

Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año **1. Datos generales del Proyecto**

Código del proyecto: 2965			
Título del proyecto: EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS UTILIZANDO SIMULACIONES HÍBRIDAS EN TIEMPO REAL.			
Facultad o Instituto Académico: Ingeniería.			
Departamento o Escuela: Ingeniería Civil.			
Grupo (s) de investigación: Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural G-7 y Grupo de Biomecánica			
Entidades:			
Palabras claves: Simulación híbrida en tiempo real, Sistemas de control.			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Gilberto Areiza	5 horas	5 horas
Coinvestigadores	Johannio Marulanda	5 horas	5 horas
	Peter Thomson	5 horas	5 horas
	José Jaime García	3 horas	3 horas
	Alejandro Cruz Escobar	2 horas	2 horas
Otros participantes			

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

2. Resumen ejecutivo:

2.1. Resumen

Los sismos son una de las principales amenazas para estructuras civiles, causando inseguridad en sus ocupantes y daños en elementos estructurales [1]. Para la mitigación de las vibraciones excesivas se han desarrollado dispositivos de control activos, pasivos, semiactivos e híbridos que han sido ampliamente estudiados e implementados alrededor del mundo [2].

Uno de los factores que ha impulsado el desarrollo de tales dispositivos es el uso de simulaciones híbridas en tiempo real (SHTR), ya que permiten el estudio de sistemas complejos clasificando los componentes fáciles de modelar como subestructura numérica (SN) y aquellos cuyo comportamiento es difícil de predecir como subestructura experimental (SE) [3], [4]. Así, la SN se modela computacionalmente, mientras que la SE es construida y sometida a pruebas físicas. Ambos componentes interactúan a través de sistemas de transferencia y retroalimentación [5]. La SHTR permite ahorrar esfuerzo, tiempo y recursos económicos pues, en lugar de construir una estructura en escala real para evaluar el desempeño de un sistema de control, sólo se requiere construir la subestructura experimental (sistema de control) sin erigir la estructura principal.

2.2. Abstract.

Earthquakes are one of the main threats in civil structures, producing discomfort in the occupants and damage to structural elements [1]. For the mitigation of excessive vibrations, control devices active, passive, semi-active and hybrid have been widely studied and implemented around the world [2].

One of the factors that has driven the development of such devices is the use of real time hybrid simulation (SHTR), since they allow the study of complex systems classifying the easy components to model as a numerical substructure (SN) and those whose behavior it is difficult to predict as an experimental substructure (SE) [3], [4]. Thus, the SN is modeled computationally, while the SE is constructed and subjected to physical tests. Both components interact through the transfer and feedback systems [5]. The SHTR allows saving effort, time and economic resources because instead of building a real-scale structure to evaluate the performance of a control system, it only requires building the experimental substructure (control system) without erecting the main structure.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de una simulación híbrida en tiempo real para reproducir la respuesta sísmica de una estructura utilizando la mesa sísmica de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle como sistema de transferencia.

2.3.2. Objetivos específicos

- Adecuar la mesa sísmica de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle como sistema de transferencia para realizar SHTR.
- Seleccionar, construir y modelar el sistema estructural
- Determinar la respuesta sísmica del sistema estructural utilizando SHTR.
- Evaluar el desempeño de la SHTR.

2.4. Metodología

- **Adecuación del sistema de transferencia:** se diseñará un controlador para mejorar el seguimiento de la mesa sísmica.
- **Selección del sistema estructural:** se seleccionará el sistema estructural a evaluar con la SHTR.
- **Modelado:** se modelará la subestructura numérica del sistema seleccionado.
- **Diseño y construcción:** se diseñará y construirá la subestructura experimental del sistema.
- **Evaluación de la respuesta sísmica:** se evaluará la respuesta sísmica del sistema estructural utilizando SHTR.
- **Evaluación de las SHTR:** se determinará la precisión de las simulaciones realizadas según los indicadores recomendados en la literatura.

3. Síntesis del proyecto:

En esta investigación se escogieron un amortiguador de masa sintonizado (AMS) y un amortiguador de fricción pasivo (AF) para ser evaluados experimentalmente y por medio de SHTR como dos sistemas de control independientes.

