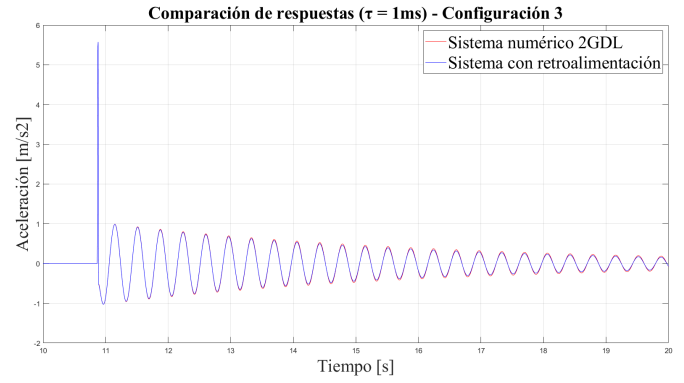


(e)

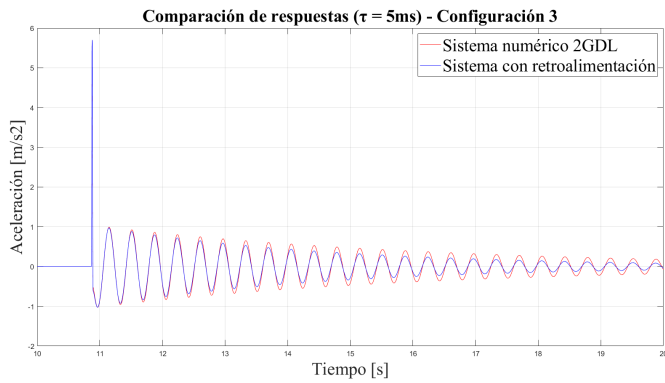
Figura 11.8. Comparación de las respuestas numéricas y mediante retroalimentación, bajo configuración 2 con valores de delay de (a) 0 ms, (b) 1 ms, (c) 5 ms, (d) 10 ms y (e) 40 ms.



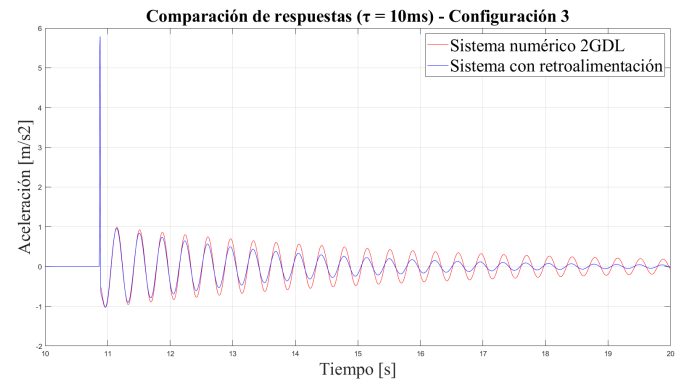
(a)



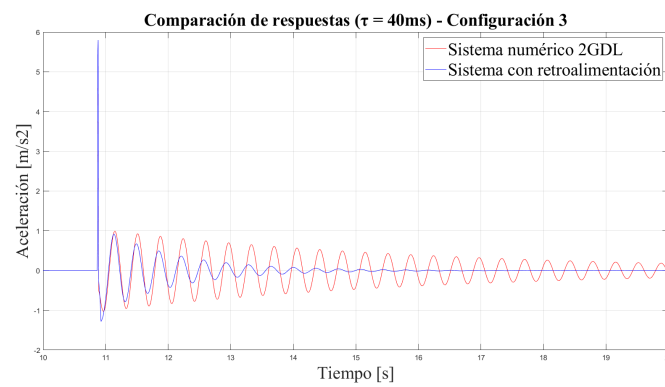
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 11.9. Comparación de las respuestas numéricas y mediante retroalimentación, bajo configuración 3 con valores de delay de (a) 0 ms, (b) 1 ms, (c) 5 ms, (d) 10 ms y (e) 40 ms.