3.1. Estructuras de prueba

Para la implementación del AMS y el AF se utilizaron como estructuras de prueba dos pórticos metálicos tipo benchmark [6], cuya geometría se muestra en la Figura 1 y su configuración de masas en las Tablas 1 y 2. Las estructuras 1 y 2 fueron usadas para la implementación del AMS y el AF, respectivamente.

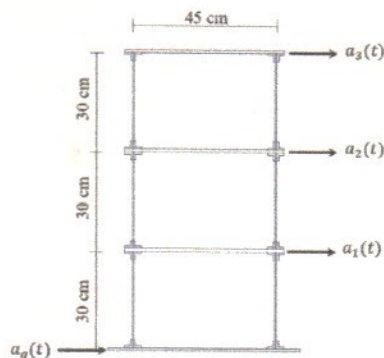


Figura 1. Estructura de prueba

Estructura 1

Masa (kg)	Piso 1	Piso 2	Piso 3
	12.1894	12.5887	12.4777

Tabla 1. Distribución de masa en la Estructura 1

Estructura 2

Masa (kg)	Piso 1	Piso 2	Piso 3
	22.735	22.735	2.308

Tabla 2. Distribución de masa en la Estructura 2

La respuesta dinámica de la estructura principal se representó a través de un sistema lineal de ecuaciones diferenciales ordinarias, como se observa en la Ec. (1), donde M_e , C_e y K_e , son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez; U , $\dot{U}$ y $\ddot{U}$, son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración, respectivamente; y Γ_g es el vector de influencia que corresponde a $[1 \ 1 \ 1]^T$.

$$[M_e]\{\ddot{U}\} + [C_e]\{\dot{U}\} + [K_e]\{U\} = [-M]\{\Gamma_g\}\{a_g\} \quad (1)$$

Las características dinámicas de las estructuras de prueba se obtuvieron a partir de un ensayo de vibración forzada, donde la excitación de base fue un barrido sinusoidal lineal con un rango de

frecuencia de 1 a 12 Hz y una duración de 300 segundos. Las frecuencias naturales (f_n), razones de amortiguamiento (ζ_n) y formas modales (ϕ) se muestran en las Tablas 3 y 4.

	f_n [Hz]	ζ_n [%]	Forma modal (ϕ)		
			Piso 1	Piso 2	Piso 3
Modo 1	3.50	0.43	0.49	0.81	1.00
Modo 2	9.84	0.25	1.00	0.43	-0.83
Modo 3	14.54	0.22	-0.81	1.00	-0.43

Tabla 3. Parámetros dinámicos de la Estructura 1

	f_n [Hz]	ζ_n [%]	Forma modal (ϕ)		
			Piso 1	Piso 2	Piso 3
Modo 1	2.48	0.43	0.60	0.98	1.00
Modo 2	7.11	0.25	1.00	0.56	-0.94
Modo 3	10.40	0.22	1.00	-0.98	0.45

Tabla 4. Parámetros dinámicos de la Estructura 2

3.2. Amortiguador de masa sintonizado (AMS)

El amortiguador de masa sintonizado (AMS) usado en esta investigación, está conformado por una columna flexible que soporta una masa en la parte superior, como se muestra en la Figura 2.

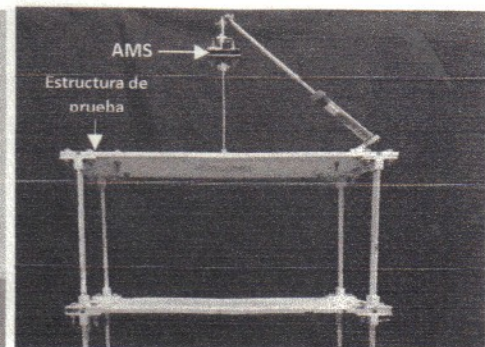
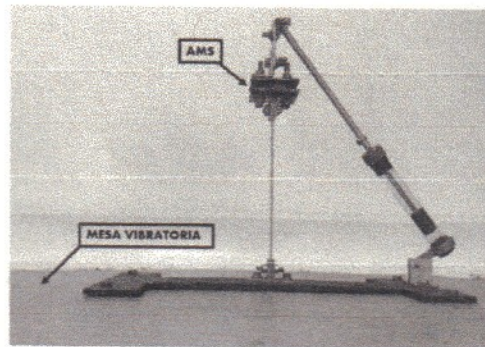
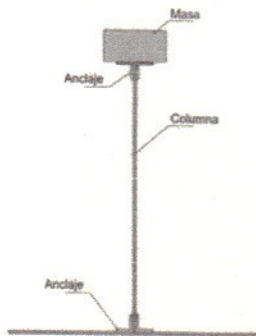


Figura 2. SE: Amortiguador de masa sintonizado (AMS)

La columna del AMS se considera de masa despreciable y empotrada en la base, por lo que la longitud requerida (L) fue calculada en términos de la frecuencia deseada (f_d), la masa concentrada en la parte superior (md) y las propiedades mecánicas del elemento, como se muestra en la Ec. (2), donde E es el módulo de elasticidad e I el momento de inercia de la sección.

$$L = \sqrt[3]{\frac{3EI}{md(2\pi f_d)^2}} \quad (2)$$

Las razones óptimas de sintonización (γ_{opt}) y amortiguamiento (ζ_{opt}) del AMS fueron calculadas en función de la relación de masas (μ), como se muestra en las Ecs. (3 – 4) [7].

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (3)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3}{8} \left(\frac{\mu}{1+\mu} \right)} \quad (4)$$

Masa (kg)	μ (%)	γ_{opt}	f_{op} [Hz]	ζ_{opt} (%)	C (N*s/m)	K (N/m)
0.35	1	0.99	3.40	6.00	0.91	160.6

Tabla 5. Configuración nominal del AMS

3.3. SHTR para el sistema estructura- AMS

Para evaluar la respuesta del sistema de control se planteó una SHTR considerando el AMS como SE y la estructura de pruebas como SN. La transición entre SN y SE fue a través de la mesa sísmica de la universidad del Valle que replicó el desplazamiento total del tercer nivel, previamente calculado para el modelo numérico. La Ec (5) representa la dinámica del sistema estructura - AMS.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{r\}Ag + \{r_a\}\{Fm\} \quad (5)$$

Donde M , C y K representan la masa, el amortiguamiento y la rigidez del sistema estructural, incluyendo los efectos de AMS. $\ddot{U}$, $\dot{U}$ y U son los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento; r y r_a son los vectores de influencia de aceleración en la base y fuerza, respectivamente; y Fm la fuerza inducida por el AMS en el último nivel.

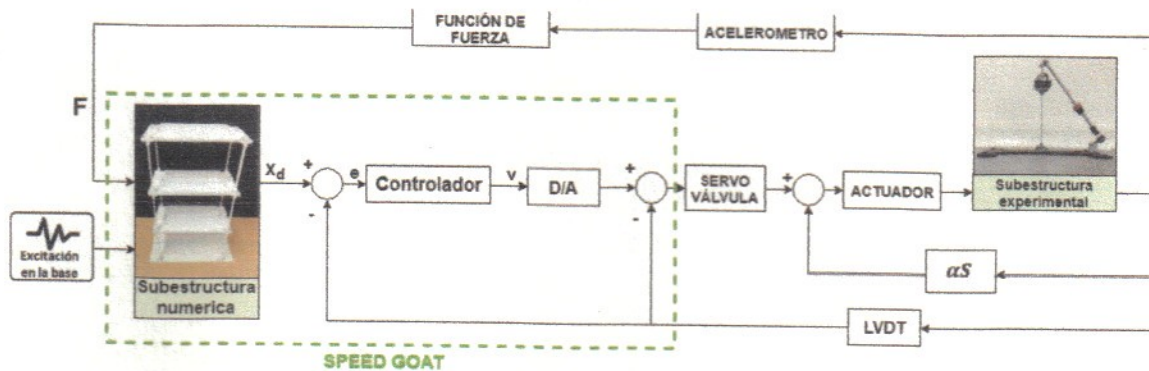


Figura 3. SHTR para el sistema estructura- AMS

3.4. Amortiguador de fricción (AF)

En esta investigación se evaluó un amortiguador de fricción lineal compuesto por un freno hidráulico Shimano Br-t615, utilizado comercialmente para bicicletas, y una lámina metálica de 100x20x2 mm³, como se indica en la Figura 4. Una vez el freno aplica una fuerza normal (N) a la lámina, la fricción entre el freno y la lámina produce una fuerza cortante que se opone a cualquier disturbio que intente separar el freno de la lámina.

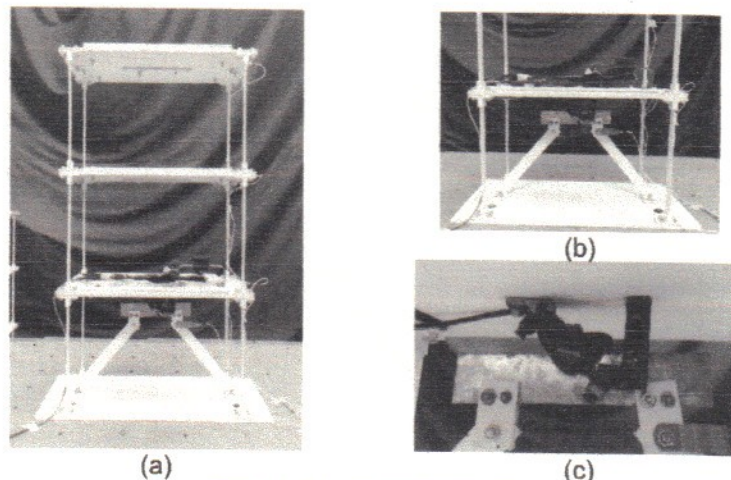


Figura 4. Sistema estructura-AF

3.5. SHTR para el sistema estructura- AF

Para evaluar la respuesta del sistema de control se realizó una SHTR considerando el AF como SE y la estructura de pruebas como SN. La transición entre SN y SE fue a través de la mesa sísmica de la universidad del Valle que replicó el desplazamiento total del primer nivel, previamente calculado para el modelo numérico. La dinámica del sistema está descrita por la Ec. (6), donde u , $\dot{u}$ y $\ddot{u}$ son los vectores de desplazamientos, velocidades y aceleraciones por piso, respectivamente, M_f , C_f y K_f son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente; Γ es el vector de influencia, U_g es la aceleración en la base de la estructura y F_{fr} es la fuerza de fricción del AF [8].

$$[Mf]\{\ddot{u}\} + [Cf]\{\dot{u}\} + [Kf]\{u\} = -[Mf]\{\Gamma\}\{\ddot{U}_g\} - \{\Gamma_a\}F_{fr} \quad (6)$$

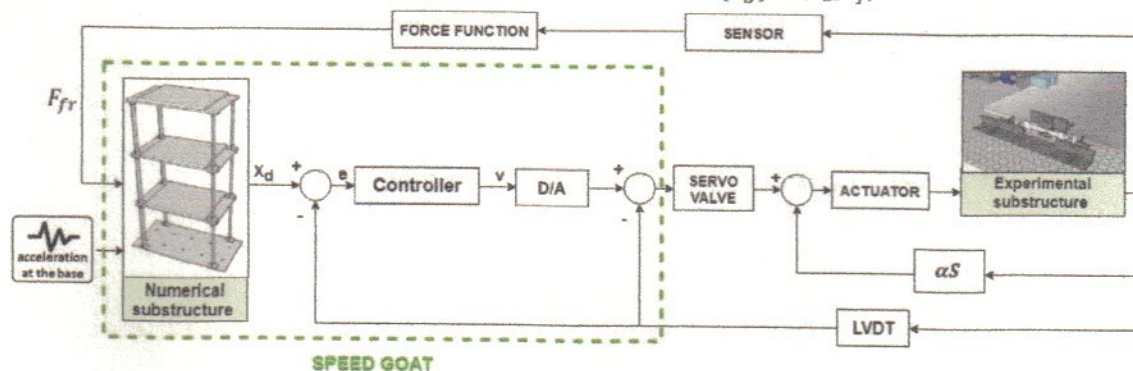


Figura 5. SHTR para el sistema estructura- AF

3.6. Comparación entre ensayos de mesa vibratoria (MV) y SHTR

3.6.1. Estructura-AMS

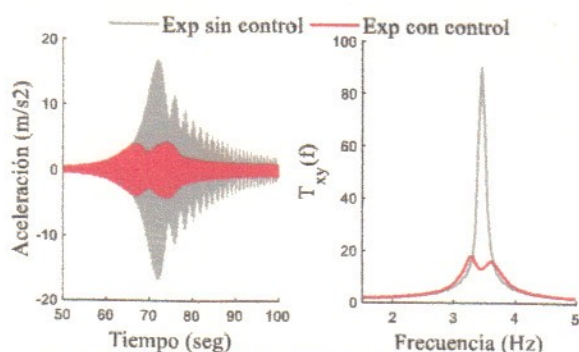


Figura 6. Respuesta experimental en el piso 3 en MV

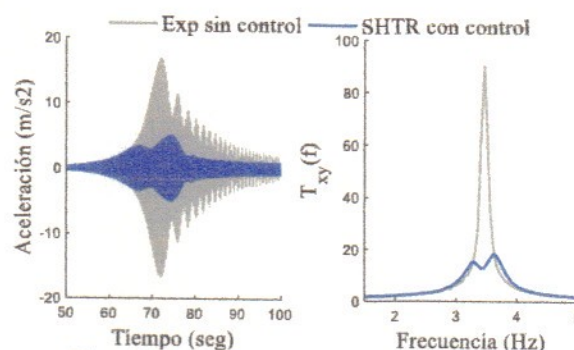


Figura 7. Respuesta simulada del piso 3 en SHTR

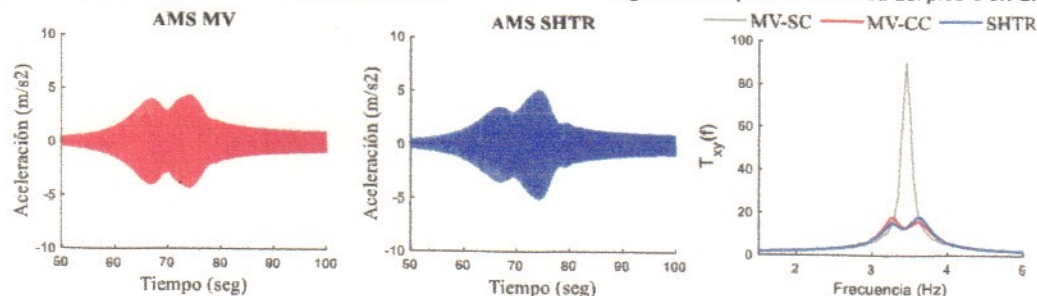


Figura 8. Comparación entre el ensayo de mesa vibratoria (MV) y la SHTR

Para el sistema Estructura-AMS, el ensayo de mesa vibratoria reportó una reducción de la respuesta pico de 74.4% y RMS de 63.9% en el piso tres. Así mismo, la SHTR alcanzó reducciones de 69.8% en la aceleración pico y RMS de 62.5%.

3.6.2. Estructura - AF

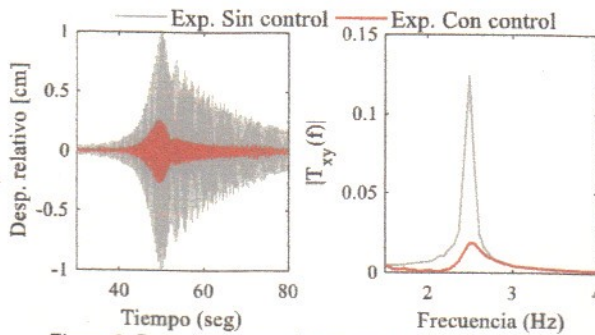


Figura 9. Respuesta experimental en el piso 1 en MV

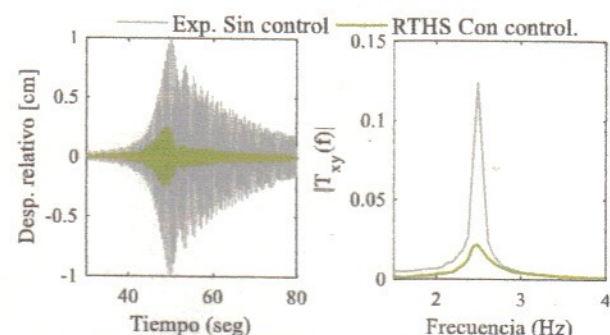


Figura 10. Respuesta simulada Piso 1 en SHTR

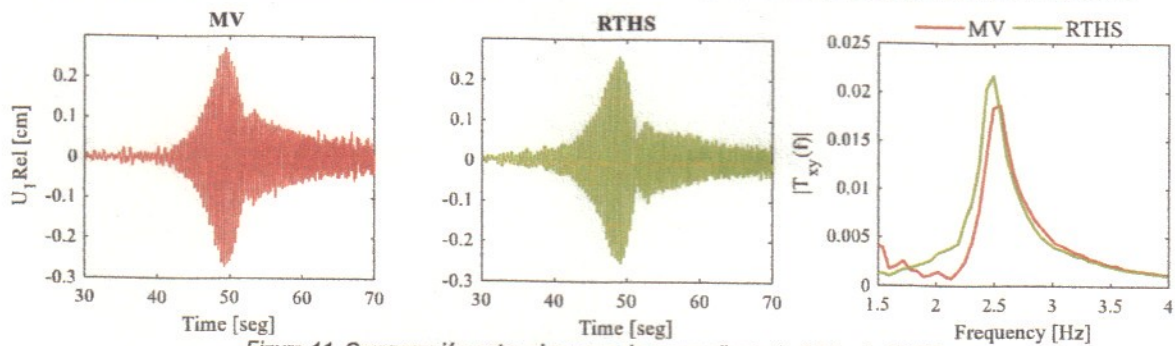


Figura 11. Comparación entre el ensayo de mesa vibratoria (MV) y la SHTR

Para el sistema Estructura-AF, el ensayo de mesa vibratoria reportó una reducción de la respuesta pico de 76.6% y RMS de 75.6% en el piso uno. Así mismo, la SHTR alcanzó reducciones de 72.2% en la aceleración pico y RMS de 76.1%.

3.7. Evaluación del Sistema de transferencia de la RTHS

La evaluación del seguimiento del sistema de transferencia se realizó con los índices propuestos en la literatura, Ecs (6-11) [9], [10].

$$FEI = \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{y_m(j)}{y_c(j)} \cdot \frac{\|y_c(j)\|^4}{\sum_{i=1}^N \|y_c(i)\|^4} \right\} \quad (6)$$

$$A_0 = \|FEI\| \quad (7)$$

$$\phi = \arctan[\text{Im}(FEI)/\text{Re}(FEI)] \quad (8)$$

$$\delta = -\frac{\phi}{2\pi f_{eq}} \quad (9)$$

$$f_{eq} = \frac{\sum_{j=1}^N \{\|y_c(j)\|^4 \cdot f_j\}}{\sum_{j=1}^N \|y_c(j)\|^4} \quad (10)$$

$$e_p = \frac{||x_c||^{max} - ||x_m||^{max}}{||x_m||^{max}} \quad (11)$$

Los resultados de la evaluación son presentados en las Tablas 6 y 7, y las figuras 12 y 13.

FEI	A ₀	ϕ°	δ(ms)	e _p (%)	f _{eq}
0.99334-0.13734i	1.0028	-7.8717	6.2839	0.3266	3.4796

Tabla 6. Índices de evaluación del sistema de transferencia (Estructura - AMS).

FEI	A_0	ϕ°	$\delta(\text{ms})$	$e_p(\%)$	f_{eq}
$1.0189+0.0568i$	1.02	3.2	-2.0	0.30	4.28

Tabla 7. Índices de evaluación del sistema de transferencia (Estructura - AF).

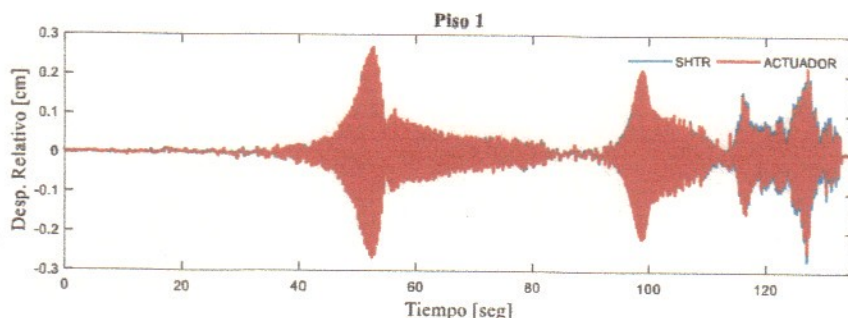


Figura 12. Seguimiento del actuador (Estructura - AF)

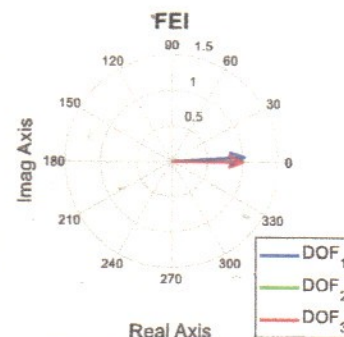


Figura 13. FEI (Estructura - AF)

3.8. Conclusiones

Los resultados obtenidos con el ensayo de mesa vibratoria muestran que el amortiguador de masa sintonizada (AMS), con una razón de masas de 1%, logró reducir la respuesta pico del piso tres en 74.4% y RMS de 63.9%, mientras que la SHTR reportó valores de reducción de respuesta pico de 69.8% y RMS de 62.5% en la estructura de prueba, con respecto a la no controlada. Por otra parte, la evaluación experimental del amortiguador de fricción pasivo (AF) reportó una reducción de respuesta pico en el piso uno de 76.6% y RMS de 75.6%, mientras que la SHTR obtuvo valores de 72.2% y 76.1%, respectivamente.

De acuerdo con los índices de evaluación del sistema de transferencia, se observó que presentó un alto nivel de seguimiento. Sin embargo, las diferencias encontradas entre el ensayo de mesa vibratoria y la SHTR se deben a las limitaciones e inexactitud del modelo de la subestructura numérica, y a los niveles de ruido presentes durante la medición de fuerza del AMS y el AF. No obstante, la SHTR logró estimar correctamente la respuesta RMS de los sistemas estructura-AMS y estructura-AF, y sobreestimó la respuesta pico en comparación con el ensayo de mesa vibratoria.

4. Impactos actual o potencial:

Impacto en la academia	Se comprobó la eficacia de las SHTR como una metodología para el análisis de estructuras complejas. Esto permitirá la evaluación precisa del comportamiento dinámico de estructuras con tecnologías para la reducción de vibraciones a escala reducida o real.
	Con la evaluación de estructuras no convencionales a escala completa utilizando SHTR se podrán incluir los efectos no lineales y concentraciones de esfuerzos en los procesos de diseño.
	Esta metodología de análisis permitirá la generación de curvas de resistencia de elementos estructurales no convencionales, teniendo en cuenta condiciones específicas de frontera para reducir la incertidumbre en la implementación de conexiones que involucren nuevos materiales.
Impacto en el medio ambiente y la sociedad	Se disminuirán considerablemente los residuos generados por los ensayos destructivos a escala completa para evaluar el comportamiento dinámico de determinados elementos de una edificación, lo cual es una solución para el uso adecuado de los materiales, ya que solo emplean aquellos que conformen la SE.

4.1. Referencias

- [1] D. Gomez, "Comparison of frequency response and neural network techniques for system identification of an actively controlled structure [comparación entre técnicas de respuesta en frecuencia y redes neuronales para la identificación de una estructura con control act," *DYNA*, vol. 78, no. 170, pp. 79–89, 2011.
- [2] P. T. Daniel Gomez, Johannio Marulanda, "SISTEMAS DE CONTROL PARA LA PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS CIVILES SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS," *Dyna*, vol. 155, pp. 77–89, 2008.
- [3] G. Mosqueda, B. Stojadinovic, and S. A. Mahin, "Real-Time Error Monitoring for Hybrid Simulation. Part I: Methodology and Experimental Verification," *J. Struct. Eng.*, vol. 133, no. 8, pp. 1100–1108, 2007.
- [4] Y. Qian, G. Ou, A. Maghareh, and S. J. Dyke, "Parametric identification of a servo-hydraulic actuator for real-time hybrid simulation," vol. 48, pp. 260–273, 2014.
- [5] F. Zhu, J. T. Wang, F. Jin, and L. Q. Lu, "Real-time hybrid simulation of full-scale tuned liquid column dampers to control multi-order modal responses of structures," *Eng. Struct.*, vol. 138, pp. 74–90, 2017.
- [6] R. Veto, S. J. Dyke, L. Liu, P. Wang, F. Sun, and C. Lu, "Employing wireless sensing technology in smart structures," vol. 3, no. May, 2006.
- [7] B. Reviews, G. Maier, T. T. Soong, G. F. Dargush, and J. Wiley, "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering Buckling Experiments : Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures – Vol . 1 : Basic Concepts , Columns , Beams and Plates," vol. i, pp. 65–66, 1997.
- [8] S. P. Ontiveros-Pérez, L. F. F. Miguel, and J. D. Riera, "Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions," *Eng. Struct.*, vol. 190, no. April, pp. 276–284, 2019.
- [9] R. Christenson *et al.*, "Hybrid Simulation: A Discussion of Current Assessment Measures," no. Cmmi, pp. 1–31, 2014.
- [10] T. Guo, C. Chen, W. Xu, and F. Sanchez, "A frequency response analysis approach for quantitative assessment of actuator tracking for real-time hybrid simulation," *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 4, 2014.



5. Productos:

Tabla No. 1. Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS		No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
Productos de nuevos conocimientos									
Artículo en revista ISI-SCOPUS:	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
		1 Aceptado 1 Enviado			1 Aceptado				
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C	
							1 Aceptado		
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados		No. de tesis		No. De estudiantes Vinculados		No. De tesis		
Estudiantes de pregrado	2				2				
Estudiantes de doctorado	1				1				
Productos de divulgación									
Publicaciones en revistas no indexadas									
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	1				1				



Tabla No. 2. Detalle de productos

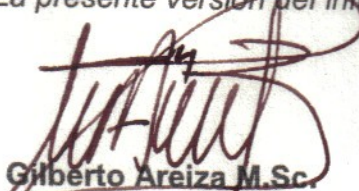
Tipo de producto:	Artículo aceptado en revista Categoría B
Nombre General:	Revista: INGE CUC (Año 2019) Vol: 15. Núm: 2.
Nombre Particular:	Artículo: Evaluación del Desempeño de un Amortiguador de Masa Sintonizado no Lineal Mediante Simulaciones Híbridas en Tiempo Real
Ciudad y fechas:	Revista INGE CUC 2019
Participantes:	• Carlos Andrés Riascos González, PhD • Shirley Dyke, PhD • Peter Thomson, PhD
Sitio de información:	https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural G-7

Tipo de producto:	Artículo aceptado en revista Categoría Q1
Nombre General:	Revista: Structural Control and Health Monitoring (Año 2019)
Nombre Particular:	Artículo: Structural control of a grandstand using a semi-active pressurized tuned liquid column damper considering effects of passive crowds
Ciudad y fechas:	Revista Structural Control and Health Monitoring, 2019
Participantes:	• Carlos Andrés Riascos González, PhD • Johannio Marulanda, PhD • Peter Thomson, PhD
Sitio de información:	https://onlinelibrary.wiley.com/journal/15452263
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural G-7



Tipo de producto:	Ponencia
Nombre General:	Congreso: IX Congreso nacional de ingeniería sísmica
Nombre Particular:	Ponencia: Control Estructural Semiactivo para Excitación Sísmica con un Amortiguador de Líquido Sintonizado
Ciudad y fechas:	Cali - Colombia 29 de Mayo de 2019
Participantes:	• Carlos Andrés Riascos González, PhD • Peter Thomson, PhD
Sitio de información:	Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural G-7

La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:


Gilberto Areiza M.Sc.
Investigador Principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones