



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

EVALUACIÓN DEL ALGORITMO ACELERADO DE TIEMPO-HISTORIA ITERATIVO CON FILTROS DE WIENER EN SIMULACIÓN HÍBRIDA DE EDIFICIOS CON AMORTIGUADORES VISCOSOS

Memoria de Título presentada por

Elías Daniel Zamora Olivares

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Gaston Ferandois

Junio de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación del algoritmo acelerado de tiempo-historia iterativo con filtros de Wiener en simulación híbrida de edificios con amortiguadores viscosos.

Nombre del candidato(a): Elías Daniel Zamora Olivares

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Casa Central Valparaíso

Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Gaston Fernandois Cornejo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 15/07/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 15/07/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA MEMORIA:

**EVALUACIÓN DEL ALGORITMO ACELERADO DE TIEMPO-
HISTORIA ITERATIVO CON FILTROS DE WIENER EN SIMULACIÓN
HÍBRIDA DE EDIFICIOS CON AMORTIGUADORES VISCOSOS**

AUTOR:

ELÍAS DANIEL ZAMORA OLIVARES

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Gaston Fernandois	
Miembro 1 Comisión	Claudio Sepúlveda	
Miembro 2 Comisión	Fernando Gómez	

Valparaíso, Chile, junio de 2026

EVALUACIÓN DEL ALGORITMO ACELERADO DE TIEMPO-HISTORIA ITERATIVO CON FILTROS DE WIENER EN SIMULACIÓN HÍBRIDA DE EDIFICIOS CON AMORTIGUADORES VISCOSOS

Elías Zamora¹, Gaston Fernandois²

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

1 Resumen

El presente trabajo evalúa el desempeño del algoritmo Accelerated Time History Iteration (ATHI) en simulaciones híbridas offline de estructuras con amortiguadores viscosos. En este enfoque, la estructura se divide en una subestructura numérica y una subestructura experimental, las cuales intercambian historias de tiempo completas hasta alcanzar compatibilidad en la interfaz. ATHI incorpora identificación de sistemas e iteraciones virtuales para reducir la cantidad de iteraciones reales requeridas por el método Time History Iteration (THI). Para el análisis, se desarrollan modelos numéricos de un sistema de un grado de libertad y de un edificio de diez grados de libertad con amortiguadores distribuidos en altura. Los casos estudiados consideran configuraciones con una y dos subestructuras experimentales. El desempeño de los métodos se evalúa mediante la compatibilidad de interfaz, el número de iteraciones reales y la precisión de las respuestas obtenidas respecto de una estructura de referencia no particionada.

A partir de los casos analizados, THI alcanza la compatibilidad de interfaz y reproduce de manera adecuada la respuesta de referencia, aunque requiere más iteraciones reales. ATHI disminuye esas iteraciones y mantiene una precisión global adecuada, sin mejorar necesariamente todas las magnitudes evaluadas. En el caso de un grado de libertad, la identificación mediante filtros de Wiener regularizados no mejoró el desempeño respecto del ajuste por mínimos cuadrados, ya que la convergencia obtenida en el bucle virtual no se tradujo en una convergencia real satisfactoria.

2 Introducción

La validación del desempeño sísmico de estructuras requiere de métodos y técnicas capaces de reproducir con fidelidad respuestas dinámicas bajo solicitaciones reales, con escalas y condiciones de contorno representativas. Las estrategias tradicionales como ensayos cuasi-estáticos y pruebas en mesas vibradoras, presentan limitaciones conocidas. Los ensayos cuasi-estáticos se basan en cargas cíclicas controladas, útiles para caracterizar propiedades histeréticas y de resistencia, sin embargo, por su carácter estático, no obtienen la respuesta dinámica de la estructura (Guo et al., 2024). La mesa vibradora es un método directo para observar la respuesta sísmica, pero las pruebas a gran escala exigen equipos e infraestructura de alta demanda. Cuando se recurre a modelos a menor escala emergen incertidumbres de similitud que pueden ser significativas (Guo et al., 2024).

El método pseudo-dinámico propuesto por (Hakuno et al., 1969) es la forma más temprana de ensayo híbrido, consiste en aplicar desplazamientos cuasi-estáticos al espécimen mientras la inercia y el amortiguamiento se calculan numéricamente para emular acciones sísmicas sin equipos dinámicos de alta potencia. No obstante, este tipo de ensayos no resulta adecuado cuando la subestructura experimental contiene componentes sensibles a la velocidad (Guo et al., 2024), por ejemplo, amortiguadores viscosos.

La evolución natural condujo a Real Time Hybrid Simulation (RTHS), que exige interacción estricta en tiempo real entre el modelo numérico y la subestructura experimental. Hitos clave incluyen el desarrollo del método pseudo-dinámico en tiempo real (Nakashima & Takaoka', 1992) y luego, su generalización a sistemas de múltiples grados de libertad (Nakashima & Masaoka, 1999). La investigación de RTHS se ha concentrado en tres aristas. Primero, se trabajó en métodos computacionales eficientes, en donde

el método de diferencias centrales fue adaptado y evaluado para RTHS, analizando estabilidad y precisión (Wu et al., 2005). También se propuso el operator-splitting específico para ensayos en tiempo real (Wu et al., 2006), junto con el esquema explícito e incondicionalmente estable de Chen y Ricles (Chen et al., 2008, 2009), familias explícitas de algoritmos con explicitud tanto para desplazamientos y velocidad (Gui et al., 2014). Segundo, se avanzó en algoritmos de control de actuadores en donde se desarrollaron estrategias de seguimiento en tiempo real basadas en modelo con feedforward y feedback para lograr trazado preciso (Phillips & Spencer, 2013). También se evaluaron esquemas numéricos para mitigar la dinámica no ideal de actuadores servo-hidráulicos en ensayos híbridos (Bonnet et al., 2007). Tercero, se diseñaron técnicas de compensación de retardo, en donde se implementó una compensación del retardo y de la dinámica del actuador sustentada en la estimación rápida y extrapolación con validación experimental (Ahmadzadeh et al., 2008). Asimismo, se propuso un compensador adaptativo de series temporales que actualiza en línea los coeficientes para atenuar retardos variables en el sistema servo-hidráulico (Chae et al., 2013).

El RTHS en línea exige, de forma simultánea, cómputo estable y eficiente, carga precisa con retardo mínimo y comunicación sincronizada sin latencias. El cumplimiento simultáneo de estas condiciones suele implicar modelos simplificados y algoritmos rápidos, con compromisos de exactitud, en donde la compensación no elimina todos los retardos y las demandas de software y hardware elevan los costos de implementación (Guo & Pan, 2025).

Ante estas restricciones ha surgido la simulación híbrida offline o iterativa, que desacopla la ejecución experimental del cálculo numérico y busca la compatibilidad y el equilibrio mediante iteraciones de historias de tiempo completas. El método Time History Iteration (THI) realiza múltiples iteraciones, ajustando la señal hasta lograr convergencia sin imponer la condición restrictiva de tiempo real (Guo et al., 2024). Sobre esta base, el esquema Accelerated Time History Iteration (ATHI) acelera el proceso integrando dos componentes claves, identificación de una función de transferencia discreta de la subestructura física, la cual es optimizada mediante Two-Loop Parameter Optimization partiendo de un ajuste por mínimos cuadrados, e iteraciones virtuales que sustituyen parte de las corridas físicas por simulación de la subestructura física identificada (Guo & Pan, 2024). En trabajos recientes se demostró la viabilidad del enfoque involucrando múltiples subestructuras experimentales, con reutilización secuencial del mismo equipo y espécimen (Guo & Pan, 2025).

La aproximación offline es especialmente atractiva para estructuras con amortiguadores viscosos, ya que permite reutilizar el mismo equipo de ensayo y un espécimen representativo para caracterizar varios dispositivos, evitando utilizar muchos actuadores a la vez y reduciendo los efectos de latencia (Guo & Pan, 2025). Además, en el esquema offline se evitan las restricciones del retardo en tiempo real (Guo & Pan, 2024), y la convergencia iterativa asegura la compatibilidad en frontera y el equilibrio.

En este trabajo se evalúa el esquema ATHI en simulación híbrida offline para estructuras con múltiples amortiguadores viscosos distribuidos en altura. En particular, se compara la identificación del sistema dinámico mediante mínimos cuadrados con una alternativa basada en filtros de Wiener regularizados. Con esto se busca analizar si el uso de Wiener permite disminuir errores en la compatibilidad y disminuir la cantidad de iteraciones para lograr la convergencia.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño del algoritmo Accelerated Time History Iteration (ATHI) en simulaciones híbridas offline aplicadas a sistemas estructurales con amortiguadores viscosos, considerando el uso de filtros de Wiener regularizados en el esquema de identificación, con el fin de comparar sus resultados en términos de precisión y robustez respecto del esquema original basado en mínimos cuadrados (LS).

3.2 Objetivos específicos

OE1: Revisar los fundamentos del algoritmo THI y ATHI, y su integración con métodos de identificación basados en mínimos cuadrados y filtros de Wiener regularizados.

OE2: Modelar en MATLAB estructuras de 1 y 10 grados de libertad con amortiguadores viscosos, y configurar simulaciones híbridas offline mediante ATHI con ambos esquemas de identificación.

OE3: Comparar el desempeño de THI y ATHI con mínimos cuadrados y filtros de Wiener, evaluando precisión, robustez, número de iteraciones y sensibilidad al parámetro λ .

4 Marco teórico

4.1 Ensayos estructurales

Los ensayos experimentales en el ámbito de la ingeniería estructural permiten comprender el comportamiento de una estructura o de sus componentes bajo diversas condiciones. Dada la complejidad y el alto costo de realizar pruebas a escala real que lleven a la estructura hasta su fallo, los métodos de ensayo suelen implicar adaptaciones en la escala física o en la escala temporal. Estas modificaciones pueden introducir desafíos de similitud al extrapolar los resultados al comportamiento dinámico completo de la estructura (Blakeborough et al., 2001), especialmente cuando esta exhibe una respuesta no lineal o incorpora elementos sensibles a la velocidad de carga, como los amortiguadores (Nakashima & Masaoka, 1999).

Dentro de los métodos de ensayo, los cuasi-estáticos, de mesa vibratoria y pseudo-dinámicos, presentan limitaciones conocidas. Los ensayos en mesa vibratoria excitan dinámicamente el sistema y pueden representar condiciones reales, pero sus requerimientos de alta capacidad y costo, junto con la dificultad de un control preciso de la mesa, conducen con frecuencia al uso de modelos a escala, donde el escalamiento del comportamiento no lineal presenta incertidumbres (McCrum & Williams, 2016). Los ensayos cuasi-estáticos no capturan efectos dinámicos de los terremotos, afectando la representatividad de las demandas. Finalmente, el método pseudo-dinámico, aunque permite probar estructuras grandes, presenta dificultades para representar con fidelidad los efectos dinámicos debido al control por desplazamiento ya que las deformaciones no se conocen a priori y dependen de la evolución de la rigidez del espécimen (Shield et al., 2001).

La simulación híbrida surge como respuesta directa a estas limitaciones, ya que permite ensayar físicamente los componentes críticos mientras el resto de la estructura se integra numéricamente, combinando representatividad y eficiencia computacional.

4.2 Simulación híbrida en tiempo real (RTHS)

La primera aproximación al método pseudo-dinámico fue introducida por Hakuno et al., 1969, utilizando un computador analógico para resolver la ecuación de movimiento correspondiente a un sistema de un único grado de libertad. El ensayo pseudo-dinámico fue posteriormente formalizado por Takanashi et al. (1975), quien discretizó la ecuación de movimiento en el dominio del tiempo para utilizar un computador digital para resolverla. Posteriormente, la técnica evolucionó hacia la subestructuración, propuesta por Dermitzakis (1985), permitiendo ensayar físicamente solo una parte de la estructura, mientras que el resto se modelaba numéricamente, lo que dio paso a la simulación híbrida.

La simulación híbrida integra pruebas físicas con modelos computacionales para analizar estructuras complejas de manera más eficiente y con menor costo. En este enfoque, fenómenos como terremotos o vientos se reproducen mediante cálculos numéricos, mientras que los componentes más críticos se someten a ensayos experimentales. Ambos sistemas interactúan en un ciclo iterativo, el modelo calcula las cargas que se aplican al espécimen, este responde y sus datos se utilizan para actualizar la simulación, logrando una representación más realista del comportamiento estructural.

En su modalidad tradicional, la simulación híbrida suele ejecutarse a una escala de tiempo extendida, lo que reduce las exigencias de velocidad respecto de la RTHS, sin embargo, las pausas entre secuencias

de carga y la aplicación lenta pueden inducir efectos de tasa de deformación y relajación de fuerzas que introducen errores. Además, los retardos también afectan los resultados, aunque suelen ser menos críticos que en RTHS (Christenson et al., 2014). Sin embargo, también impone limitaciones, por ejemplo, no se puede aplicar un historial de carga con velocidades reales, lo que la hace inadecuada para estudiar dispositivos altamente dependientes de la velocidad (Nakashima, 2020; Phillips & Spencer, 2013).

Debido a estas limitaciones, surge la Simulación Híbrida en Tiempo Real (RTHS). El primer ensayo RTHS fue llevado a cabo por Nakashima & Takaoka' (1992), insertando un servomecanismo digital entre el integrador numérico y el controlador del actuador, con seguimiento preciso y ejecución perfectamente en tiempo real. Posteriormente, se propusieron múltiples estrategias para mejorar la estabilidad y precisión de estos ensayos, incluyendo control del retardo temporal introducido por los actuadores hidráulicos y otros elementos físicos del sistema (Horiuchi et al., 1999).

En este contexto, la comunidad investigadora desarrolló diversos algoritmos numéricos de integración explícita y control para enfrentar los desafíos de la ejecución en tiempo real. Por ejemplo, Chen & Ricles (2008, 2009) propusieron un algoritmo de integración explícito y estable conocido como algoritmo CR, mientras que Phillips & Spencer (2013) desarrollaron un método de control servo-hidráulico basado en retroalimentación y anticipación para seguimiento de desplazamientos en tiempo real. Asimismo, Neild et al. (2005) presentaron una estrategia adaptativa de subestructuración basada en síntesis de control mínimo para mejorar la precisión en ensayos RTHS. Finalmente, métodos como los de Wallace et al. (2005) y Chae et al. (2013) introdujeron métodos de compensación para abordar los efectos del retardo en los ensayos.

A pesar de los avances tecnológicos, los ensayos RTHS siguen enfrentando desafíos importantes, como la necesidad de actuadores de alta velocidad, compensación de retardo robusta y una cuidadosa sincronización entre el modelo numérico y el sistema físico. Estos aspectos continúan siendo foco de investigación activa.

4.3 Simulación híbrida offline

La simulación híbrida en tiempo real (RTHS) divide un sistema estructural de referencia en una subestructura experimental, correspondiente a la componente compleja o incierta de modelar, como disipadores, aisladores, elementos no lineales y en una subestructura numérica modelada computacionalmente. En los esquemas online, ambos subsistemas interactúan en tiempo real, en cambio, en el esquema offline, el cálculo numérico y el ensayo físico se desacoplan y se ejecutan secuencialmente intercambiando historias completas de tiempo, lo que reduce exigencias de hardware y latencias, y mejora estabilidad y costos sin sacrificar exactitud cuando se garantiza la coordinación de fronteras mediante iteraciones.

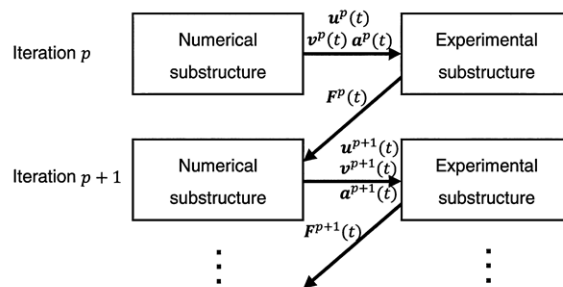


Figura 1. Esquema RTHS Offline (Guo et al., 2024).

Los métodos offline plantean un proceso iterativo de coordinación de fronteras donde en la iteración p , las aceleraciones/velocidades/desplazamientos de frontera que excitan la subestructura experimental producen historias de fuerzas reactivas que se aplican a la subestructura numérica, con ello se actualizan las señales de la siguiente iteración hasta alcanzar compatibilidad dinámica.

Este enfoque permite reutilizar equipamiento y especímenes reduciendo el costo de montaje. No obstante, el esquema offline requiere un algoritmo de iteración estable y eficiente.

4.4 Time History Iteration (THI)

El método Time History Iteration (THI) es un algoritmo iterativo propuesto para simulaciones híbridas offline cuyo objetivo es lograr la compatibilidad en la frontera entre la subestructura numérica (SN) y la subestructura experimental (SE). En el trabajo original de Guo et al., el algoritmo se formula en términos de las aceleraciones de los nodos de frontera $\mathbf{a}_E^{(p)}$ y $\mathbf{a}_N^{(p)}$. En esta memoria se adopta una formulación completamente análoga, pero expresada en términos de desplazamientos relativos en la interfaz, $\mathbf{u}_E^{(p)}$ y $\mathbf{u}_N^{(p)}$. Esta elección no es restrictiva, la formulación del método es igualmente válida para cualquier variable cinemática como velocidad, aceleración o drift.

Considerando un sistema particionado en una SN y una SE, acopladas en un grado de libertad (GDL) de frontera, el objetivo de la iteración es que las historias de desplazamiento $\mathbf{u}_E^{(p)}$ y $\mathbf{u}_N^{(p)}$ coincidan en la interfaz, es decir,

$$\mathbf{u}_E^{(p)} \approx \mathbf{u}_N^{(p)} \quad (1)$$

de modo que se cumpla la compatibilidad cinemática en el GDL de frontera.

4.4.1 Esquema general del método THI

En la Figura 2 se muestra un esquema del algoritmo THI adoptado en esta memoria. En la iteración p , la historia de desplazamientos $\mathbf{u}_E^{(p)}$ se aplica a la SE, que devuelve una fuerza de reacción $\mathbf{F}_E^{(p)}$ en el GDL de frontera. Esta fuerza de interfaz, aplicada como carga de frontera junto con la excitación sísmica, se utiliza para calcular la respuesta de la SN, obteniéndose la historia de desplazamientos $\mathbf{u}_N^{(p)}$ en el mismo GDL. Comparando ambas historias se calcula el error normalizado, si este error supera una tolerancia fijada, la señal $\mathbf{u}_E^{(p)}$ se actualiza para generar $\mathbf{u}_E^{(p+1)}$, repitiendo el proceso hasta que se alcanza la convergencia.

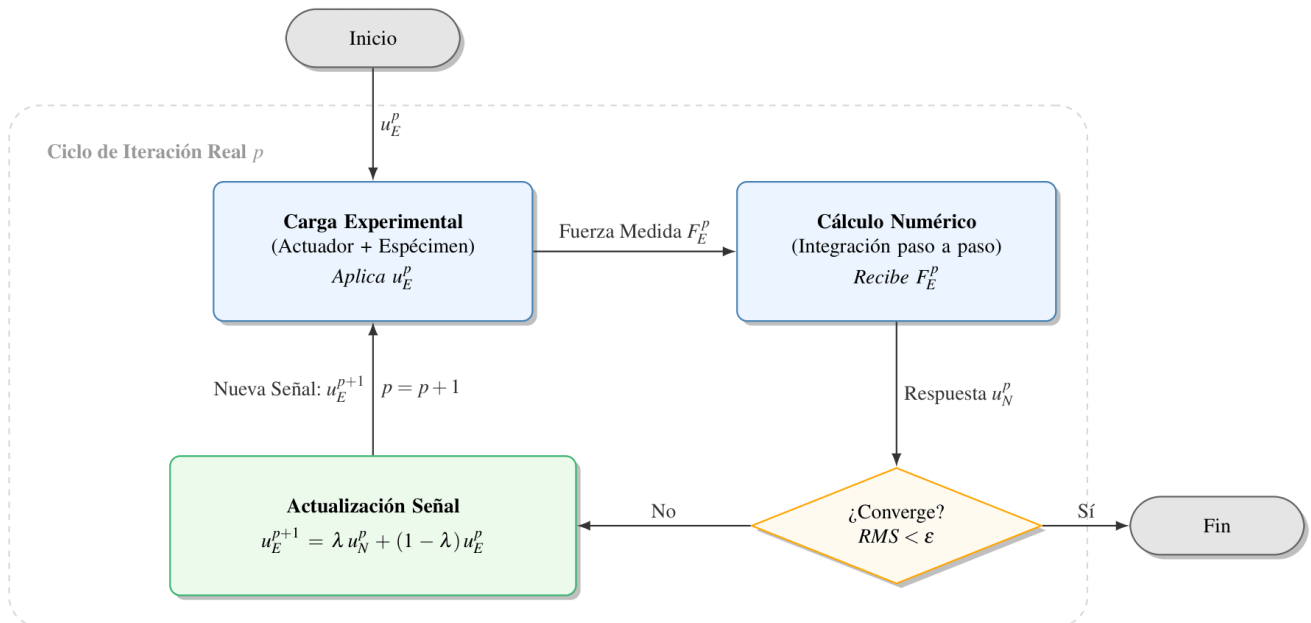


Figura 2. Esquema algoritmo THI.

En el esquema de la Figura 2 intervienen las siguientes señales:

- $\mathbf{u}_E^{(p)}$: historia de desplazamientos aplicada a la SE en la iteración p .
- $\mathbf{F}_E^{(p)}$: historia de fuerzas de interfaz medida en la SE durante la iteración p .
- $\mathbf{u}_N^{(p)}$: historia de desplazamientos calculada en la SN en la iteración p .

Para iniciar el método THI se requiere definir una historia inicial de desplazamiento a imponer en el GDL de frontera para la primera iteración real. Siguiendo el procedimiento de Guo et al., esta señal inicial se obtiene a partir de un cálculo previo de la subestructura numérica en el que se considera únicamente la excitación externa (sismo) y se desprecia, en esta etapa inicial, la fuerza de reacción proveniente de la subestructura experimental, es decir, $\mathbf{F}_E^{(0)} = 0$. La historia de desplazamiento resultante en el GDL de frontera se denota $\mathbf{u}_N^{(0)}$, donde el superíndice 0 representa un cálculo de referencia previo al inicio de las iteraciones reales. En consecuencia, la historia inicial a imponer en la primera iteración real se define como:

$$\mathbf{u}_E^{(1)} = \mathbf{u}_N^{(0)}, \quad (2)$$

Con esta condición inicial queda definido el comando de desplazamiento para ejecutar la primera iteración real del esquema THI.

4.4.2 Criterio de convergencia (Error RMS)

En la iteración p se define el error de compatibilidad en el GDL de interfaz como:

$$\mathbf{e}^{(p)} = \mathbf{u}_N^{(p)} - \mathbf{u}_E^{(p)}, \quad (3)$$

el cual cuantifica la diferencia entre las historias de desplazamiento calculado en la SN y el desplazamiento impuesto en la SE.

Siguiendo la formulación original del método, la historia de error se resume en un indicador escalar mediante el error RMS (raíz del error cuadrático medio) normalizado:

$$error_{RMS}^{(p)} = \frac{1}{|\mathbf{u}_{N,max}^{(p)}|} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (e_i^{(p)})^2} < \epsilon, \quad (4)$$

donde $e_i^{(p)}$ es el i -ésimo elemento de $\mathbf{e}^{(p)}$ y $|\mathbf{u}_{N,max}^{(p)}|$ es el valor máximo absoluto de $\mathbf{u}_N^{(p)}$. De este modo, el $error_{RMS}^{(p)}$ es un indicador que mide el desajuste relativo entre las historias de desplazamiento $\mathbf{u}_E^{(p)}$ y $\mathbf{u}_N^{(p)}$ respecto de la magnitud máxima de la respuesta en la interfaz. La condición de convergencia del método THI se expresa como $error_{RMS}^{(p)} < \epsilon$, donde ϵ es un umbral pequeño que representa el nivel de incompatibilidad aceptable.

4.4.3 Cálculo de la señal de carga para la siguiente iteración

La señal de entrada en la iteración $p + 1$ se obtiene como una combinación lineal de la historia impuesta a la SE y la respuesta calculada en la SN en la iteración anterior, es decir:

$$\mathbf{u}_E^{(p+1)} = \lambda \mathbf{u}_N^{(p)} + (1 - \lambda) \mathbf{u}_E^{(p)} \quad (5)$$

donde $0 < \lambda \leq 1$ es el parámetro de ponderación, el cual controla qué fracción del error se incorpora en la nueva historia de desplazamientos $\mathbf{u}_E^{(p+1)}$.

4.5 Accelerated Time History Iteration (ATHI)

El método Accelerated Time History Iteration (ATHI) fue propuesto por Guo & Pan como una extensión del algoritmo THI para simulaciones híbridas offline. Su objetivo principal es reducir el número de iteraciones reales necesarias para lograr la compatibilidad en la interfaz entre la SN y la SE.

En casos complejos, por ejemplo, cuando existen resonancia, no linealidad o ruido de medición, el método THI puede requerir un número importante de iteraciones, lo cual provoca un aumento en el costo computacional y experimental. Para sobreponerse a estas dificultades, el método ATHI introduce dos ideas clave para acelerar el proceso:

1. **Identificación de sistemas:** se identifica un modelo discreto equivalente (función de transferencia) que aproxima la relación entrada-salida en la interfaz entre SN y SE.
2. **Iteraciones virtuales:** sobre el modelo identificado se realizan iteraciones virtuales, en las que se aplica el mismo esquema de actualización que en THI, pero sin necesidad de volver a cargar físicamente la SE ni de integrar nuevamente la SN.

4.5.1 Esquema general del método ATHI

La Figura 3 ilustra el esquema general del método ATHI, en dicho esquema se representa el ciclo de iteración real p :

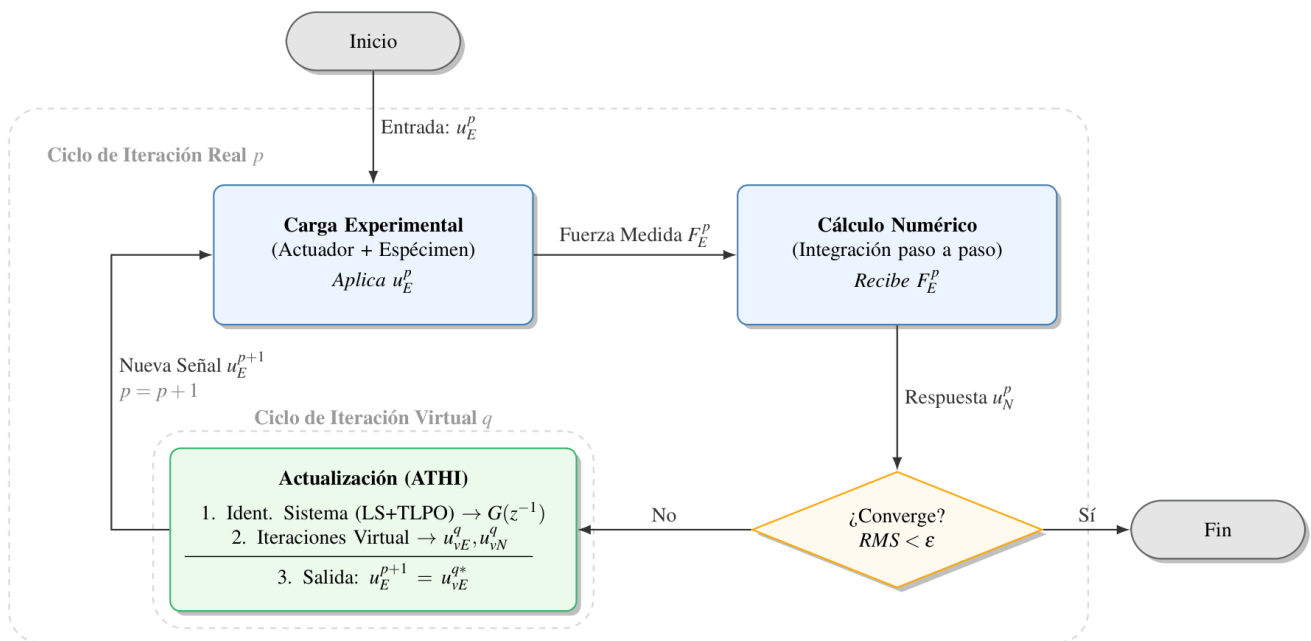


Figura 3. Esquema general del método ATHI

- **Carga experimental (actuador + espécimen):** recibe como entrada la historia de desplazamientos $\mathbf{u}_E^{(p)}$ y aplica esta señal a la SE. Como salida se obtiene la fuerza medida en la interfaz $\mathbf{F}_E^{(p)}$.
- **Cálculo numérico:** la SN se integra paso a paso, recibiendo como acciones el sismo y la fuerza de reacción $\mathbf{F}_E^{(p)}$. El resultado es la respuesta en la frontera $\mathbf{u}_N^{(p)}$.
- **Criterio de convergencia:** a partir de $\mathbf{u}_E^{(p)}$ y $\mathbf{u}_N^{(p)}$ se calcula el error RMS, si se cumple la condición de convergencia, el proceso finaliza, en caso contrario, se activa el bloque de actualización ATHI.

En la parte inferior de la misma figura se representa el ciclo de iteración virtual q . Cuando la condición de convergencia no se cumple, los datos de la iteración real p se envían al bloque de Actualización (ATHI), donde se realizan los siguientes pasos:

1. **Identificación del sistema (planta virtual):** se obtiene una función de transferencia discreta $G(z^{-1})$ que aproxima el comportamiento conjunto de SN + SE en la frontera, utilizando los datos de entrada y salida de la última iteración real.
2. **Iteraciones virtuales:** la función identificada reemplaza la carga física de la SE y la integración de la SN. Sobre esta planta virtual se ejecutan múltiples iteraciones virtuales de bajo costo computacional, actualizando las historias virtuales de desplazamiento $\mathbf{u}_{vE}^{(q)}$ mediante la regla THI hasta satisfacer el criterio de convergencia.
3. **Asignación de salida:** Una vez que el ciclo virtual converge, la última señal virtual obtenida se extrae y se asigna como la nueva historia de comando de desplazamiento para la siguiente iteración real ($\mathbf{u}_E^{(p+1)} = \mathbf{u}_{vE}^{(q*)}$).

De este modo, el método ATHI utiliza el modelo identificado para acercar la señal de entrada a la solución deseada.

4.5.2 Identificación de sistemas mediante modelo ARX

En el método ATHI se identifica una planta virtual discreta $G(z^{-1})$ que aproxima la relación entrada-salida en la interfaz SE-SN a partir de los datos de la última iteración real. Esta relación se modela como:

$$\mathbf{y}_{Id} = G(z^{-1}) \mathbf{u}_{Id} \quad (6)$$

donde $\mathbf{u}_{Id}$ representa la historia de entrada aplicada en el GDL de frontera, por otro lado $\mathbf{y}_{Id}$ es la historia de respuesta asociada en ese mismo GDL. Para la iteración real p , se adoptan como señales de identificación:

$$\mathbf{u}_{Id} = \mathbf{u}_E^{(p)}, \quad \mathbf{y}_{Id} = \mathbf{u}_N^{(p)} - \mathbf{u}_N^{(0)}. \quad (7)$$

La sustracción del término $\mathbf{u}_N^{(0)}$ permite aislar el aporte asociado a la interacción con la SE, evitando que el efecto del sismo actúe como una perturbación externa durante la identificación. Con estas definiciones, la relación anterior puede escribirse también como:

$$\mathbf{u}_N^{(p)} = G(z^{-1}) \mathbf{u}_E^{(p)} + \mathbf{u}_N^{(0)} \quad (8)$$

En este contexto $G(z^{-1})$ se aproxima mediante una estructura tipo ARX, adoptando una función de transferencia discreta de la forma:

$$G(z^{-1}) = z^{-d} \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_B} z^{-n_B}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_A} z^{-n_A}} \quad (9)$$

donde a_i y b_i son parámetros por identificar, n_A y n_B son los órdenes de los polinomios del denominador y numerador respectivamente, y d representa el retardo discreto. La salida escalar $y_{Id}(i)$ y la entrada escalar $u_{Id}(i)$ en el instante discreto i se pueden escribir como:

$$\begin{aligned} y_{Id}(i) + a_1 y_{Id}(i-1) + \dots + a_{n_A} y_{Id}(i-n_A) \\ = b_0 u_{Id}(i-d) + b_1 u_{Id}(i-d-1) + \dots + b_{n_B} u_{Id}(i-d-n_B). \end{aligned} \quad (10)$$

Para obtener una estimación inicial de los parámetros del modelo ARX se adopta un esquema de mínimos cuadrados (Least Squares), consistente con la formulación del método ATHI. Al apilar la información disponible se construye una matriz de regresores Φ (según la estructura ARX) y el vector de salidas $\mathbf{y}_{Id}$, obteniéndose la estimación:

$$\hat{\theta}_{LS} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y_{Id} \quad (11)$$

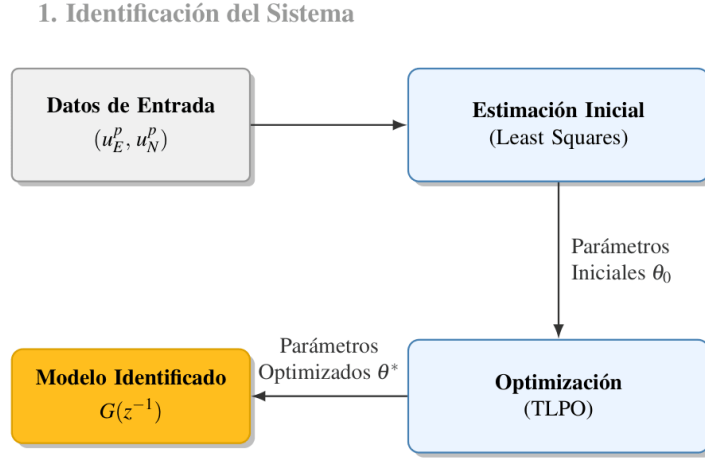


Figura 4. Bloque de Identificación del sistema.

La Figura 4 resume el procedimiento de identificación de la planta virtual, en donde, a partir de los datos de una iteración real p , se utilizan las historias $\mathbf{u}_E^{(p)}$ y $\mathbf{u}_N^{(p)}$ para construir el modelo $G(z^{-1})$ en dos etapas:

1. **Estimación inicial (Least Squares):** mediante un esquema de mínimos cuadrados se obtiene un vector de parámetros iniciales $\hat{\theta}_{LS} = \theta_0$ para el modelo ARX.
2. **Optimización (TLPO):** se aplica un procedimiento de optimización en dos bucles (Two-Loop Parameter Optimization, TLPO) que ajusta los parámetros usando los algoritmos de Gauss-Newton (GNA) y Gradiente Descendente (GDA) para minimizar un criterio de error definido sobre la diferencia entre la respuesta medida y la respuesta simulada por el modelo.

4.5.3 Iteraciones virtuales basadas en THI

Una vez identificada la planta virtual, el método ATHI incorpora un bucle de iteraciones virtuales que emula el algoritmo THI, pero actuando sobre el modelo virtual identificado en lugar del sistema real. Se definen:

1. $\mathbf{u}_{vE}^{(q)}$: historia de desplazamientos de interfaz que actúa como entrada virtual de la planta en la iteración q .
2. $\mathbf{u}_{vN}^{(q)}$: respuesta virtual total asociada en el GDL de frontera. Se obtiene al aplicar $\mathbf{u}_{vE}^{(q)}$ al modelo identificado $G(z^{-1})$ y sumarle la respuesta de referencia $\mathbf{u}_N^{(0)}$ (calculada previamente sin el aporte de la SE), para así reincorporar el efecto base del sismo.

La Figura 5 muestra el bucle de iteración virtual. La señal inicial del ciclo se toma como la señal de comando utilizada en la última iteración real, es decir:

$$\mathbf{u}_{vE}^{(1)} = \mathbf{u}_E^{(p)} \quad (12)$$

2. Bucle de Iteración Virtual q

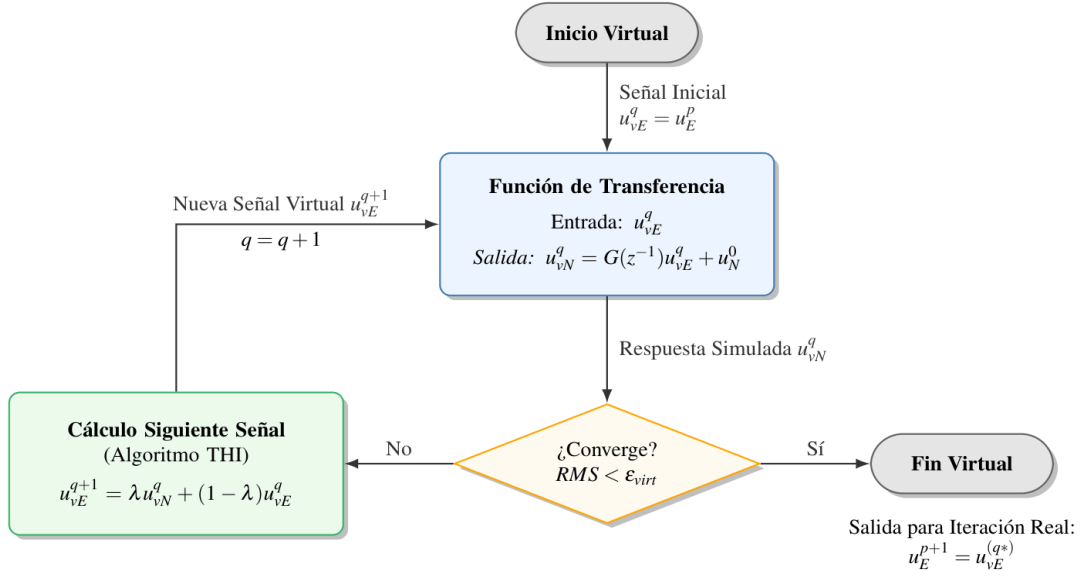


Figura 5. Bloque de iteraciones virtuales

En cada iteración virtual se siguen los siguientes pasos:

1. **Simulación con la planta virtual:** la función de transferencia $G(z^{-1})$ recibe como entrada $\mathbf{u}_{Id} = \mathbf{u}_{vE}^{(q)}$. La respuesta virtual total simulada $\mathbf{u}_{vN}^{(q)}$ en el GDL de frontera se obtiene explícitamente como:

$$\mathbf{u}_{vN}^{(q)} = G(z^{-1})\mathbf{u}_{vE}^{(q)} + \mathbf{u}_N^{(0)} \quad (13)$$

2. **Cálculo del error y criterio de convergencia virtual:** se evalúa el error de compatibilidad tal como se realiza en el método THI:

$$\mathbf{e}^{(q)} = \mathbf{u}_{vN}^{(q)} - \mathbf{u}_{vE}^{(q)}, \quad (14)$$

y se calcula el error RMS dentro del bucle de iteraciones virtuales:

$$error_{RMS,v}^{(q)} = \frac{1}{|\mathbf{u}_{vN,max}^{(q)}|} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (e_i^{(q)})^2} < \epsilon_{virt} \quad (15)$$

Donde $e_i^{(q)}$ es el i -ésimo elemento de $\mathbf{e}^{(q)}$ y $|\mathbf{u}_{vN,max}^{(q)}|$ es el valor máximo absoluto de la respuesta virtual en la iteración q . Si el $error_{RMS,v}^{(q)} < \epsilon_{virt}$, el ciclo termina, con ϵ_{virt} una tolerancia fijada para las iteraciones virtuales.

3. **Actualización de la señal virtual (THI):** si no se cumple la condición anterior, se actualiza la historia de entrada aplicando la misma regla de THI:

$$\mathbf{u}_{vE}^{(q+1)} = \lambda \mathbf{u}_{vN}^{(q)} + (1 - \lambda) \mathbf{u}_{vE}^{(q)}, \quad (16)$$

y se pasa a la iteración virtual $q + 1$.

Cuando el bucle virtual converge, la última señal calculada $\mathbf{u}_{vE}^{(q*)}$ se utiliza como salida del ciclo virtual y define la nueva historia de desplazamientos que se empleará en la siguiente iteración real:

$$\mathbf{u}_E^{(p+1)} = \mathbf{u}_{vE}^{(q*)} \quad (17)$$

4.6 Identificación de sistemas mediante Filtro de Wiener

En esta memoria se adopta el marco del filtro de Wiener para formular la identificación de sistemas lineales, con la intención de reemplazar el esquema LS+TLPO que proponen Guo et al. En particular, se aproxima la dinámica entrada-salida mediante un modelo FIR (Finite Impulse Response).

En el contexto del método ATHI, se tienen como señales de identificación las mismas definidas en la sección 4.5.2, es decir:

$$\mathbf{u}_{Id} = \mathbf{u}_E^{(p)}, \quad \mathbf{y}_{Id} = \mathbf{u}_N^{(p)} - \mathbf{u}_N^{(0)} \quad (18)$$

Dado este par de señales, se busca estimar un filtro FIR $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_L]^T$ de longitud L , tal que la salida estimada $\hat{y}(i)$ aproxime a $y_{Id}(i)$ en el sentido de minimizar el error cuadrático medio. Para ello, se define el vector de regresores:

$$\mathbf{x}(i) = [u_{Id}(i-1), u_{Id}(i-2), \dots, u_{Id}(i-L)]^T, \quad (19)$$

la salida estimada se escribe como:

$$\hat{y}(i) = \sum_{\ell=1}^L w_{\ell} u_{Id}(i-\ell) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(i), \quad (20)$$

El error de identificación o función de costo en el instante i se define como:

$$e(i) = y_{Id}(i) - \hat{y}(i) = y_{Id}(i) - \mathbf{w}^T \mathbf{x}(i), \quad (21)$$

el criterio de Wiener consiste en determinar $\mathbf{w}$ que minimice el error cuadrático medio

$$J(\mathbf{w}) = \mathbb{E}[e^2(i)] = \mathbb{E} \left[\left(y_{Id}(i) - \mathbf{w}^T \mathbf{x}(i) \right)^2 \right], \quad (22)$$

el mínimo de $J(\mathbf{w})$ se obtiene imponiendo que su gradiente respecto de $\mathbf{w}$ sea nulo:

$$\nabla_{\mathbf{w}} J(\mathbf{w}) = -2\mathbf{r} + 2\mathbf{R}\mathbf{w} = 0, \quad (23)$$

de esta condición se deduce directamente el sistema de ecuaciones de Wiener-Hopf, lo que proporciona los coeficientes del filtro FIR que mejor aproximan, en promedio, la salida medida

$$\mathbf{R}\mathbf{w} = \mathbf{r}, \quad (24)$$

donde:

- $\mathbf{R} = \mathbb{E}[\mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i)]$: Es la matriz de autocorrelación de la entrada:
- $\mathbf{r} = \mathbb{E}[\mathbf{x}(i)y_{Id}(i)]$: Es el vector de correlación cruzada entre la entrada y salida.

En la implementación numérica se utiliza una versión regularizada del filtro de Wiener, siguiendo la regularización de Tikhonov. Esta modificación se aplica cuando la matriz $\mathbf{R}$ presenta mal condicionamiento numérico, lo que puede generar coeficientes del filtro muy grandes y afectar la

estabilidad de la identificación (Dogariu et al., 2021). Para evitar esto, se suma un término pequeño a la diagonal de la matriz de autocorrelación, obteniéndose:

$$\mathbf{w} = (\mathbf{R} + \lambda_{\text{reg}} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}, \quad (25)$$

De esta forma, al resolver la ecuación lineal es posible determinar los parámetros del filtro óptimo que minimiza el error cuadrático medio entre la salida estimada y la salida medida.

4.7 Métodos iterativos (THI y ATHI) para múltiples subestructuras experimentales

En las secciones anteriores se introdujeron los métodos THI y ATHI para una sola SE. En aplicaciones con múltiples dispositivos, por ejemplo, varios amortiguadores viscosos ubicados en distintos pisos, la interacción debe satisfacer simultáneamente la condición de coordinación en cada grado de libertad de interfaz asociado a una subestructura experimental. En este contexto, el acoplamiento mutuo entre subestructuras incrementa la complejidad del problema y puede aumentar el número de iteraciones requeridas para converger (Guo & Pan, 2025).

4.7.1 Señales de interfaz y convención de notación

La notación introducida en la sección 4.4 para una única SE se extiende a continuación al caso general con n_{SE} interfaces. En esta sección se toma el desplazamiento como variable de interfaz de referencia, aunque la formulación es igualmente aplicable cuando se utilizan otras variables cinemáticas como velocidad, aceleración o drift.

En la iteración real p y para cada interfaz experimental $j = 1, \dots, n_{SE}$, con n_{SE} el número de subestructuras experimentales, se definen las siguientes señales escalares:

- $\mathbf{u}_{E,j}^{(p)}$: desplazamiento de interfaz impuesto a la SE j durante la iteración p .
- $\mathbf{F}_{E,j}^{(p)}$: fuerza de interfaz (reacción) medida en la SE j durante la iteración p .
- $\mathbf{u}_{N,j}^{(p)}$: desplazamiento de interfaz calculado por la subestructura numérica (SN) en el grado de libertad asociado a la SE j , ante el sismo y las fuerzas de interfaz medidas en la iteración p .

Para lograr la coordinación en la frontera se requiere que, para cada interfaz asociada a cada SE j , las historias de desplazamientos de la SE y SN coincidan dentro de un margen de error admisible:

$$\mathbf{u}_{E,j}^{(p)} \approx \mathbf{u}_{N,j}^{(p)}, \quad j = 1, \dots, n_{SE}, \quad (26)$$

4.7.2 THI para múltiples subestructuras experimentales

Recordando el método THI, antes de ejecutar la primera iteración real $p = 1$, se calcula una respuesta de referencia de la SN considerando únicamente la excitación sísmica y despreciando el efecto de todas las SE, es decir, imponiendo $\mathbf{F}_{E,j}^{(0)} = \mathbf{0}$. Las historias de desplazamiento de referencia en los GDL de frontera asociados a cada SE se denotan $\mathbf{u}_{N,j}^{(0)}$, donde el superíndice (0) señala que es la respuesta base del sistema sin aporte de subestructuras experimentales (Guo & Pan, 2025). En consecuencia, las historias iniciales a imponer en la primera iteración real se definen, para cada interfaz como:

$$\mathbf{u}_{E,j}^{(1)} = \mathbf{u}_{N,j}^{(0)}, \quad j = 1, \dots, n_{SE}. \quad (27)$$

La estructura de una iteración real p para el caso de múltiples SE tiene la siguiente forma:

1. **Ensayo secuencial de las SE y medición de fuerzas**

Se impone la historia $\mathbf{u}_{E,j}^{(p)}$ a la SE j y se mide $\mathbf{F}_{E,j}^{(p)}$. Este procedimiento puede realizarse secuencialmente (una SE a la vez), dado que el enfoque es offline y trabaja con historias completas, a diferencia de la simulación híbrida online.

2. **Cálculo de la SN con el conjunto completo de fuerzas de interfaz**

Una vez obtenidas todas las historias $\mathbf{F}_{E,j}^{(p)}$, se integra numéricamente la SN bajo la excitación externa (sismo), incorporando dichas fuerzas como acciones de interfaz en los grados de libertad correspondientes. Como resultado se obtienen las historias de desplazamientos $\mathbf{u}_{N,j}^{(p)}$.

3. **Criterio de convergencia**

Para cada interfaz j , se define el error de compatibilidad como:

$$\mathbf{e}_j^{(p)} = \mathbf{u}_{N,j}^{(p)} - \mathbf{u}_{E,j}^{(p)}, \quad j = 1, \dots, n_{SE}. \quad (28)$$

Para lograr convergencia se adopta el mismo criterio usado en las secciones anteriores, el cual corresponde al error RMS normalizado para cada interfaz:

$$error_{RMS,j}^{(p)} = \frac{1}{|\mathbf{u}_{N,j,max}^{(p)}|} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (e_{j,i}^{(p)})^2} < \epsilon, \quad j = 1, \dots, n_{SE}, \quad (29)$$

donde $e_{j,i}^{(p)}$ es el i -ésimo elemento de $\mathbf{e}_j^{(p)}$ y $|\mathbf{u}_{N,j,max}^{(p)}|$ es el valor máximo absoluto de $\mathbf{u}_{N,j}^{(p)}$ en la iteración p . La convergencia global se alcanza cuando la condición se cumple simultáneamente para todas las interfaces $j = 1, \dots, n_{SE}$.

4. **Actualización de las historias impuestas para la iteración $p + 1$.**

En el caso de que la convergencia global no se satisfaga, la historia impuesta a cada interfaz se actualiza como:

$$\mathbf{u}_{E,j}^{(p+1)} = \lambda \mathbf{u}_{N,j}^{(p)} + (1 - \lambda) \mathbf{u}_{E,j}^{(p)}, \quad j = 1, \dots, n_{SE} \quad (30)$$

Este ciclo se repite hasta cumplir la convergencia o hasta alcanzar un máximo de iteraciones reales establecido previamente. En el caso de múltiples subestructuras experimentales, el número de iteraciones puede aumentar debido al acoplamiento entre interfaces.

4.7.3 ATHI para múltiples subestructuras experimentales

ATHI en múltiples subestructuras experimentales busca reducir el número de iteraciones reales incorporando identificación de un modelo e iteraciones virtuales que permiten construir historias iniciales más cercanas a la solución convergente previo a las iteraciones reales. El procedimiento se describe a continuación:

1. **Respuesta de referencia de la SN sin aporte de SE**

Para cada interfaz j , se define la respuesta base de la SN (caso sin SE) $\mathbf{u}_{N,j}^{(0)}$ como la historia de desplazamientos obtenida al resolver la SN ante la excitación externa (sismo) anulando las fuerzas de interfaz provenientes de las SE, es decir, con $\mathbf{F}_{E,j}^{(0)} = \mathbf{0}$. Esta respuesta base de la SN se utiliza para aislar el aporte asociado a la interacción con las SE y adicionalmente, constituye una forma de definir señales iniciales de carga en etapas posteriores del método (Guo & Pan, 2025).

2. Matriz de transferencia e identificación por fases

Para el caso de dos interfaces, la relación acoplada entre entradas $(\mathbf{u}_{E,1}, \mathbf{u}_{E,2})$ y salidas $(\mathbf{u}_{N,1}, \mathbf{u}_{N,2})$ se representa mediante una matriz de funciones de transferencia. Manteniendo la notación de desplazamientos, la relación equivalente se escribe como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{N,1} - \mathbf{u}_{N,1}^{(0)} \\ \mathbf{u}_{N,2} - \mathbf{u}_{N,2}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{E,1} \\ \mathbf{u}_{E,2} \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Cada elemento H_{kj} corresponde a una función de transferencia discreta. Guo et al. utilizan la forma de un modelo tipo ARX:

$$H_{kj}(z^{-1}) = z^{-d} \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_B} z^{-n_B}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_A} z^{-n_A}}, \quad (32)$$

donde a_i y b_i son parámetros a identificar, n_A y n_B son los órdenes del denominador y numerador respectivamente, y d es el retardo del sistema.

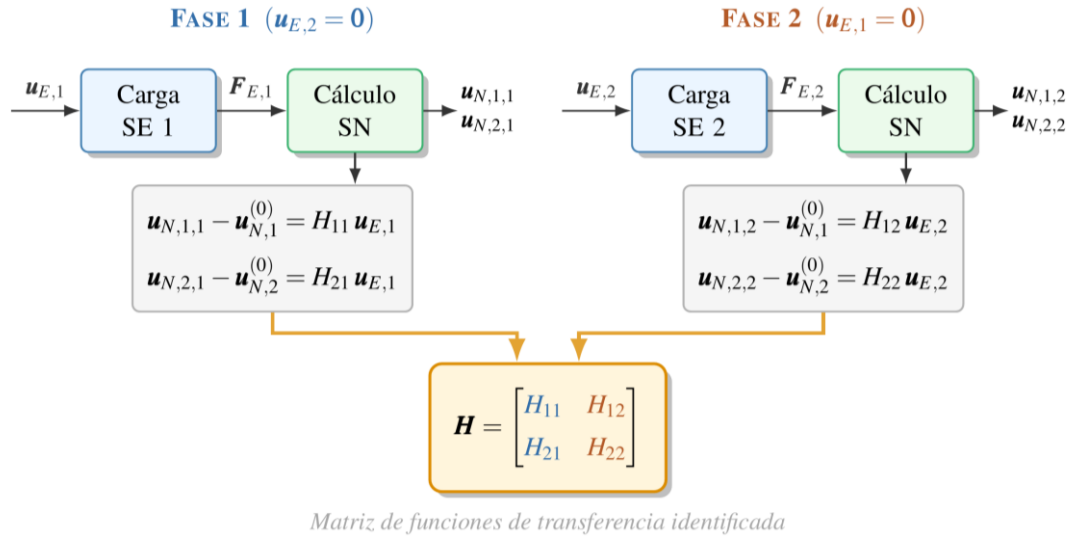


Figura 6. Identificación por fases de la matriz H

Para identificar la matriz $\mathbf{H}$, Guo & Pan (2025) emplean un proceso por fases como muestra la Figura 6, cuyo objetivo es aislar la influencia de una sola SE por vez sobre la respuesta de la SN. En el caso de dos interfaces, esto se logra considerando dos fases:

Fase 1: se impone $\mathbf{u}_{E,1} \neq \mathbf{0}$ y se fija $\mathbf{u}_{E,2} = \mathbf{0}$. Se obtienen las salidas $\mathbf{u}_{N,1,1}$ y $\mathbf{u}_{N,2,1}$.

Fase 2: se impone $\mathbf{u}_{E,2} \neq \mathbf{0}$ y se fija $\mathbf{u}_{E,1} = \mathbf{0}$. Se obtienen las salidas $\mathbf{u}_{N,1,2}$ y $\mathbf{u}_{N,2,2}$.

En esta notación, $\mathbf{u}_{N,k,j}$ denota la historia de desplazamientos en la interfaz k cuando la excitación se aplica únicamente en la interfaz asociada a la SE j durante la etapa de identificación.

Al fijar $\mathbf{u}_{E,2} = \mathbf{0}$ en (31), la Fase 1 se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{N,1,1} - \mathbf{u}_{N,1}^{(0)} \\ \mathbf{u}_{N,2,1} - \mathbf{u}_{N,2}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{E,1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

y, al fijar $\mathbf{u}_{E,1} = \mathbf{0}$ en (31), la Fase 2 se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{N,1,2} - \mathbf{u}_{N,1}^{(0)} \\ \mathbf{u}_{N,2,2} - \mathbf{u}_{N,2}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{u}_{E,2} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Luego, a partir de (33) y (34), las relaciones para la identificación se expresan como:

$$\mathbf{u}_{N,1,1} - \mathbf{u}_{N,1}^{(0)} = H_{11} \mathbf{u}_{E,1}, \quad \mathbf{u}_{N,2,1} - \mathbf{u}_{N,2}^{(0)} = H_{21} \mathbf{u}_{E,1} \quad (35a)$$

$$\mathbf{u}_{N,1,2} - \mathbf{u}_{N,1}^{(0)} = H_{12} \mathbf{u}_{E,2}, \quad \mathbf{u}_{N,2,2} - \mathbf{u}_{N,2}^{(0)} = H_{22} \mathbf{u}_{E,2} \quad (35b)$$

Con ello, el problema de identificación MIMO se transforma en un conjunto de cuatro identificaciones SISO utilizando pares entrada-salida del tipo $(\mathbf{u}_{E,1}, \mathbf{u}_{N,1,1} - \mathbf{u}_{N,1}^{(0)})$, etc.

3. Iteración virtual y transferencia a iteraciones reales

Una vez identificada $\mathbf{H}$, la iteración virtual reemplaza la carga física de las SE y el cálculo completo de la SN por la evaluación del modelo identificado. Para el caso de dos interfaces, la iteración virtual q se escribe como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{vN,1}^{(q)} \\ \mathbf{u}_{vN,2}^{(q)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{vE,1}^{(q)} \\ \mathbf{u}_{vE,2}^{(q)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{N,1}^{(0)} \\ \mathbf{u}_{N,2}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (36)$$

donde $\mathbf{u}_{vE,j}^{(q)}$ y $\mathbf{u}_{vN,j}^{(q)}$ son, respectivamente, las historias virtuales de entrada y salida asociadas a la interfaz j en la iteración virtual q . El objetivo virtual es análogo al real, buscando para cada interfaz

$$\mathbf{u}_{vE,j}^{(q)} \approx \mathbf{u}_{vN,j}^{(q)}, \quad j = 1, 2. \quad (37)$$

En caso de lograr la convergencia, el bucle de iteración virtual finaliza, de lo contrario, las historias virtuales se actualizan con la misma regla de actualización THI, es decir:

$$\mathbf{u}_{vE,j}^{(q+1)} = \lambda_j \mathbf{u}_{vN,j}^{(q)} + (1 - \lambda_j) \mathbf{u}_{vE,j}^{(q)}, \quad j = 1, 2. \quad (38)$$

Una vez alcanzada la convergencia virtual, las historias resultantes se adoptan como condición inicial para la siguiente iteración real. En el caso con múltiples SE, la señal virtual convergida se utiliza como entrada de la primera iteración real, es decir

$$\mathbf{u}_{E,j}^{(1)} = \mathbf{u}_{vE,j}^{(q^*)} \quad j = 1, 2. \quad (39)$$

Siendo $\mathbf{u}_{vE,j}^{(q^*)}$ la señal de la última iteración virtual, es decir, la señal virtual convergida. Debido a no linealidades, simplificaciones del modelo y ruido de medición, la matriz de transferencia identificada no reproduce perfectamente el sistema real. No obstante, esta aproximación permite obtener historias iniciales más cercanas a la solución convergida, de modo que las iteraciones reales posteriores requieren de un menor número para alcanzar la compatibilidad en la frontera.

5 Metodología

Esta memoria se plantea como un estudio exploratorio del desempeño de los métodos THI y ATHI aplicados a simulaciones híbridas offline de estructuras con amortiguadores viscosos. A diferencia de un ensayo híbrido en laboratorio, en este trabajo tanto la subestructura numérica como la subestructura experimental se representan mediante modelos computacionales y todas las iteraciones del algoritmo se ejecutan en el computador, sin ensayos físicos.

La metodología se desarrolla primero sobre un sistema de un grado de libertad (1 GDL) representativo de un piso de edificio con amortiguador viscoso, posteriormente se extiende a un sistema de múltiples grados de libertad que modela un edificio de varios pisos, manteniendo la misma lógica de subestructuración y de aplicación de los algoritmos THI y ATHI, pero utilizando distintos esquemas de identificación de la planta virtual.

5.1 Estructuras de referencia

En esta memoria se consideran dos modelos estructurales de referencia:

1. Un sistema de un grado de libertad (1 GDL) obtenido de la documentación de OpenSees, utilizado como caso base para el desarrollo y prueba de los algoritmos.
2. Un edificio de diez grados de libertad (10 GDL), que representa un marco de acero de varios pisos desarrollado por Fu et al. (1998).

5.1.1 Sistema de un grado de libertad (Caso 1)

Como caso base se utiliza el sistema de un grado de libertad (1 GDL) definido en el ejemplo “Dynamic Analysis of 1-Story Moment Frame with Viscous Dampers” de la documentación de OpenSees. En dicho ejemplo, el marco de un piso se idealiza mediante una masa concentrada m , una rigidez equivalente k y un amortiguamiento inherente c_0 , a lo que se añade un amortiguador viscoso lineal con coeficiente c_d .

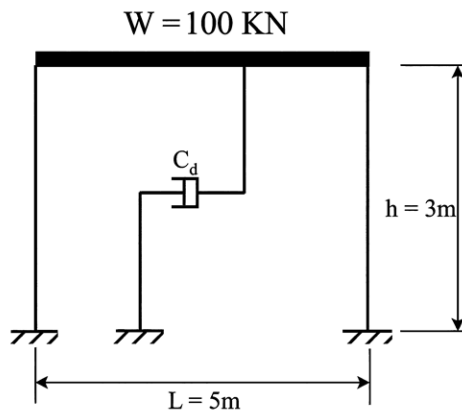


Figura 7. Estructura de referencia 1 GDL

Se adopta directamente este sistema de 1 GDL, con un peso total de $W = 100$ [kN] (masa equivalente $m = W/g$ [kg]), un periodo fundamental de $T = 0.7$ [s] y una razón de amortiguamiento inherente $\zeta = 2\%$. A partir de estos valores se calculan la rigidez lateral y el amortiguamiento viscoso como:

$$k = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2, \quad c_0 = 2\zeta m \omega_n = 2\zeta m \left(\frac{2\pi}{T} \right) \quad (40)$$

mientras que el coeficiente del amortiguador suplementario $c_d = 23\,790 \text{ [N s/m]}$ se calcula de manera que la razón de amortiguamiento total del sistema (aporte de c_0 más el dispositivo suplementario) sea de un 15%. En el caso de 1 GDL, la razón de amortiguamiento se define como:

$$\zeta_{\text{total}} = \frac{c_0 + c_d}{2 m \omega_n} \quad (41)$$

Imponiendo $\zeta_{\text{total}} = 0.15$, de (41) se obtiene:

$$c_d = 2\zeta_{\text{total}}m\omega_n - c_0 \quad (42)$$

con lo cual resulta $c_d = 23\,790 \text{ [N s/m]}$.

En este caso, el único amortiguador viscoso del sistema se modela como subestructura experimental, por lo que la SN queda sin amortiguamiento suplementario numérico.

Para adecuar las fuerzas y desplazamientos del modelo a las capacidades del actuador servo-hidráulico, los parámetros estructurales como masa (m), rigidez (k) y coeficiente de amortiguamiento suplementario (c_d) se escalan dividiendo por un factor de 10.

5.1.2 Sistema de múltiples grados de libertad (Caso 2)

Como segundo caso de estudio se utiliza un edificio de 10 pisos, modelado como un sistema de corte con un grado de libertad lateral por nivel. La Figura 8 muestra el esquema de este modelo de 10 GDL.

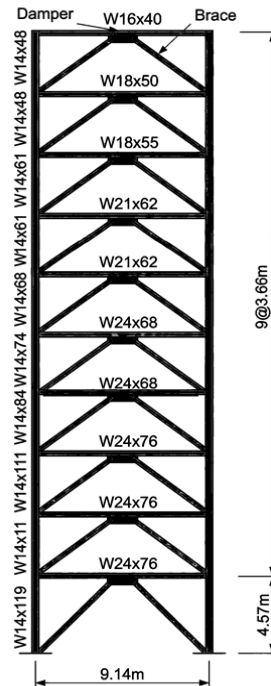


Figura 8. Sistema de referencia 10 GDL (Basado en Fu et al., 1998)

El modelo se basa en el marco de acero propuesto por Fu et al. (1998), donde cada piso se representa mediante una masa concentrada y una rigidez lateral equivalente. Los valores de masa y rigidez adoptados para cada piso se resumen en la Tabla 1. En las simulaciones se considera una razón de amortiguamiento modal del orden de $\zeta = 2\%$.

Tabla 1. Parámetros diseño estructura

Piso	Masa [kg]	Rigidez [kN/m]
1	38600	14601
2	36800	13325
3	36800	12911
4	36800	11277
5	35900	10191
6	35900	8963
7	35900	7757
8	35400	6804
9	35400	5343
10	29100	4247

El edificio se modela además con amortiguadores viscosos lineales distribuidos en la altura, ubicados en cada uno de los entresijos que conforman la estructura, cada uno con una constante de amortiguamiento $c_d = 300$ [kNs/m].

Tabla 2. Propiedades sistema con amortiguadores viscosos.

Modo	Periodo [s]	Frecuencia Natural [rad/s]	Razón de Amortiguamiento [%]
1	2.35	2.68	5.95
2	0.90	7.01	15.75
3	0.55	11.38	25.15
4	0.40	15.68	33.23
5	0.31	19.98	40.34
6	0.29	21.53	60.55
7	0.26	24.15	46.56
8	0.24	26.62	46.37
9	0.21	30.26	46.17
10	0.18	34.91	43.90

Los parámetros estructurales como masa (m), rigidez (k) y coeficientes de amortiguamiento suplementario (c_d) se dividen por un factor de 15 para adecuar las magnitudes a las capacidades del actuador servo-hidráulico.

Para este caso de estudio se consideran dos configuraciones de subestructuración:

- **Configuración A ($n_{SE} = 1$):** un único amortiguador, ubicado en el piso 10, se modela como SE, mientras que los nueve restantes permanecen en la SN.
- **Configuración B ($n_{SE} = 2$):** los amortiguadores de dos pisos contiguos, 9 y 10, se modelan como SE, mientras que los ocho amortiguadores restantes permanecen en la SN.

5.2 Subestructuración y formulación en espacio de estados

El sistema se particiona en una SN y un conjunto de SE, asociadas a n_{SE} amortiguadores viscosos, cuyo efecto se incorpora a la dinámica global a través de fuerzas en las interfaces. Sea f_j el índice del piso superior del entrepiso donde se ubica la SE j con $j = 1, \dots, n_{SE}$. Se define $u_r(t)$ como el desplazamiento del piso r relativo a la base, y $\dot{u}_r(t)$ como la velocidad con $r = 1, \dots, n$ pisos.

La variable de interfaz entre la SN y SE depende del caso de estudio. Para el caso de 1 GDL es el desplazamiento del nodo de conexión, donde ya se definieron $\mathbf{u}_N^{(p)}$ y $\mathbf{u}_E^{(p)}$. Para el caso de 10 GDL, la variable de interfaz adoptada es el drift entre pisos en el punto de conexión de cada amortiguador, dado que esta es la variable cinemática relevante para un dispositivo instalado entre pisos consecutivos. Se definen las siguientes señales de interfaz:

- $\Delta_{N,j}^{(p)}$: historia de tiempo del drift en la interfaz de la SE j calculados en la SN como la diferencia de desplazamientos entre los pisos f_j y $f_j - 1$.
- $\Delta v_{N,j}^{(p)}$: historia de tiempo de la velocidad relativa de interfaz de la SE j .
- $\Delta_{E,j}^{(p)}$: historia de tiempo del drift comandado al actuador de la SE j .

5.2.1 Modelo estructural de referencia (no particionado)

Se adopta un modelo de n grados de libertad excitado por una aceleración basal $\ddot{u}_g(t)$. La ecuación de movimiento del sistema completo se expresa como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{ref}(t) + \mathbf{C}_{tot}\dot{\mathbf{u}}_{ref}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}_{ref}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{J}\ddot{u}_g(t), \quad (43)$$

donde $\mathbf{u}_{ref}(t)$ es el vector de desplazamientos relativos a la base del sistema completo, $\mathbf{M}$ y $\mathbf{K}$ son las matrices de masa y rigidez respectivamente, y $\mathbf{J} = \mathbf{1}$ es el vector de influencia sísmica.

El amortiguamiento total del modelo de referencia se descompone como:

$$\mathbf{C}_{tot} = \mathbf{C}_0 + \mathbf{C}_s, \quad (44)$$

donde $\mathbf{C}_0$ corresponde al amortiguamiento inherente del edificio (definido mediante amortiguamiento modal) y $\mathbf{C}_s$ representa la matriz de amortiguamiento suplementario asociada al conjunto de amortiguadores viscosos.

La representación en espacio de estados del sistema estructural de referencia se define mediante el vector de estado:

$$\mathbf{x}_{ref}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{ref}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}_{ref}(t) \end{bmatrix}_{2n \times 1}. \quad (45)$$

Considerando como única entrada la excitación sísmica $\ddot{u}_g(t)$, el sistema puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{ref}(t) &= \mathbf{A}_{ref}\mathbf{x}_{ref}(t) + \mathbf{B}_{ref}\ddot{u}_g(t) \\ \mathbf{y}_{ref}(t) &= \mathbf{C}_{ref}\mathbf{x}_{ref}(t) + \mathbf{D}_{ref}\ddot{u}_g(t), \end{aligned} \quad (46)$$

con:

$$\mathbf{A}_{ref} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_{tot} \end{bmatrix}_{2n \times 2n}, \quad \mathbf{B}_{ref} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 1} \\ -\mathbf{J}_{n \times 1} \end{bmatrix}_{2n \times 1}, \quad (47)$$

Por otro lado, las matrices que controlan la salida del sistema se definen como:

$$\mathbf{C}_{ref} = [\mathbf{I}]_{2n \times 2n}, \quad \mathbf{D}_{ref} = [\mathbf{0}]_{2n \times 1} \quad (48)$$

La solución de este sistema proporciona la respuesta de referencia del edificio completo, utilizada exclusivamente para validar los resultados de la simulación híbrida offline.

5.2.2 Modelo estructural particionado SN-SE

Al particionar el sistema, los amortiguadores modelados como SE deben eliminarse de las matrices del modelo numérico para evitar una doble contabilización de su efecto. Por ello, el amortiguamiento suplementario total $\mathbf{C}_s$ se divide en una componente numérica $\mathbf{C}_s^N$, ensamblada excluyendo los dispositivos tratados como SE. De este modo el amortiguamiento incorporado en la SN queda definido como:

$$\mathbf{C}^N = \mathbf{C}_0 + \mathbf{C}_s^N \quad (49)$$

Las fuerzas de interfaz medidas en las SE se incorporan a la SN como fuerzas nodales equivalentes mediante una matriz de localización $\mathbf{H}_{loc} \in \mathbb{R}^{n \times n_{SE}}$. Para el dispositivo j ubicado entre los pisos $f_j, f_j - 1$, la j -ésima columna de $\mathbf{H}_{loc}$ se define como:

$$[\mathbf{H}_{loc}]_{r,j} = \begin{cases} +1, & \text{si } r = f_j, \\ -1, & \text{si } r = f_j - 1 \text{ y } (f_j > 1), \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (50)$$

Esta estructura refleja que la fuerza del dispositivo actúa como un par acción-reacción entre pisos consecutivos. Con ello, el vector de fuerzas nodales equivalente asociado a las SE se incorpora mediante el término $-\mathbf{H}_{loc}\mathbf{F}_E(t)$.

Con las definiciones anteriores, la ecuación de movimiento de la SN incorporando el aporte de las SE se escribe como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}^N\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g(t) - \mathbf{H}_{loc}\mathbf{F}_E(t), \quad (51)$$

Donde $\mathbf{u}(t)$ es el vector de desplazamientos relativos a la base de los n pisos de la SN. La representación en espacio de estados del sistema estructural particionado se define mediante el vector de estado:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \end{bmatrix}_{2n \times 1}. \quad (52)$$

Se define el vector de entradas:

$$\mathbf{p}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_g(t) \\ \mathbf{F}_E(t) \end{bmatrix}_{(1+n_{SE}) \times 1}. \quad (53)$$

La representación en espacio de estados queda:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{p}(t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{p}(t), \end{aligned} \quad (54)$$

con:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}^N \end{bmatrix}_{2n \times 2n}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 1} & \mathbf{0}_{n \times n_{SE}} \\ -\mathbf{J}_{n \times 1} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{H}_{loc} \end{bmatrix}_{2n \times (1+n_{SE})}, \quad (55)$$

Por otro lado, las variables que controlan la salida del sistema se definen como:

$$\mathbf{C} = [\mathbf{I}]_{2n \times 2n}, \quad \mathbf{D} = [\mathbf{0}]_{2n \times (1+n_{SE})} \quad (56)$$

5.3 Implementación Computacional

La implementación se realiza en MATLAB y Simulink. El bucle iterativo THI/ATHI y la identificación de la planta virtual se implementan en MATLAB, mientras que la integración numérica de los sistemas estructurales y la dinámica del actuador se resuelven dentro de modelos Simulink con un paso fijo de $\Delta t = 1/1000[s]$. El modelo de la SE se integra con un esquema Dormand-Prince (ode8), mientras que la SN utiliza un esquema Runge-Kutta (ode4).

5.3.1 Actuador Servo-hidráulico

El actuador servo-hidráulico se representa mediante el modelo paramétrico propuesto en el benchmark de Silva et al. (2020). Este modelo recibe como entrada la señal de interfaz $\mathbf{u}_E^{(p)}$ en 1 GDL o $\Delta_{E,j}^{(p)}$ en 10

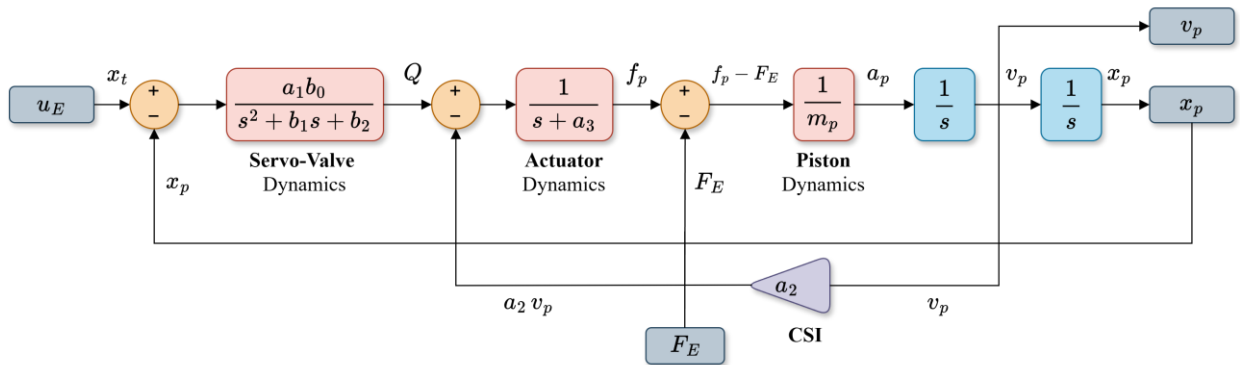


Figura 9. Esquema Simulink Actuador Servo-Hidráulico.

GDL, y produce como salida el desplazamiento efectivo del pistón $x_p^{(p)}$ y velocidad $v_p^{(p)}$. El modelo reproduce el comportamiento dinámico de un actuador real, incluyendo la dinámica de la servo-válvula, la dinámica hidráulica del actuador, la interacción control-estructura (CSI) y la inercia del pistón, como se ilustra en la Figura 9. Esquema Simulink Actuador Servo-Hidráulico.. Los parámetros adoptados se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros Actuador Servo-hidráulico

Parámetro	Caso 1 GDL	Caso 10 GDL	Unidad
$a_1 b_0$	20·2.13e13	18·2.13e13	[Pa*m/s]
a_2	7.5·4.23e6	3.5·4.23e6	[Pa*m]
a_3	3.3	3.3	[1/s]
b_1	425	425	[-]
b_2	1e5	1e5	[1/s]
m_p	3.5	3.5	[kg]

5.3.2 Subestructura Experimental

Cada subestructura experimental se representa numéricamente mediante un amortiguador viscoso lineal, acoplado al modelo del actuador de la sección 5.3.1. La cadena de procesamiento para cada SE ilustrada en la Figura 10, es:

1. La señal de interfaz $u_E^{(p)}$ se aplica como señal de comando al actuador servo-hidráulico, que produce el desplazamiento efectivo $x_p^{(p)}$ y la velocidad $v_p^{(p)}$.
2. La fuerza del amortiguador se calcula como $F_E^{(p)} = c_d \cdot v_p^{(p)}$, donde c_d es el coeficiente de amortiguamiento viscoso del dispositivo.
3. La fuerza $F_E^{(p)}$ se retroalimenta al modelo del actuador como carga sobre el pistón.

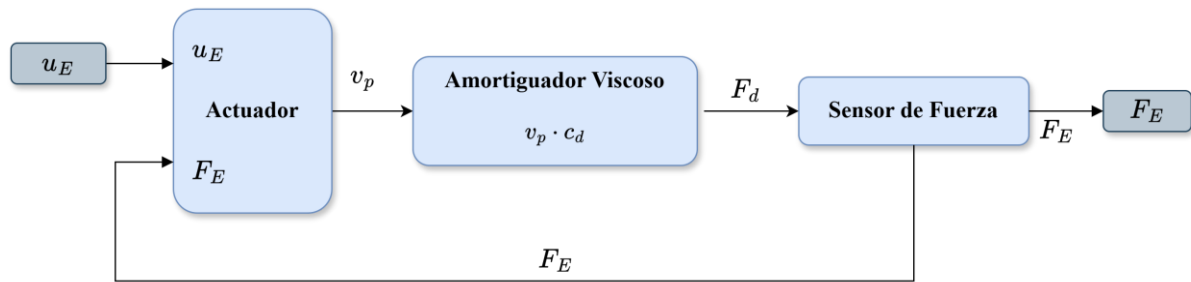


Figura 10. Esquema Simulink Subestructura Experimental

A la fuerza medida se le añade ruido blanco gaussiano para simular la incertidumbre de un sensor de fuerza real, con una potencia de ruido $RMS_F = 12[N]$ para el caso de 1 GDL y 2 [N] para el caso de 10 GDL.

5.3.3 Subestructura numérica

La subestructura numérica se implementa como un modelo Simulink que contiene un bloque de espacio de estados, con las matrices **A**, **B**, **C** y **D**. El bloque recibe como entradas la aceleración basal del sismo y las fuerzas de interfaz provenientes de la o las SE. La Figura 11 muestra el esquema Simulink de este modelo.

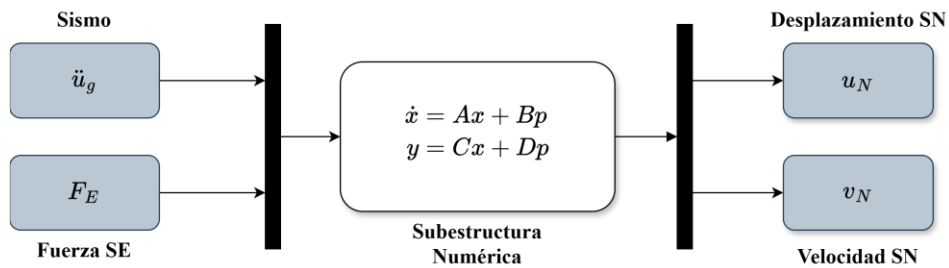


Figura 11. Esquema Simulink Subestructura Numérica

5.4 Registro sísmico

Las simulaciones se ejecutan utilizando dos registros sísmicos. Para el caso de 1 GDL se emplea el registro de Kobe (1995), mientras que para el caso de 10 GDL se utiliza el registro de El Centro (1940). La Figura 12 presenta ambos registros.

El registro se discretiza con el paso de integración $\Delta t = 1/1000[s]$, aplicando interpolación lineal cuando la frecuencia de muestreo del sismo utilizado difiere de la utilizada en la simulación.

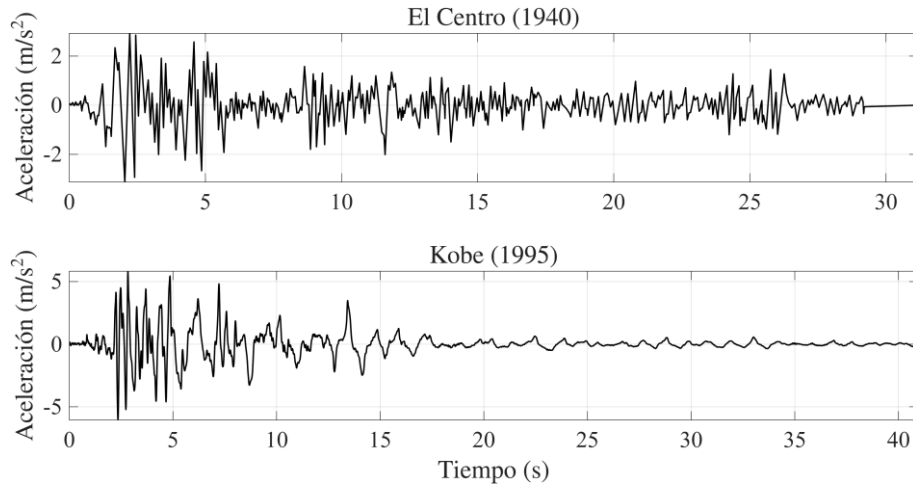


Figura 12. Registros de aceleración de los terremotos considerados

5.5 Parámetros de simulación / Casos de simulación y de estudio

El proceso iterativo THI/ATHI se controla mediante los parámetros resumidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de simulación THI/ATHI

Parámetro		1 GDL	10 GDL Config. A	10 GDL Config. B
Duración simulación	$t_{max}[s]$	45	45	45
Factor de actualización iter. Real	λ	0.20	0.35	0.18
Factor de actualización iter. Virtual	λ_v	0.20	0.35	0.20
Tolerancia RMS (Real)	ϵ [%]	1.5	1.5	1.5
Tolerancia RMS (Virtual)	ϵ_{virt} [%]	0.1	0.1	0.1

En el caso de ATHI se implementan dos esquemas de identificación, cuyos parámetros se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de identificación de la planta virtual

Parámetro	Valor	Descripción
n_A (ARX)	3	Coeficientes de $A(z^{-1})$
n_B (ARX)	3	Coeficientes de $B(z^{-1})$
d (ARX)	1	Muestras de retardo
L (Wiener)	8	Longitud del filtro FIR

Para el modelo ARX, los parámetros se identifican mediante mínimos cuadrados, sin aplicar la etapa de optimización TLPO. Dado que los casos estudiados son lineales, la estimación por LS resulta suficiente, como confirman los resultados del capítulo siguiente.

6 Resultados

6.1 Caso 1 GDL

El caso de 1 GDL sirve para verificar la implementación del algoritmo antes de extenderla al caso de 10 GDL, donde el acoplamiento entre interfaces aumenta la complejidad del problema.

6.1.1 Método THI

El método converge en 16 iteraciones reales, partiendo de un error RMS de 44.26 % y finalizando con 1.19 %, lo que representa una reducción del 97.31 % respecto del valor inicial. En la Figura 13 se observa que en la segunda iteración el error aumenta hasta 50.98 %, antes de retomar un descenso sostenido en las iteraciones siguientes. El alto error en la primera iteración se explica por la condición inicial del algoritmo, en la que se impone $\mathbf{u}_E^{(1)} = \mathbf{u}_N^{(0)}$. Bajo esta condición, la fuerza de interfaz $\mathbf{F}_E^{(1)}$ aún no representa adecuadamente la dinámica del sistema acoplado, por lo que, en lugar de atenuar el desplazamiento, amplifica la respuesta en ciertos instantes. En consecuencia, la SN responde con grandes oscilaciones, elevando el desplazamiento máximo a 412 [mm] en la primera iteración, casi cinco veces el desplazamiento máximo de referencia.

Las historias de desplazamiento de interfaz correspondientes a las iteraciones reales 1,4 y 16 evidencian

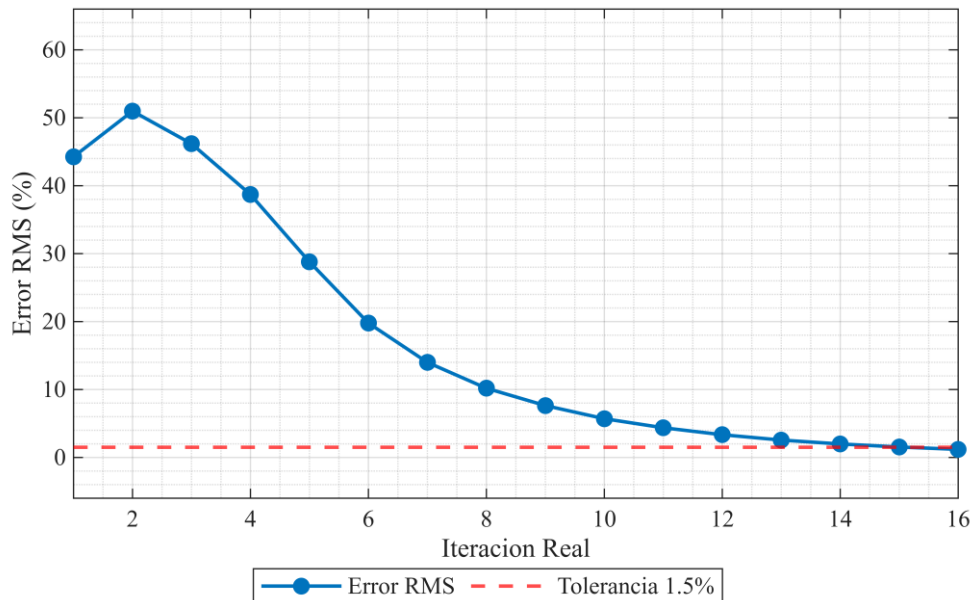


Figura 13. Convergencia iteraciones reales (THI)

una reducción progresiva de la discrepancia entre la respuesta numérica y la respuesta experimental, como se muestra en la Figura 14. En la primera iteración se observan diferencias importantes de amplitud y fase, como consecuencia de la amplificación descrita previamente. En la cuarta iteración, ambas señales presentan una mejor aproximación en la parte inicial del registro, aunque en los tramos finales aún persisten discrepancias apreciables. En la última iteración, las diferencias entre las señales dejan de ser apreciables a lo largo de todo el registro. El error en cada instante se propaga hacia los instantes siguientes durante la integración numérica, de modo que la parte inicial del registro converge primero y los tramos finales, que acumulan los errores de todos los pasos previos, requieren más iteraciones para alcanzar la compatibilidad.

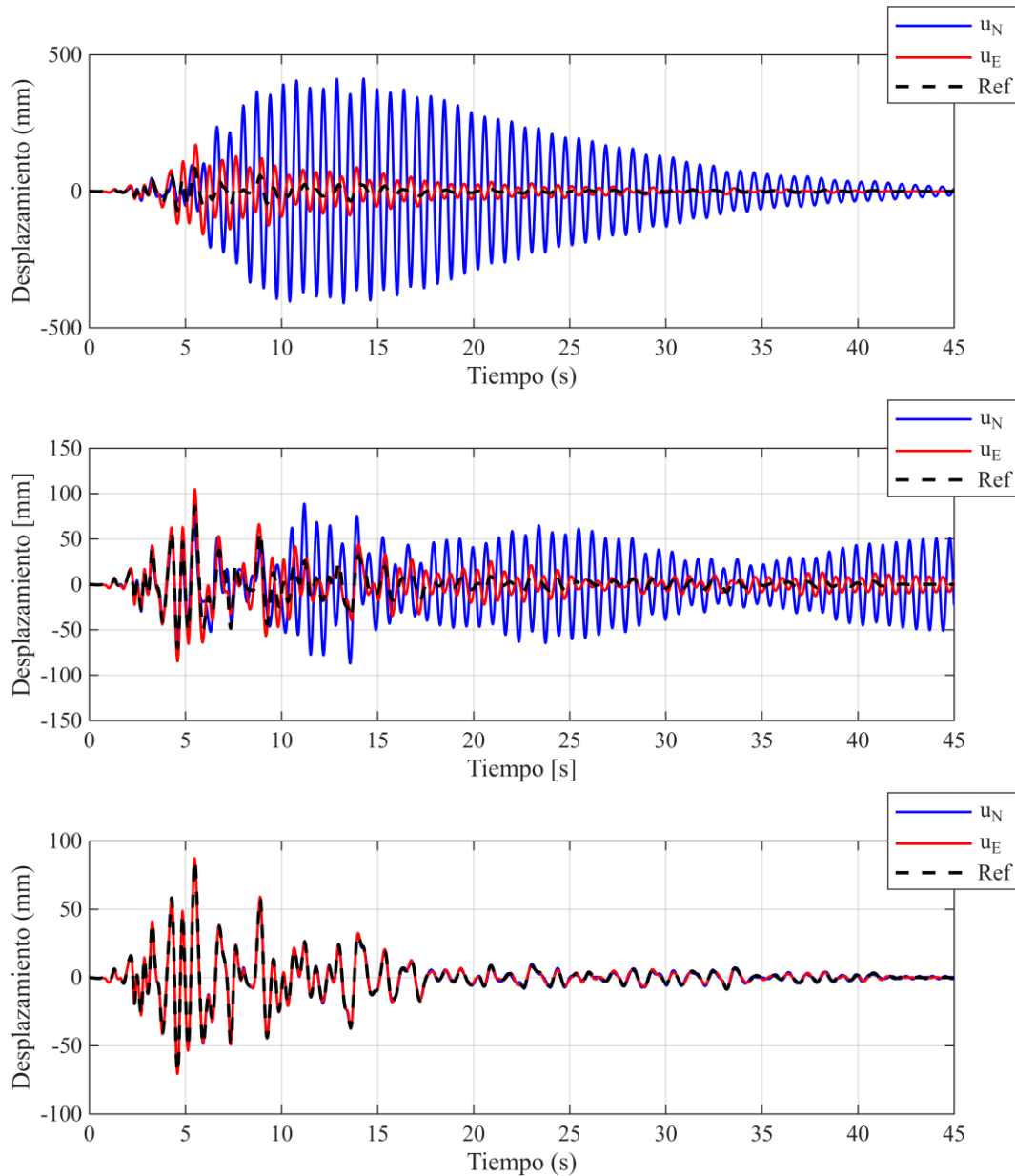


Figura 14. Respuestas de desplazamientos en iteraciones reales 1,4 y 16 (THI)

En la Tabla 6 se observa que los máximos absolutos obtenidos con THI son cercanos a los valores de referencia en las tres magnitudes evaluadas. El mayor error corresponde a la fuerza máxima de la SE, con 2.71 %, mientras que el desplazamiento y la velocidad presentan diferencias de 1.38 % y 1.49 %, respectivamente. Estos resultados muestran que el método THI entrega una estimación cercana de las respuestas máximas del sistema de referencia.

Tabla 6. Máximos absolutos de la respuesta con THI

Magnitud	Referencia	THI	Error [%]
$ u_N _{max}$ [m]	0.0860	0.0872	1.38
$ v_N _{max}$ [m/s]	0.749	0.7601	1.49
$ F_E _{max}$ [kN]	17.82	18.30	2.71

6.1.2 Método ATHI

En la Figura 15 se observa que el método ATHI converge en 2 iteraciones reales, partiendo de un error RMS de 44.26 % y finalizando con 0.325 %, lo que corresponde a una reducción del 99.27 % respecto al valor inicial. La curva muestra una caída abrupta del error entre la primera y segunda iteración real, lo que indica que el bucle virtual corrige gran parte de la incompatibilidad entre las señales de interfaz antes de ejecutar la segunda iteración real.

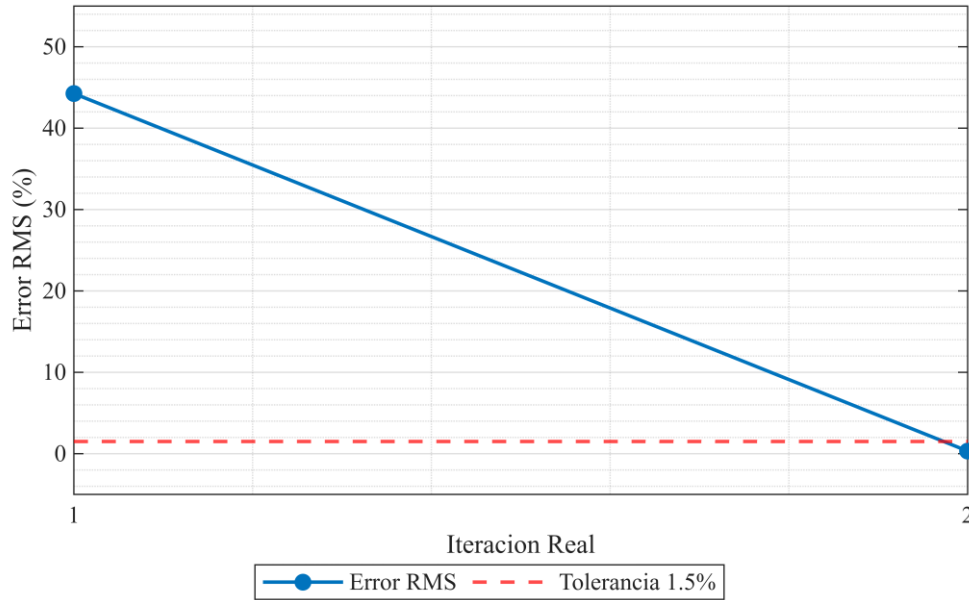


Figura 15. Convergencia iteraciones reales (ATHI)

En la Figura 16 se observa la curva de convergencia del bucle virtual del método ATHI, ejecutado tras la primera iteración real. El bucle virtual requirió 27 iteraciones para alcanzar la convergencia. La curva presenta el mismo patrón observado en las iteraciones reales del método THI, con un aumento en la segunda iteración del error RMS virtual hasta 51.1 %, seguido de un descenso hasta lograr la convergencia con un error 0.091 %. La similitud con la curva mostrada en la Figura 13 indica que el modelo ARX calculado mediante mínimos cuadrados representa adecuadamente la dinámica del sistema.

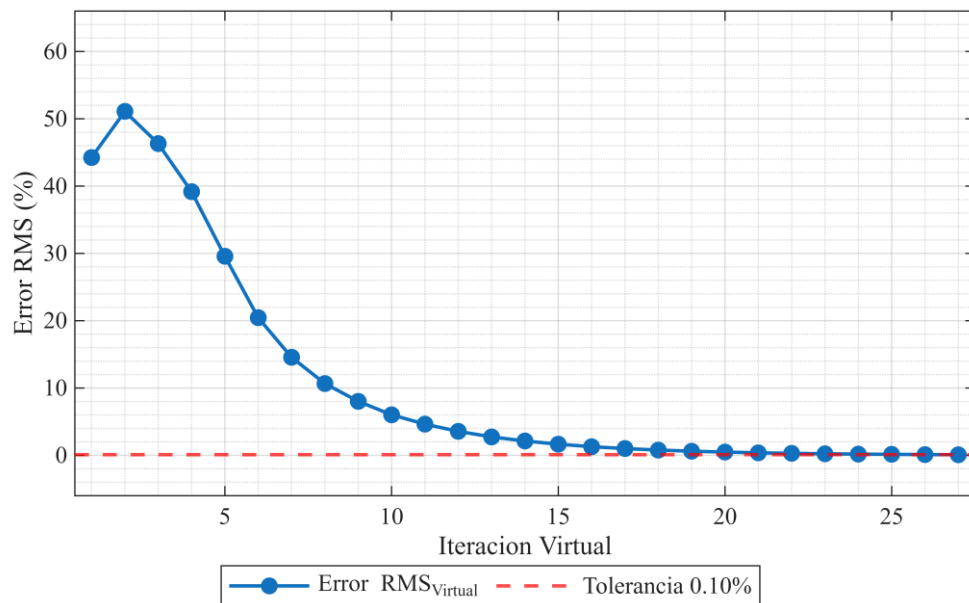


Figura 16. Convergencia iteraciones virtuales (ATHI)

La evolución de las historias de tiempo reales en la Figura 17 muestra el efecto de las iteraciones virtuales. En la primera iteración, la discrepancia entre las historias de desplazamiento es notable, dominada por las mismas amplificaciones descritas en el caso anterior, dado que la condición inicial es la misma. En la segunda iteración real, las señales no presentan diferencias visuales apreciables a lo largo de todo el registro. Esto muestra que el bucle virtual reduce la incompatibilidad en la interfaz antes de ejecutar la segunda iteración real.

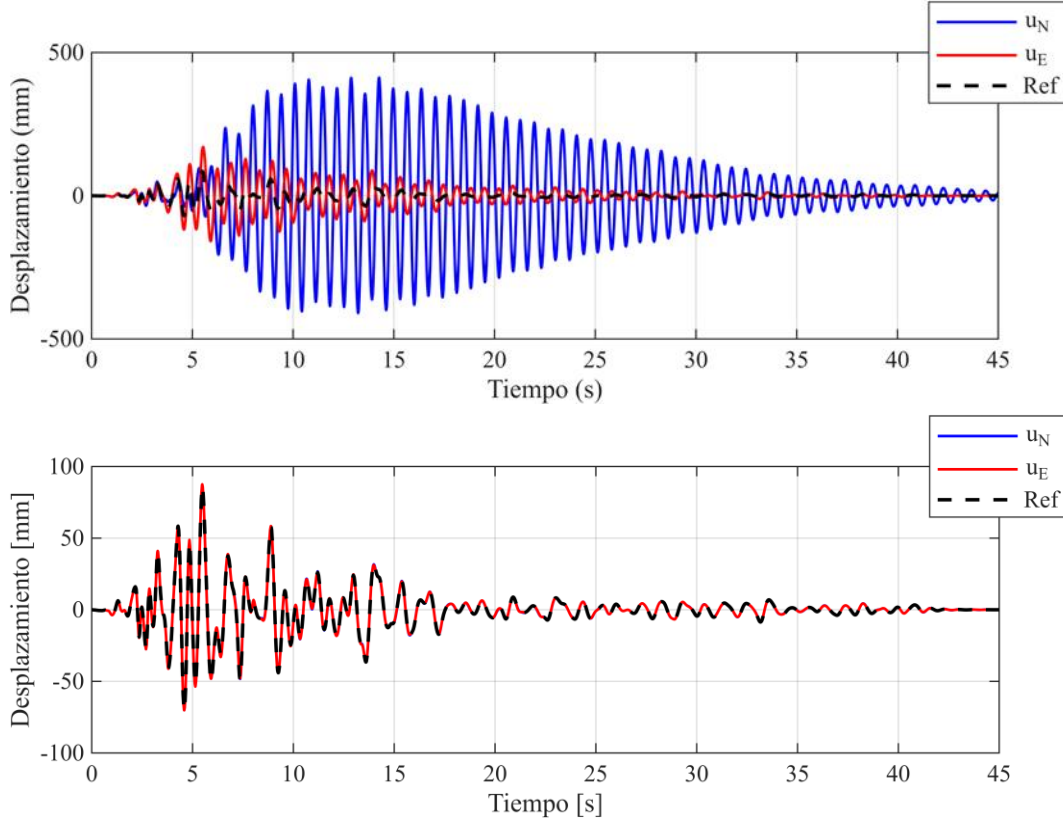
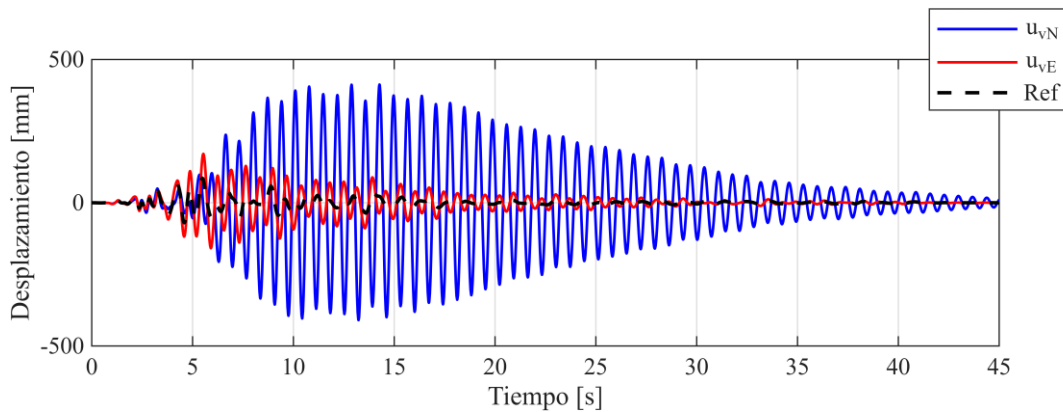


Figura 17. Respuesta de desplazamientos en iteraciones reales 1 y 2 (ATHI)

En la Figura 18 se observa que en la primera iteración las diferencias son altas y similares a las observadas al inicio del método THI, ya que el bucle virtual parte desde la misma señal $u_E^{(1)}$. En la quinta iteración, las señales se aproximan en la parte inicial del registro, pero el tramo intermedio y final aún presentan diferencias apreciables. En la iteración final, las señales son prácticamente idénticas en todo el registro.



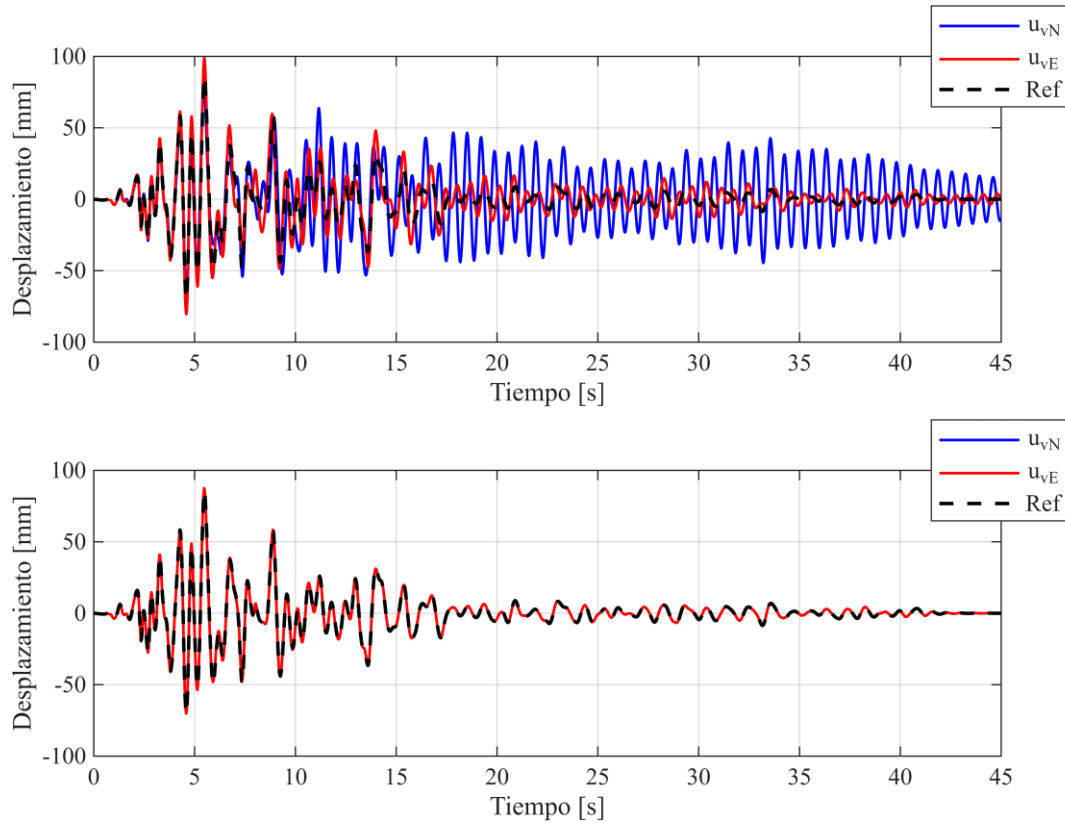


Figura 18. Respuesta de desplazamiento en iteraciones virtuales 1,5 y 27 (ATHI)

Los valores máximos absolutos obtenidos con THI y ATHI son cercanos a los del sistema de referencia como se observa en la Tabla 7. ATHI reduce el error en desplazamiento de 1.38 % a 1.05 % y en la fuerza de la SE de 2.71 % a 2.46 %, mientras que en velocidad ambos métodos presentan diferencias similares, con errores de 1.49 % en THI y 1.60 % en ATHI. Estos resultados indican que el método ATHI mantiene una estimación precisa de las respuestas máximas del sistema.

Tabla 7. Máximos absolutos de la respuesta con THI y ATHI

Magnitud	Referencia	THI	Error THI [%]	ATHI	Error ATHI [%]
$ u_N _{max}$ [m]	0.0860	0.0872	1.38	0.0869	1.05
$ v_N _{max}$ [m/s]	0.749	0.7601	1.49	0.7609	1.60
$ F_E _{max}$ [kN]	17.82	18.30	2.71	18.26	2.46

La Tabla 8 muestra que ATHI reduce significativamente el número de iteraciones reales, pasando de 16 a 2, además, disminuye los errores RMS en las tres señales analizadas respecto de THI. La mayor mejora se observa en la velocidad, mientras que en fuerza la reducción es más moderada. Esto indica que el uso de iteraciones virtuales acelera la convergencia sin pérdida apreciable de precisión en la respuesta global.

Tabla 8. Comparación de iteraciones y errores RMS entre THI y ATHI

Señal	THI [%]	ATHI [%]
Iteraciones reales (p)	16	2
Error RMS Desplazamiento	1.13	0.51
Error RMS Velocidad	1.24	0.58
Error RMS Fuerza	1.26	1.13

6.1.3 Método ATHI con Filtros de Wiener

La Figura 19 muestra la curva de convergencia de las iteraciones reales para el caso SDOF con identificación mediante filtro de Wiener regularizado. El error RMS desciende de 44.26 % a 18.74 % entre las iteraciones 1 y 2, pero luego permanece prácticamente constante hasta la iteración límite, sin alcanzar la tolerancia real de 1.5 %. Esto indica que la mayor corrección ocurre al inicio del proceso, a partir de la segunda iteración, el error queda estancado, dado que los bucles virtuales posteriores no producen una reducción apreciable del error real.

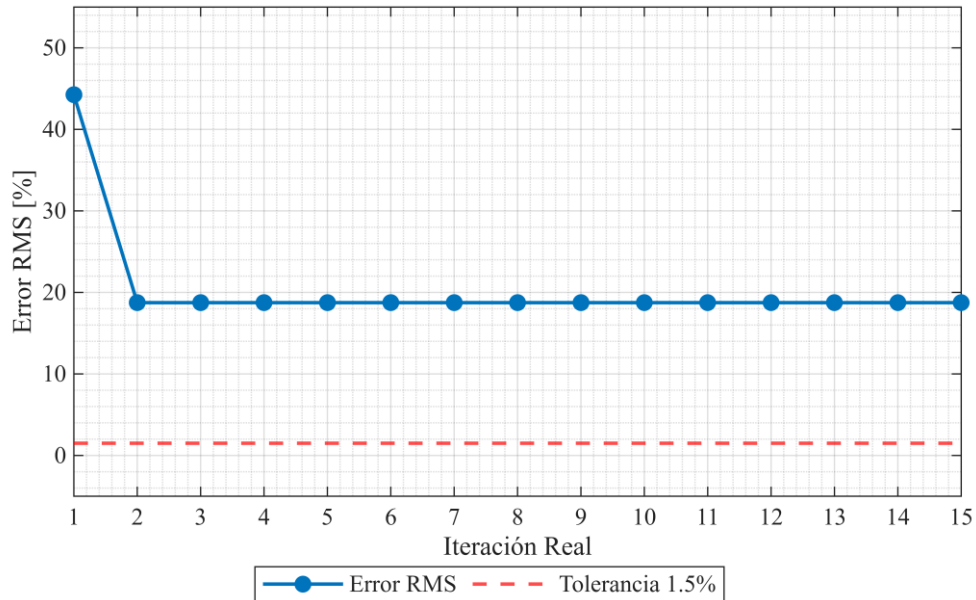


Figura 19. Convergencia iteraciones reales (ATHI-Wiener)

El primer bucle virtual del caso SDOF con identificación mediante filtro de Wiener requiere 5 iteraciones para satisfacer la tolerancia virtual, como se aprecia en la Figura 20. El error RMS virtual aumenta de 29.32 % a 44.26 % entre las iteraciones 1 y 2, y luego desciende hasta 0.013 % al final del ciclo. En los bucles virtuales posteriores, el error se mantiene prácticamente fijo en torno a ese mismo valor y cada nuevo ciclo queda reducido a una sola iteración. Esto indica que, para el modelo identificado, las señales virtuales ya parten prácticamente compatibles en los ciclos siguientes. Sin embargo, dicha compatibilidad no se traduce en una reducción adicional apreciable del error real.

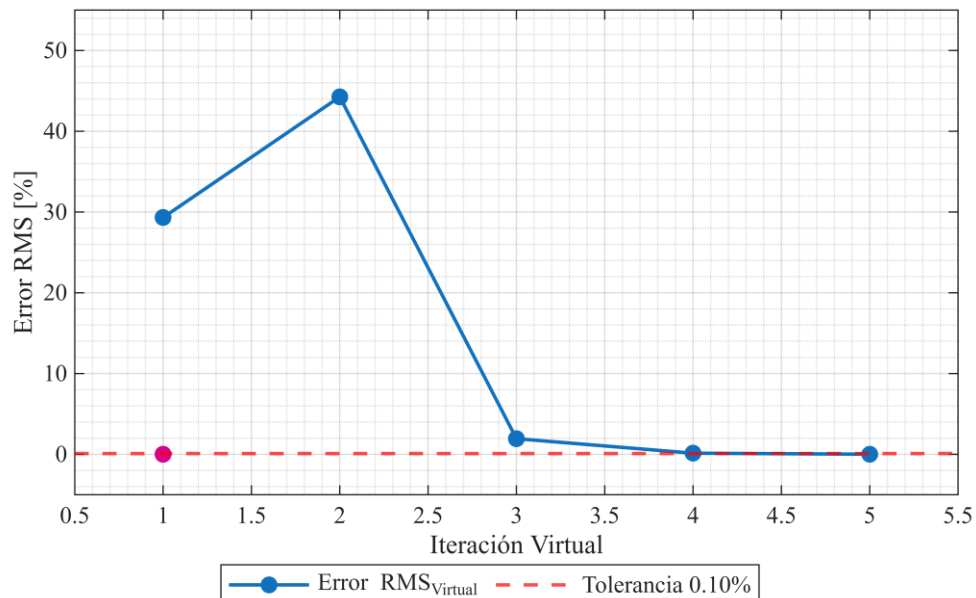


Figura 20. Convergencia iteraciones virtuales (ATHI-Wiener)

En las historias de tiempo reales de desplazamiento mostradas en la Figura 21, se observa que en la primera iteración, la respuesta de la SN presenta una amplificación importante respecto de la señal experimental y de la referencia. En la tercera iteración, esta amplificación disminuye, aunque las diferencias entre las señales de interfaz siguen siendo claramente visibles. En la última iteración no se aprecian cambios respecto de la tercera iteración, lo que confirma que la respuesta real queda estancada, manteniendo un error RMS de compatibilidad de 18.74 %.

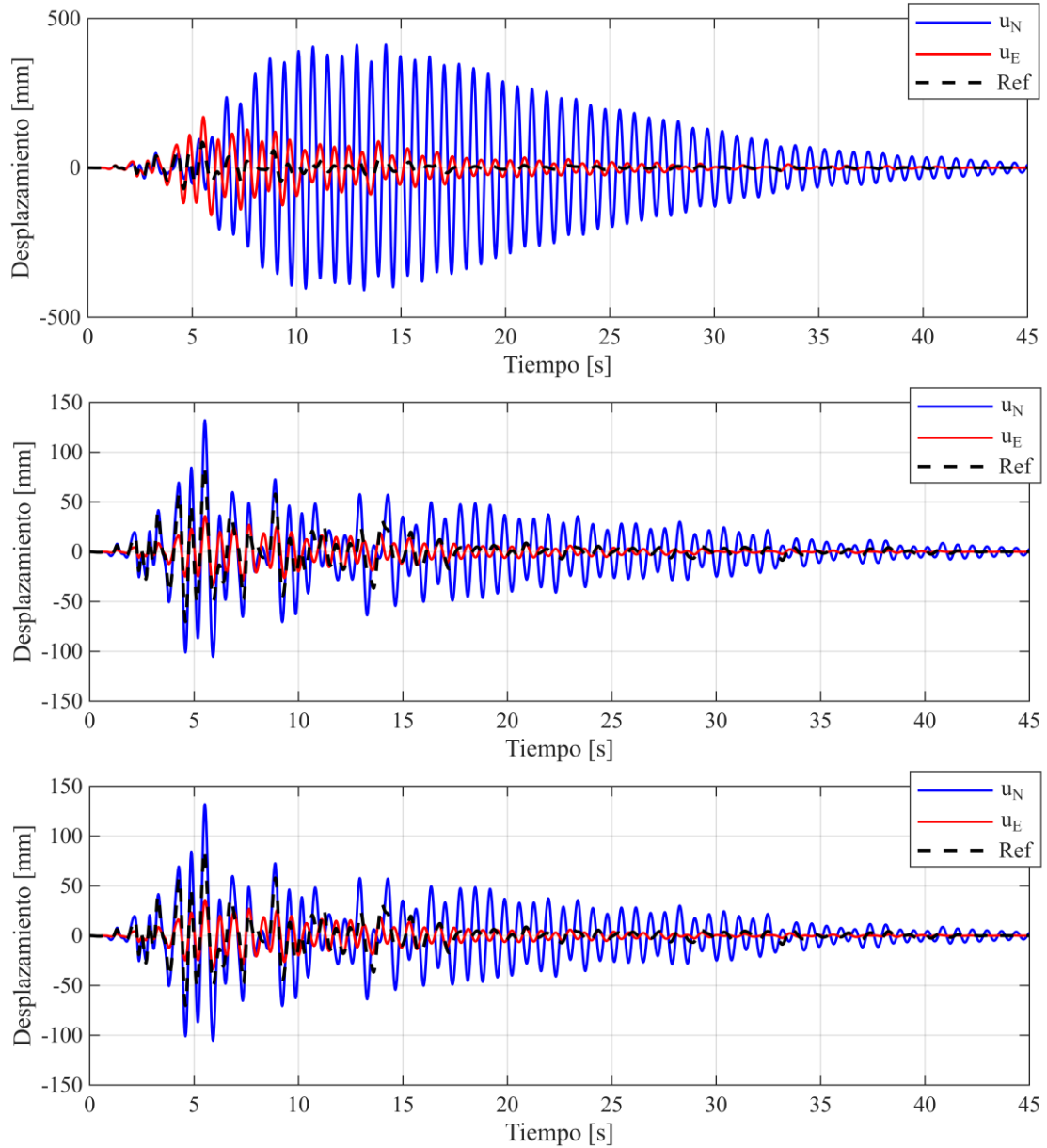


Figura 21. Respuesta de desplazamientos en iteraciones reales 1, 3 y 15 (ATHI-Wiener)

En el primer bucle virtual, las historias de tiempo de desplazamiento mostradas en la Figura 22, revelan una reducción de la discrepancia entre las señales virtuales. En la primera iteración, ambas señales presentan diferencias importantes y se mantienen alejadas de la referencia. En la segunda iteración, la discrepancia disminuye de forma apreciable, aunque la historia resultante difiere de la referencia. En la quinta iteración, las señales virtuales son visualmente indistinguibles, pero no reproducen adecuadamente la respuesta de referencia. Los bucles virtuales posteriores reproducen prácticamente la misma curva alcanzada en la quinta iteración del ciclo ejecutado tras la primera iteración real, por lo que no se genera una corrección adicional en las iteraciones reales siguientes. Esto sugiere que, para el modelo identificado, la discrepancia virtual queda resuelta desde ese punto, aunque esa solución no representa adecuadamente la relación real entre las señales de interfaz.

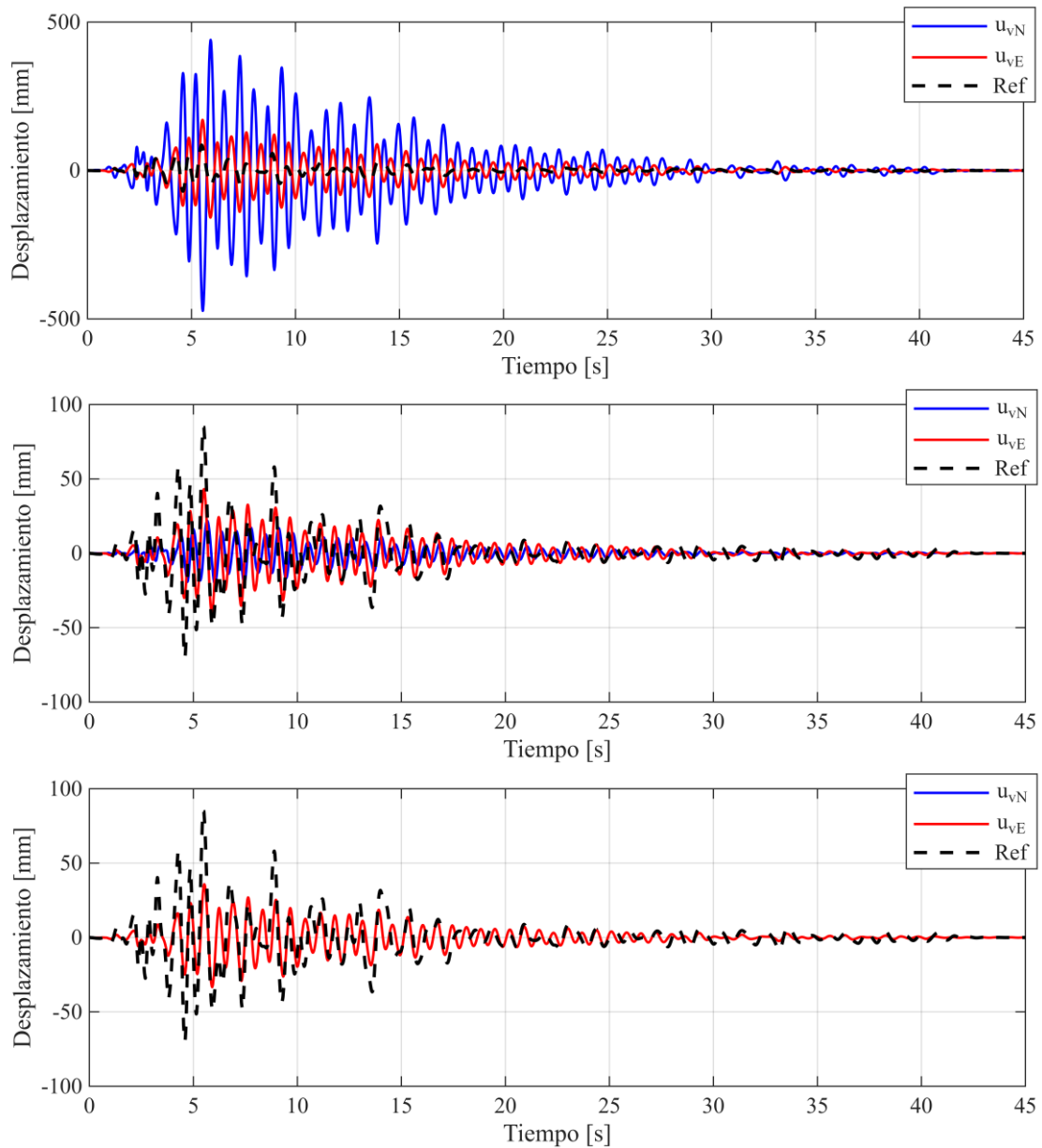


Figura 22. Respuesta de desplazamiento en iteraciones virtuales 1,2 y 5 (ATHI-Wiener)

Como se resume en la Tabla 9, el caso ATHI con identificación mediante filtros de Wiener no logra reproducir adecuadamente los máximos absolutos de la respuesta. Mientras THI mantiene errores bajos, el caso Wiener presenta errores mucho mayores, alcanzando errores de 61.71 %, correspondiente al error de la fuerza. A diferencia de los otros casos anteriores, aquí la identificación mediante filtros de Wiener deteriora de forma importante la estimación final de la respuesta.

Tabla 9. Máximos absolutos de la respuesta con THI y ATHI-Wiener

Magnitud	Referencia	THI	Error THI [%]	ATHI	Error ATHI [%]
$ u_N _{max}$ [m]	0.0860	0.0872	1.38	0.132	53.62
$ v_N _{max}$ [m/s]	0.749	0.7601	1.49	1.088	45.31
$ F_E _{max}$ [kN]	17.82	18.30	2.71	6.821	61.71

La Tabla 10 confirma que, en este caso, la incorporación del filtro de Wiener no mejora el desempeño iterativo respecto de THI. Mientras THI alcanza la convergencia en 16 iteraciones reales, el caso Wiener se detiene en el límite impuesto de 15 iteraciones sin alcanzar una convergencia adecuada. Del mismo modo, los errores RMS normalizados finales de desplazamiento, velocidad y fuerza resultan considerablemente mayores que los obtenidos con THI, cuyos valores se mantienen del orden de 1 %. En consecuencia, el método con Wiener no entrega una mejora efectiva, sino que conduce a una respuesta estancada y con un nivel de error significativamente superior.

Tabla 10. Comparación de iteraciones y errores RMS entre THI y ATHI-Wiener

Señal	THI [%]	ATHI [%]
Iteraciones reales (p)	16	No converge
Error RMS Desplazamiento	1.13	12.48
Error RMS Velocidad	1.24	23.77
Error RMS Fuerza	1.26	11.94

Los resultados indican que la identificación mediante filtros de Wiener regularizados no reproduce adecuadamente la relación dinámica entre las señales de interfaz para el caso de 1 GDL. Si bien los bucles virtuales alcanzan errores bajos dentro del modelo identificado, esta compatibilidad no se refleja en las iteraciones reales, donde la respuesta queda estancada y con errores superiores a los obtenidos mediante THI. Debido a que este caso corresponde a la verificación base del procedimiento, no se extiende esta estrategia al caso de 10 GDL. Por este motivo, los casos de 10 GDL se analizan únicamente con identificación basada en mínimos cuadrados.

6.1.4 Efecto del parámetro λ

Se realizaron simulaciones con valores de λ entre 0.1 y 1.0 para examinar su efecto sobre la convergencia del método THI en el caso 1 GDL.

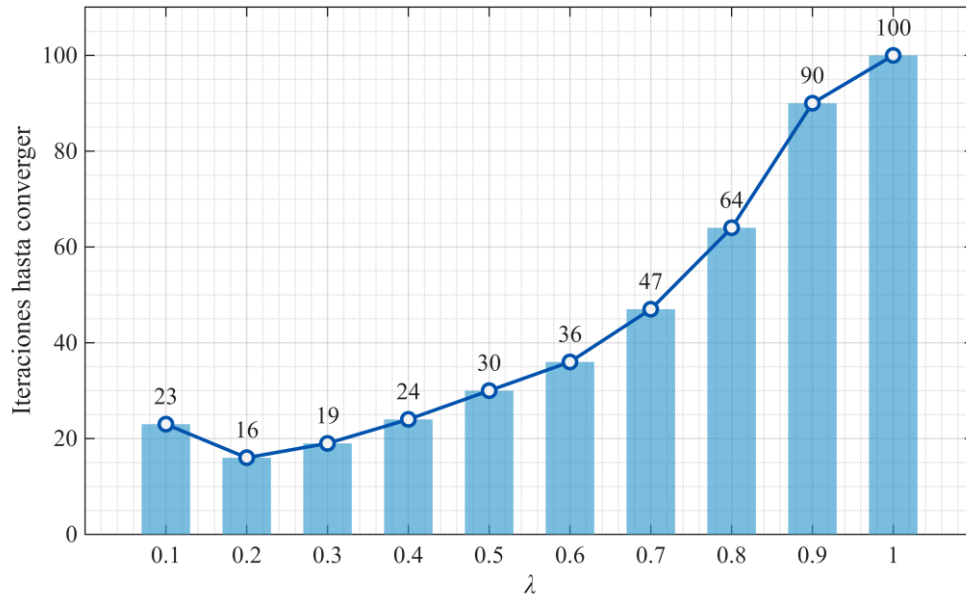


Figura 23. Sensibilidad del método THI al parámetro λ

En la Figura 23 se observa que existe un mínimo para $\lambda = 0.2$, valor con el cual el método converge en 16 iteraciones reales. Para $\lambda = 0.1$, la convergencia también se logra, pero con un mayor número de iteraciones, debido a que en cada paso solo se incorpora una fracción reducida del error entre las señales $\mathbf{u}_N^{(p)}$ y $\mathbf{u}_E^{(p)}$. En cambio, al aumentar λ por sobre 0.3, el número de iteraciones requeridas comienza a incrementar progresivamente, alcanzando sus mayores valores para λ cercanos a 1.0. Este resultado muestra que la convergencia del método THI es altamente sensible al parámetro λ y que existe un valor intermedio que entrega el mejor equilibrio entre estabilidad y rapidez.

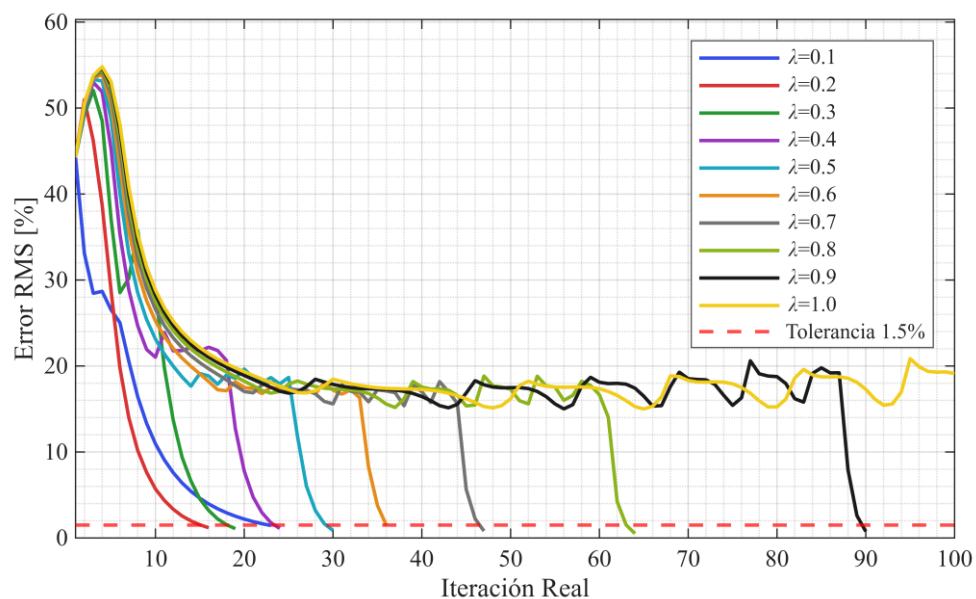


Figura 24. Curvas de convergencia del método THI para distintos valores de λ

La Figura 24 complementa este resultado al mostrar la evolución del error RMS para los distintos valores de λ . Se observa que para $\lambda = 0.1$, el error desciende de forma monótona desde la primera iteración, lo que refleja un proceso más estable pero más lento. Para $\lambda = 0.2$ en cambio, se obtiene el mejor desempeño global, ya que la corrección aplicada en cada iteración permite acelerar la convergencia sin introducir inestabilidades significativas. Para valores de λ entre 0.4 y 1.0 se observa un comportamiento distinto ya que, luego de una disminución inicial, las curvas ingresan en una zona de plato en la que, el error RMS permanece constante durante varias iteraciones en valores relativamente altos. Este comportamiento se asocia a una sobre corrección de la señal. En la iteración p , la diferencia entre $\mathbf{u}_N^{(p)}$ y $\mathbf{u}_E^{(p)}$ representa el desajuste entre señales bajo las condiciones de esa misma iteración, sin embargo, al construir la historia de la iteración $p + 1$, una incorporación excesiva de esa diferencia modifica la fuerza de interfaz y, por lo tanto, también se modifica la respuesta de la SN en la iteración siguiente. Como resultado, el proceso tiende a oscilar y la convergencia global se vuelve más lenta. Este efecto se vuelve más notorio en la parte final del registro, donde los errores acumulados en instantes previos requieren un mayor número de iteraciones para disiparse.

6.2 Caso 10 GDL

6.2.1 Método THI (Configuración A)

En la Figura 25 se observa una disminución continua del error en el piso de interfaz. El método THI converge en 7 iteraciones reales, partiendo de un error RMS de 12.51 % y finalizando con 1.10 %, lo que representa una reducción del 91.23 % respecto del valor inicial. La curva desciende de forma continua, lo que indica una convergencia estable del método.

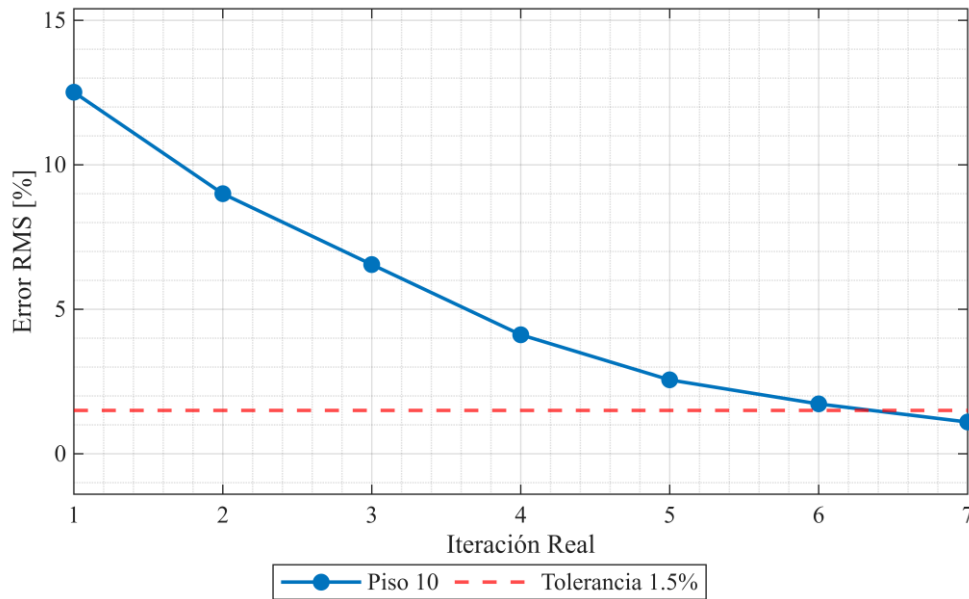


Figura 25. Convergencia iteraciones reales (THI)

El drift del piso 10 presenta en la primera iteración discrepancias entre las señales de interfaz experimental y numérica, como se aprecia en la Figura 26. En la tercera iteración se aprecia una mejor aproximación aunque aún persisten diferencias en torno a los máximos del registro. En la última iteración las curvas no presentan diferencias apreciables respecto de la señal de referencia a lo largo de todo el registro.

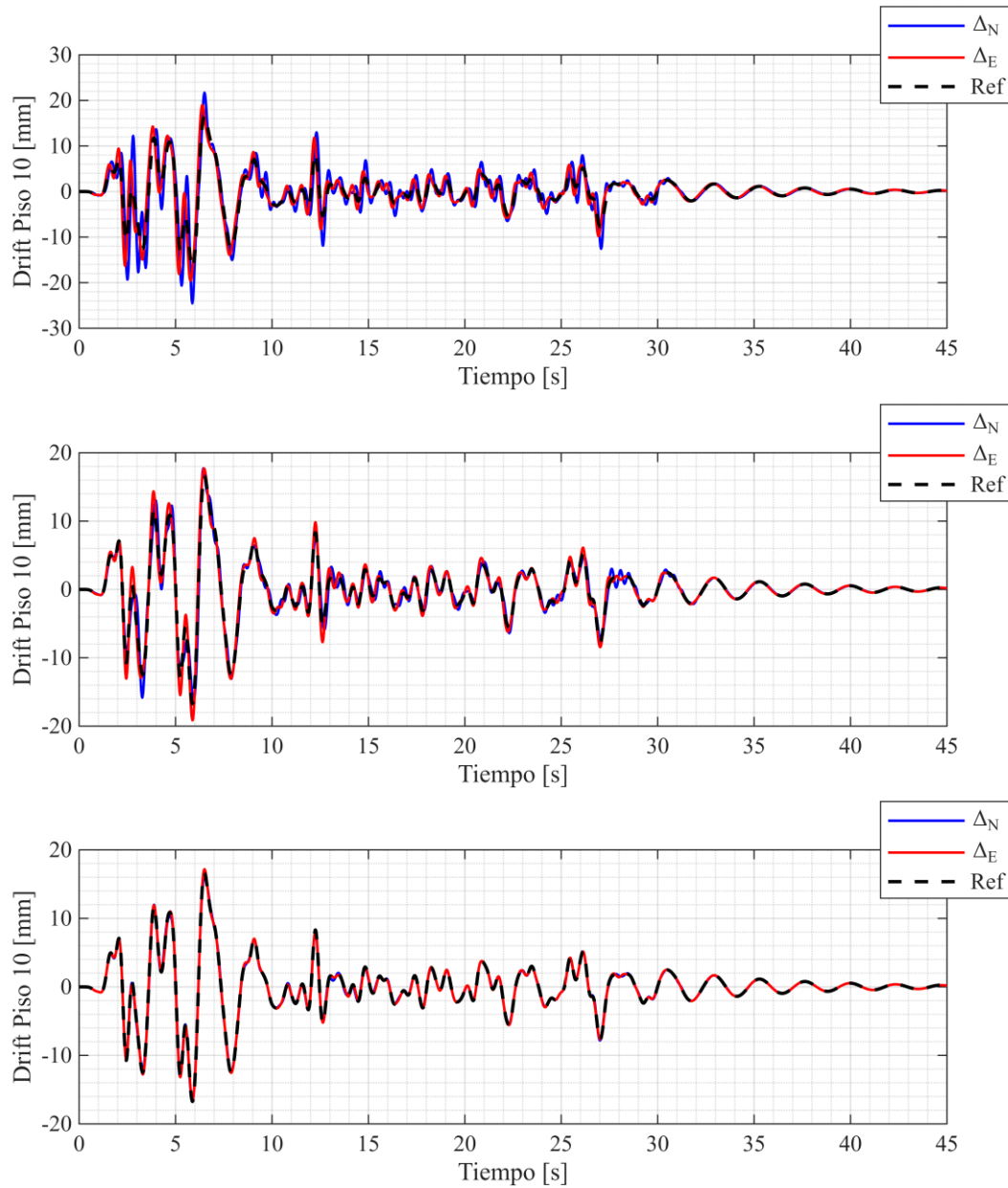


Figura 26. Respuesta de drift en iteraciones reales 1,3 y 7 (THI)

En las envolventes absolutas de drift y velocidad relativa por piso se observa que, en la primera iteración la mayor discrepancia respecto de la referencia se concentra en el piso de interfaz, como se aprecia en la Figura 27 y Figura 28. En la envolvente absoluta de drift, la respuesta del piso de interfaz (piso 10) supera en 46.6 % a la referencia. En la envolvente absoluta de velocidad relativa se aprecia un patrón similar, con una diferencia inicial aún mayor en el piso 10, donde la primera iteración supera en 98.8 % a la referencia, incluso supera la configuración numérica sin amortiguador viscoso en ese nivel. Este comportamiento de amplificación en la primera iteración es consistente con lo descrito en la sección 5.1.1. A medida que avanzan las iteraciones, ambos perfiles se aproximan progresivamente a la referencia en toda la altura, aunque la mayor diferencia se mantiene en el piso de interfaz.

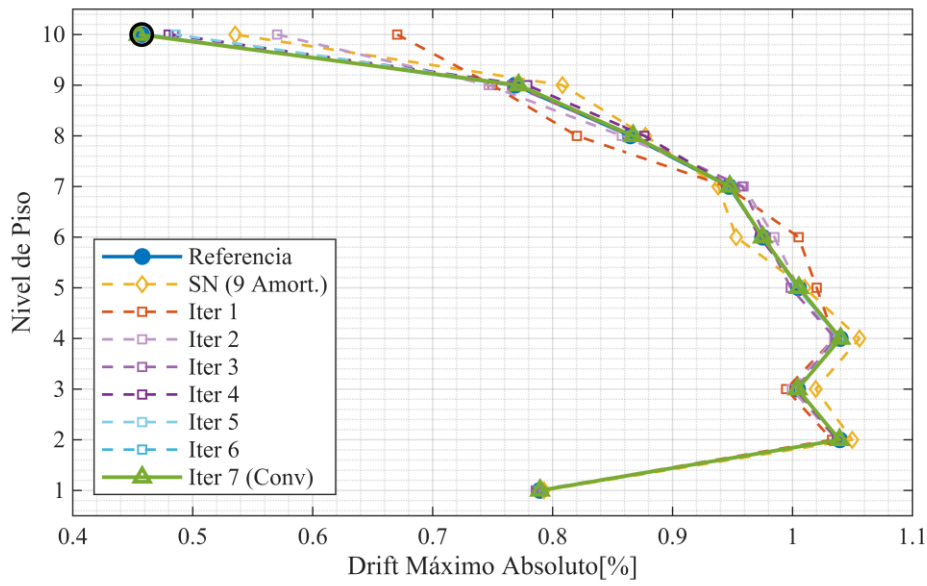


Figura 27. Envelope absoluta de drift por piso (THI)

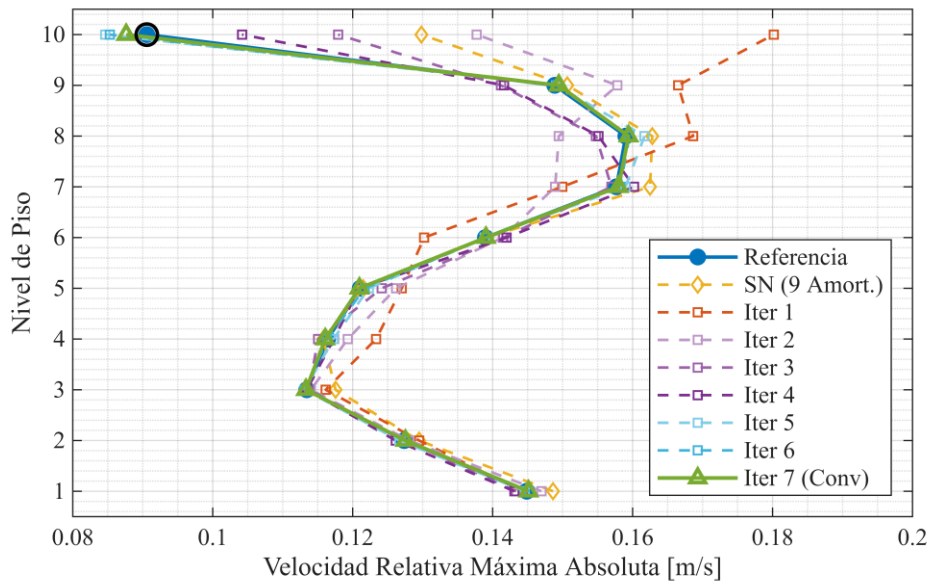


Figura 28. Envelope absoluta de velocidad relativa por piso (THI)

La Tabla 11 presenta los errores asociados a los máximos absolutos globales de la estructura, los cuales son bajos en las tres magnitudes evaluadas, con errores de 0.030 % en drift y de 0.249 % en velocidad relativa y fuerza. Estos resultados muestran que el método THI estima con alta precisión la respuesta máxima global de la estructura.

Tabla 11. Máximos absolutos de la respuesta global con THI

Piso	Magnitud	Referencia	THI	Error [%]
4	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	38.05	38.06	0.030
8	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.1590	0.1594	0.249
8	$ F_E _{max}$ [kN]	3.181	3.188	0.249

En el piso de interfaz, los errores asociados a los máximos absolutos son mayores que los obtenidos para la respuesta global de la estructura, como se resume en la Tabla 12. El mayor error corresponde a la velocidad relativa, con 3.24 %, mientras que el drift y fuerza presentan errores de 0.546 % y 1.08 % respectivamente. Estos resultados muestran que el método THI entrega una estimación cercana a la referencia en el piso de interfaz, aunque con discrepancias mayores que las observadas a nivel global.

Tabla 12. Máximos absolutos de la respuesta en el piso de interfaz con THI

Piso	Magnitud	Referencia	THI	Error [%]
10	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	16.74	16.65	0.546
10	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.0906	0.0876	3.24
10	$ F_E _{max}$ [kN]	1.812	1.831	1.08

6.2.2 Método ATHI (Configuración A)

La Figura 29 muestra la curva de convergencia de las iteraciones reales del método ATHI. El método converge en 2 iteraciones reales, partiendo de un error RMS de 12.51 % y finalizando con 0.69 %, lo que representa una reducción del 94.37 % respecto del valor inicial. Se observa que la curva cae de forma abrupta entre la primera y segunda iteración real, lo que indica que el bucle virtual corrige gran parte de la incompatibilidad en la frontera antes de ejecutar la segunda iteración real.

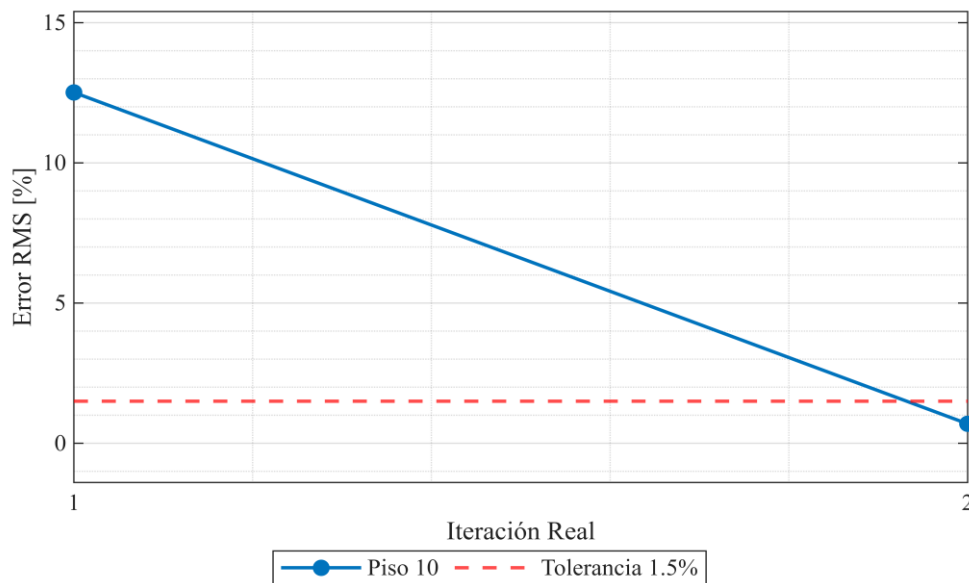


Figura 29. Convergencia iteraciones reales (ATHI)

El bucle virtual del método ATHI, ejecutado tras la primera iteración real requiere 13 iteraciones virtuales para satisfacer la tolerancia, como se aprecia en la Figura 30, partiendo de un error RMS virtual de 12.52 % y finalizando con 0.065 %. La curva presenta una evolución similar a la observada en la Figura 25, con un descenso sostenido del error. Esto indica que la incompatibilidad en la interfaz se reduce progresivamente antes de la siguiente iteración real.

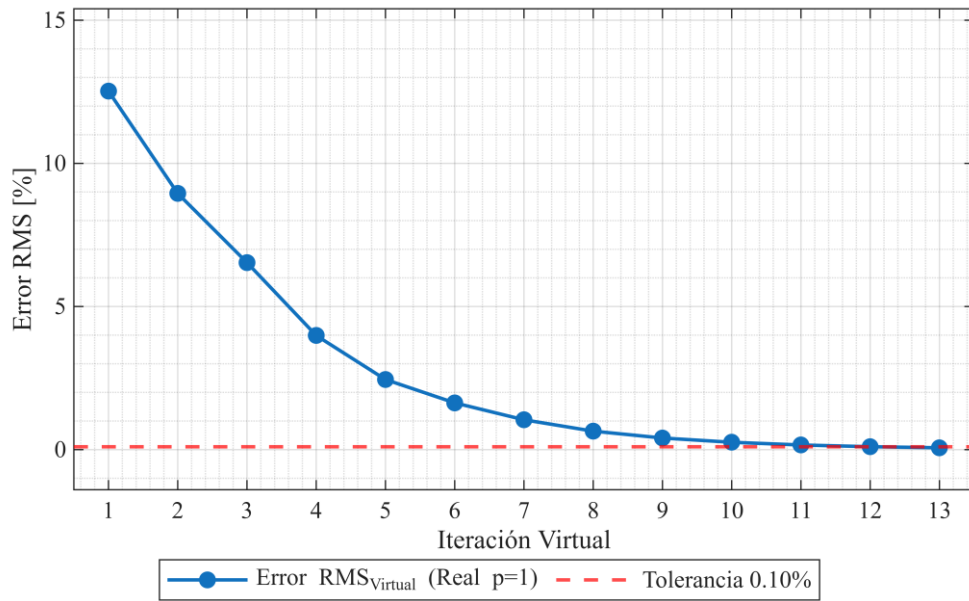


Figura 30. Convergencia iteraciones virtuales (ATHI)

La evolución del drift en el piso de interfaz en las iteraciones reales 1 y 2 muestra el efecto del bucle virtual en la reducción de la incompatibilidad en la interfaz, como se aprecia en la Figura 31. En la primera iteración, la discrepancia entre las señales de interfaz es notoria en el tramo de mayor respuesta del registro. En la segunda iteración real, las diferencias respecto de la referencia dejan de ser apreciables a lo largo de todo el registro.

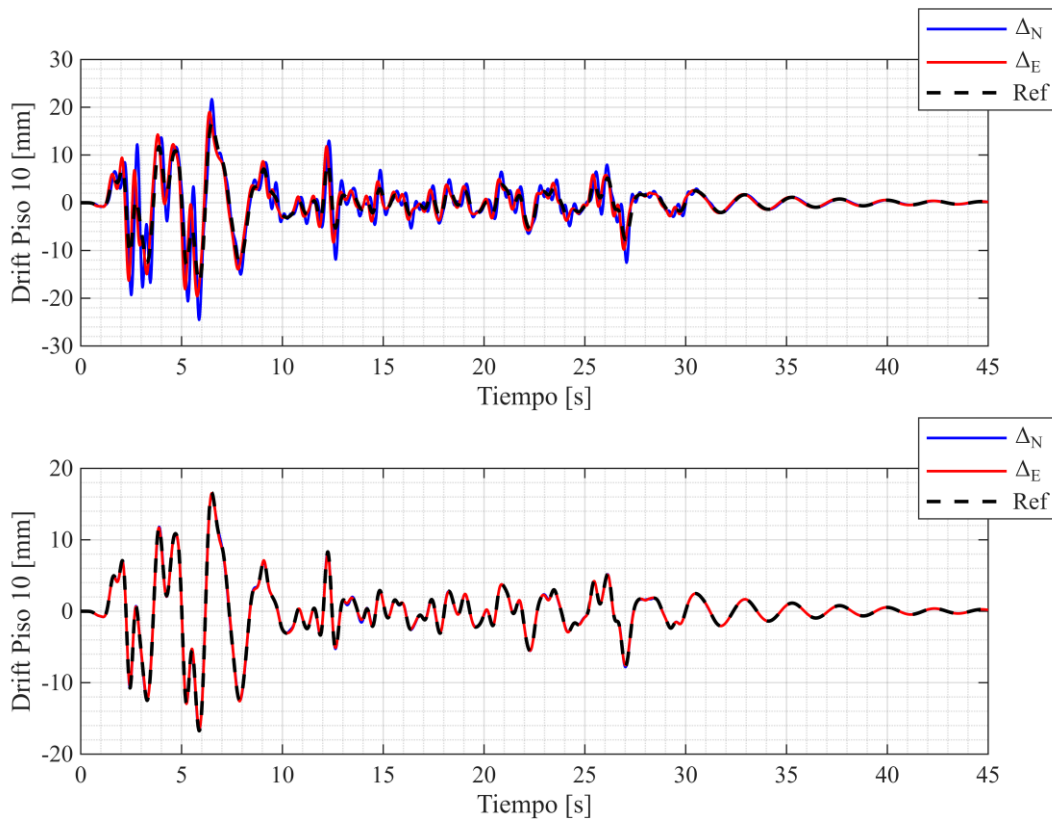


Figura 31. Respuesta de drift en iteraciones reales 1 y 2 (ATHI)

La Figura 32 muestra la evolución del drift virtual del piso 10 en las iteraciones 1,3 y 13. En la primera iteración la diferencia es similar a la observada en la primera iteración real. En la tercera iteración virtual las señales se aproximan de manera apreciable, aunque aún persisten diferencias en torno a los máximos del tramo de mayor respuesta. En la última iteración, las diferencias respecto de la referencia dejan de ser apreciables a lo largo del registro, lo que indica que el modelo ARX representa adecuadamente la dinámica del sistema.

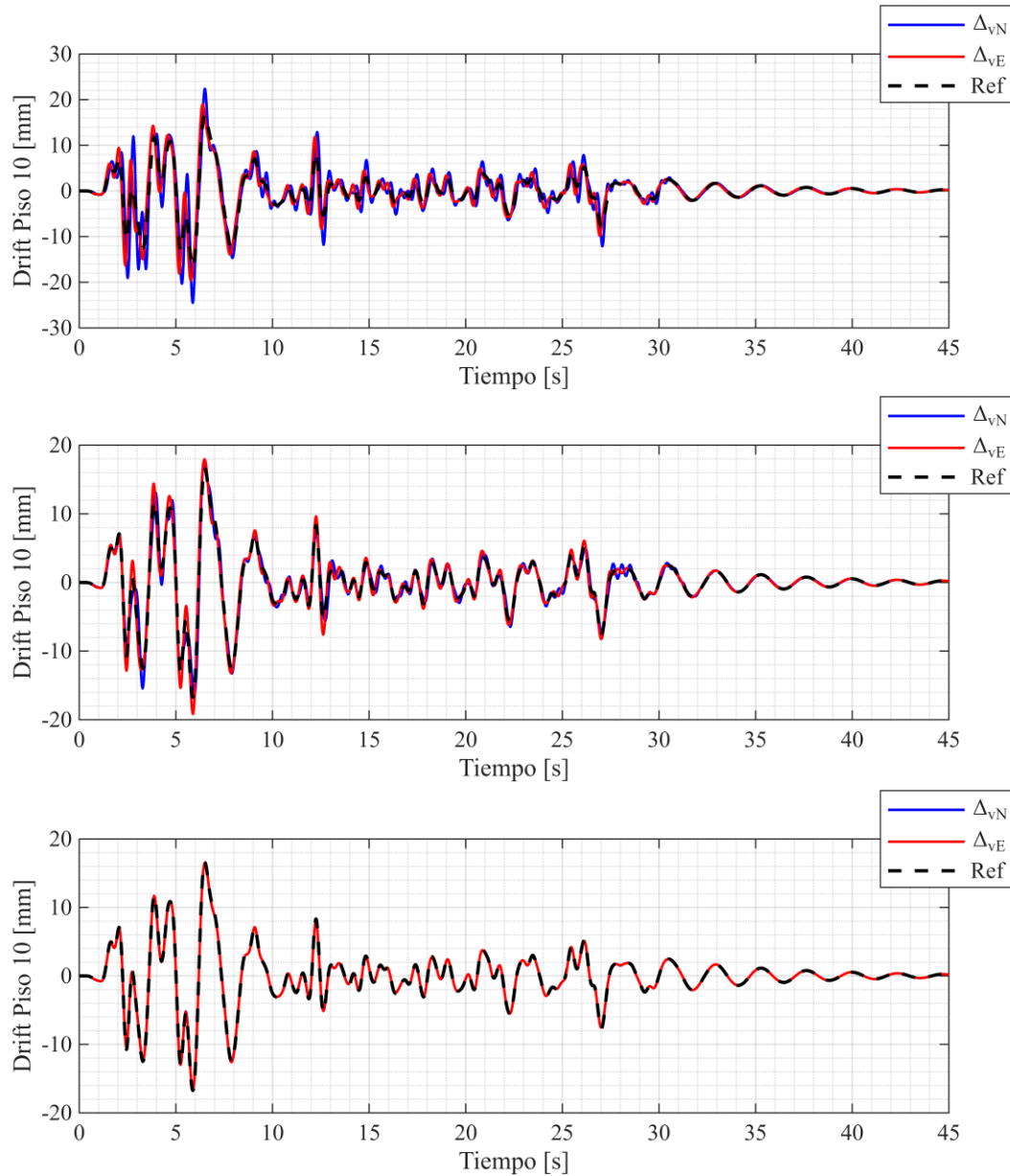


Figura 32. Respuesta de drift en iteraciones virtuales 1, 3 y 13 (ATHI)

En las envolventes absolutas de drift y velocidad relativa por piso se observa que, en la primera iteración, la mayor discrepancia respecto de la envolvente de referencia vuelve a concentrarse en el piso de interfaz, como se aprecia en las Figura 33 y Figura 34. En la envolvente absoluta de drift, la respuesta del piso 10 supera en 46.5 % a la referencia. En cuanto a la envolvente absoluta de velocidad relativa, se aprecia un patrón similar, con una diferencia inicial aún mayor en el piso de interfaz, superando en 98.9 % al valor de referencia y 38.8 % a la respuesta sin amortiguador en ese nivel. Este comportamiento es consistente con el fenómeno de amplificación descrito previamente para la primera iteración. A partir de la segunda iteración, ambos perfiles se acercan a la referencia en prácticamente toda la altura, aunque

la mayor diferencia permanece en el piso de interfaz, con un error de 1.27 % en velocidad relativa máxima.

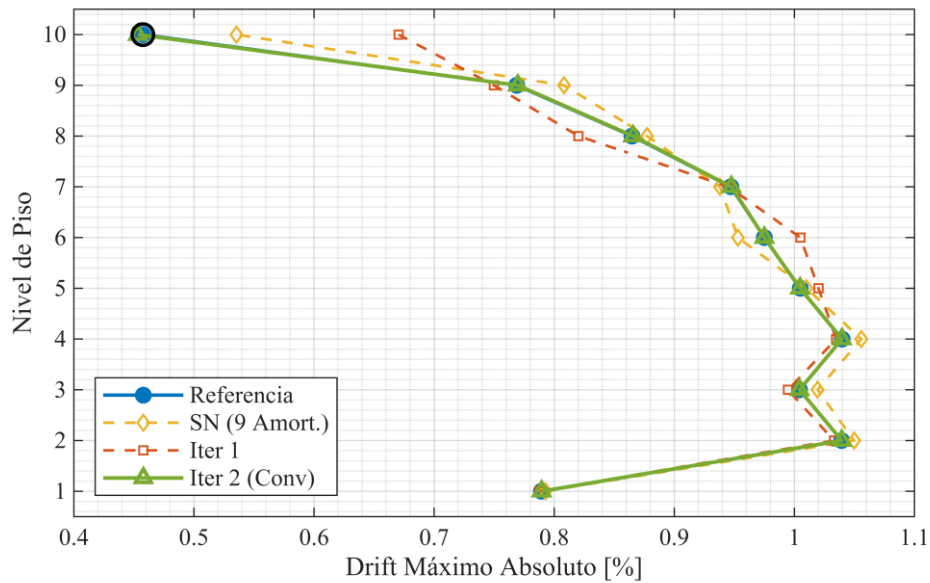


Figura 33. Envolvente absoluta de drift por piso (ATHI)

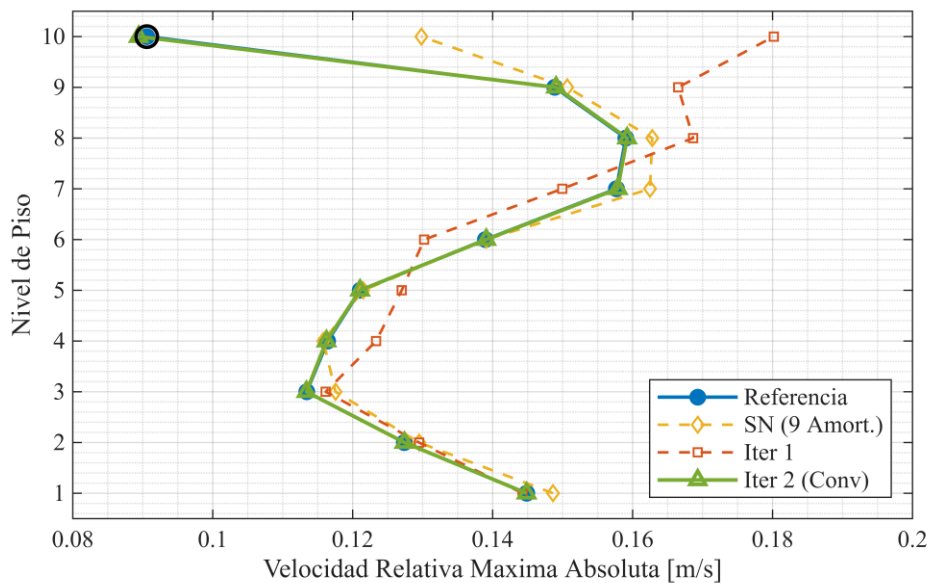


Figura 34. Envolvente absoluta de velocidad relativa por piso (ATHI)

En la estructura completa, como se resume en la Tabla 13, ATHI reduce los errores respecto de THI en las tres magnitudes evaluadas. La mayor diferencia se observa en el drift, cuyo error disminuye de 0.030 % a 0.003 %, mientras que en velocidad relativa y fuerza los errores se reducen de 0.249 % a 0.115 %. En este caso, ATHI entrega una estimación de los máximos absolutos globales de la estructura.

En el piso de interfaz, la Tabla 14 muestra un comportamiento distinto. La mejora más significativa se observa en la velocidad relativa, cuyo error disminuye de 3.24 % con THI a 1.27 % con ATHI, mientras que el drift y la fuerza presentan diferencias levemente mayores que las obtenidas con THI.

Tabla 13. Máximos absolutos de la respuesta global con THI y ATHI

Piso	Magnitud	Referencia	THI	Error THI [%]	ATHI	Error ATHI [%]
4	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	38.05	38.06	0.030	38.05	0.003
8	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.1590	0.1594	0.249	0.1592	0.115
8	$ F_E _{max}$ [kN]	3.181	3.188	0.249	3.184	0.115

Tabla 14. Máximos absolutos de la respuesta en el piso de interfaz con THI y ATHI

Piso	Magnitud	Referencia	THI	Error THI [%]	ATHI	Error ATHI [%]
10	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	16.74	16.65	0.546	16.59	0.90
10	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.0906	0.0876	3.24	0.0894	1.27
10	$ F_E _{max}$ [kN]	1.812	1.831	1.08	1.790	1.20

Por su parte, la Tabla 15 muestra que ATHI reduce las iteraciones reales de 7 a 2 gracias a la convergencia previa del bucle virtual. Además, disminuye los errores RMS en las tres señales evaluadas en el piso de interfaz, siendo la mayor reducción en la señal de velocidad relativa.

Tabla 15. Comparación de iteraciones y errores RMS entre THI y ATHI

Señal	THI [%]	ATHI [%]
Iteraciones Reales	7	2
Error RMS Drift	0.743	0.415
Error RMS Velocidad	1.419	0.688
Error RMS Fuerza	1.182	0.789

6.2.3 Método THI (Configuración B)

En la Figura 35 se observan las curvas de convergencia por SE, correspondientes a los pisos 9 y 10. El método THI converge en 12 iteraciones reales, partiendo de un error RMS de 14.31 % en la SE 1 (piso 9) y 20.78 % en la SE 2 (piso 10), finalizando con 0.63 % y 1.18 %, respectivamente. Ambas curvas descienden de forma continua, pero la SE 2, se mantiene por encima de la SE 1 durante todas las iteraciones, por lo que controla la convergencia global.

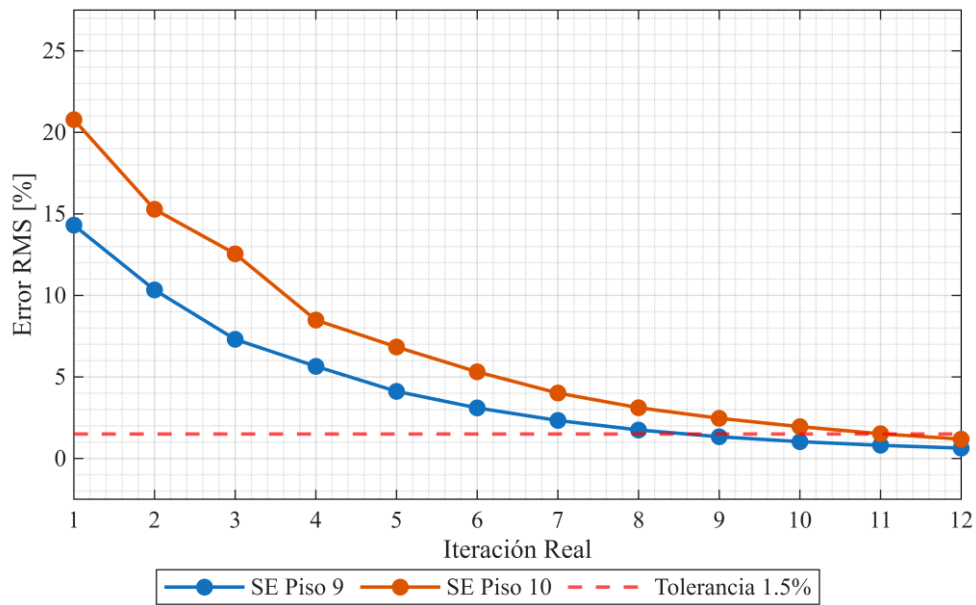
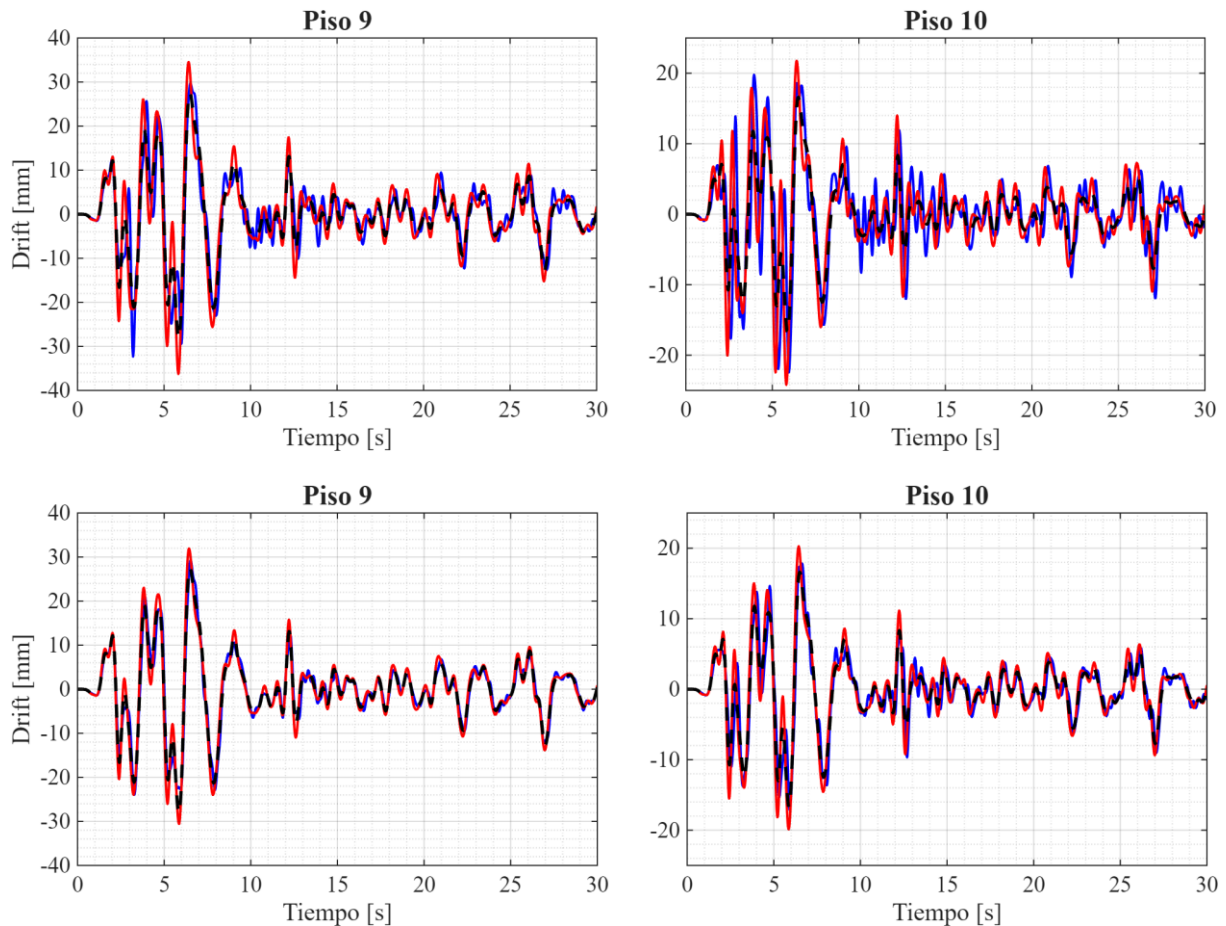


Figura 35. Convergencia iteraciones reales (THI)

Las historias de drift en los pisos de interfaz 9 y 10, mostradas en la Figura 36 para las iteraciones 1, 3 y 12, evidencian una reducción progresiva de las discrepancias a medida que avanza el proceso iterativo. En la primera iteración se observan diferencias apreciables entre las señales de interfaz y referencia en ambos pisos, concentradas principalmente en los tramos de mayor amplitud. En la tercera iteración, la superposición mejora, aunque aún persisten diferencias visibles. En la última iteración, las diferencias respecto de la referencia dejan de ser apreciables en ambos pisos. Esta evolución muestra que la compatibilidad se alcanza de manera progresiva en ambas interfaces, aunque el piso 10 mantiene la condición más exigente durante el proceso.



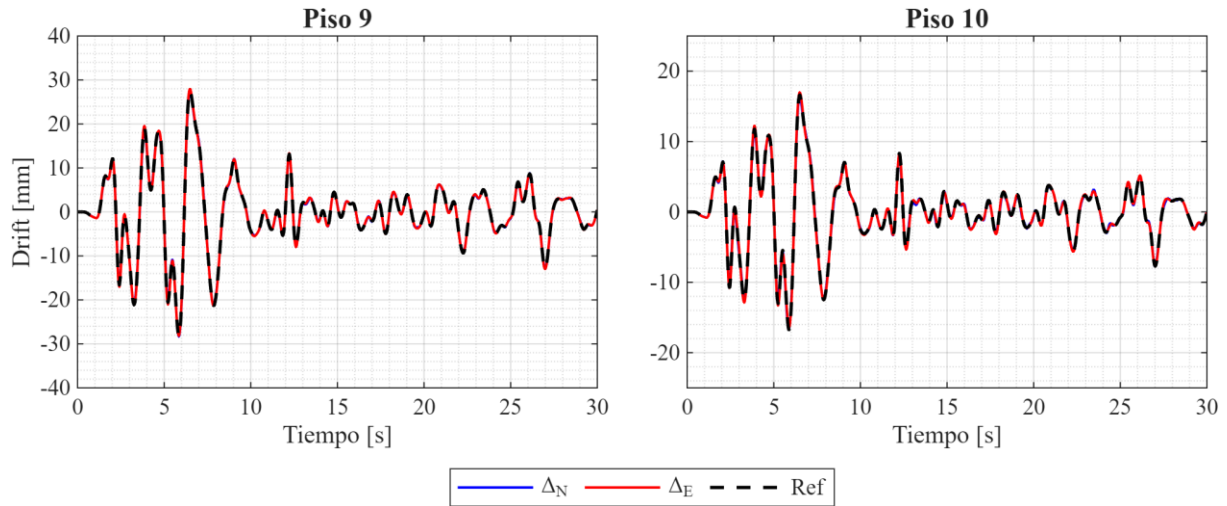


Figura 36. Respuesta de drift en iteraciones reales 1, 3 y 12 (THI)

En las envolventes absolutas de drift y velocidad relativa por piso se observa que, en la primera iteración, las mayores diferencias respecto de la referencia se concentran en la zona superior de la estructura, particularmente en los pisos de interfaz 9 y 10, como se aprecia en la Figura 37 y Figura 38. En la envolvente absoluta de drift, la respuesta del piso 9 supera en 14.8 % a la referencia, mientras que en el piso 10 dicha diferencia alcanza 33.9 %. En la envolvente absoluta de velocidad relativa se observa una discrepancia aún mayor, con diferencias de 66.7 % y 108.5 % respecto de la referencia en los pisos de interfaz 9 y 10, respectivamente. Además, en ambos niveles la primera iteración supera la respuesta sin amortiguador. Esta respuesta inicial sigue la tendencia de amplificación ya descrita previamente para la iteración inicial. En la última iteración ambos perfiles se ajustan a la referencia en toda la altura, aunque la mayor diferencia remanente se mantiene en el piso 10, con un error de 1,98 % en velocidad relativa máxima.

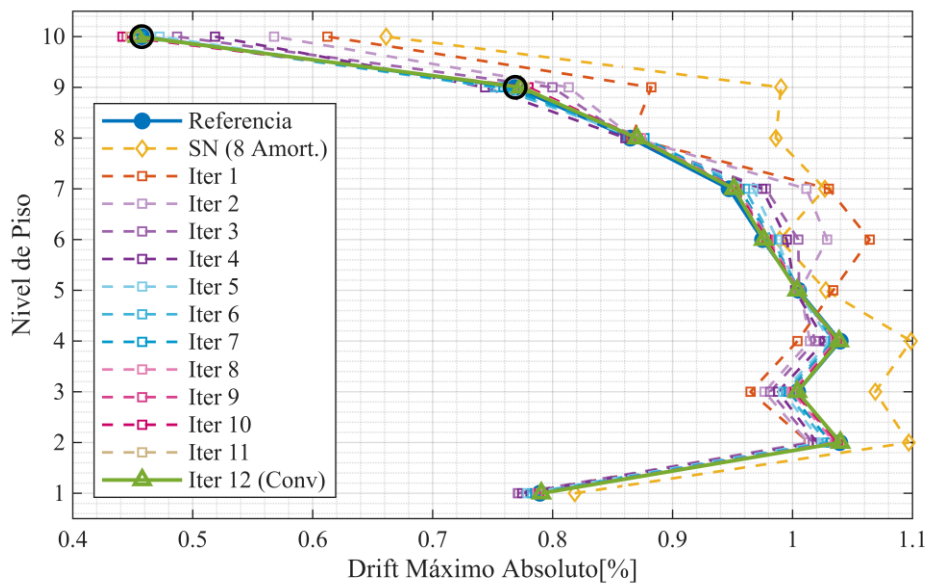


Figura 37. Envolvente absoluta de drift por piso (THI)

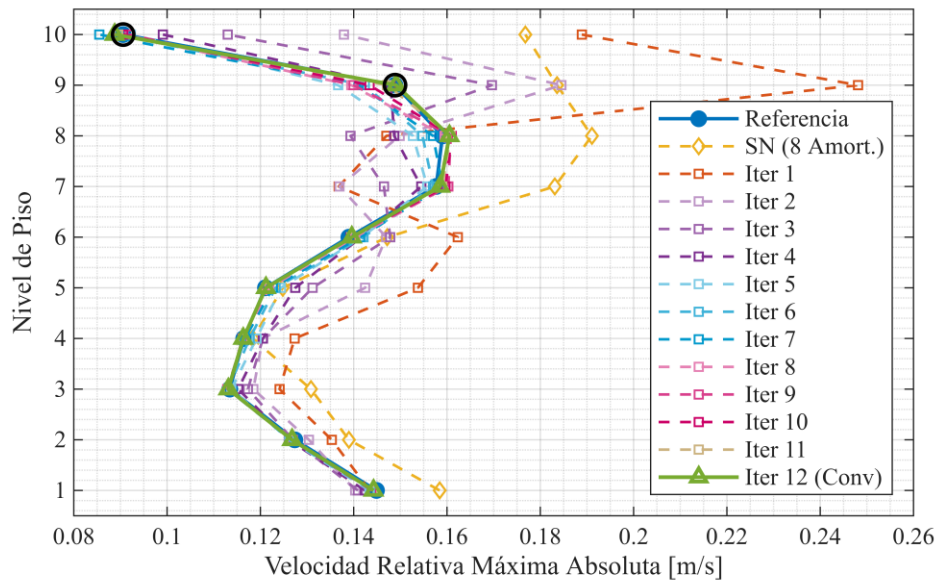


Figura 38. Envolvente absoluta de velocidad relativa por piso (THI)

A nivel global, los máximos absolutos mostrados en la Tabla 16 presentan diferencias inferiores al 1 % respecto de la referencia. El menor error corresponde al drift, con 0.0823 %, mientras que la velocidad relativa y la fuerza alcanzan errores de 0.940 %. En este caso, THI entrega una estimación cercana de los máximos absolutos globales de la estructura.

Tabla 16. Máximos absolutos de la respuesta global con THI

Piso	Magnitud	Referencia	THI	Error [%]
4	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	38.05	38.02	0.083
8	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.1590	0.1605	0.940
8	$ F_E _{max}$ [kN]	3.181	3.210	0.940

En los pisos de interfaz, la Tabla 17 muestra errores mayores que los observados a nivel global. La mayor diferencia corresponde a la fuerza en el piso 10, con 3.23 %, seguida de la velocidad relativa en ese mismo piso con 1.976 %. En contraste, en el piso 9 los errores se mantienen por debajo de 0.6 % en las tres señales. Esto indica que el método THI estima adecuadamente la respuesta en ambas interfaces, aunque con discrepancias mayores en el piso 10.

Tabla 17. Máximos absolutos de la respuesta en los pisos de interfaz con THI

Piso	Magnitud	Referencia	THI	Error [%]
9	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	28.14	28.30	0.593
9	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.1489	0.1491	0.160
9	$ F_E _{max}$ [kN]	2.977	2.973	0.140
10	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	16.74	16.73	0.694
10	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.0906	0.089	1.976
10	$ F_E _{max}$ [kN]	1.812	1.872	3.323

6.2.4 Método ATHI (Configuración B)

En la Figura 39 se observan las curvas de convergencia de las SE 1 y 2 para el método ATHI, correspondientes a los pisos 9 y 10. El método converge en 7 iteraciones reales, partiendo de un estado pre-virtual con un error RMS de 14.31 % en la SE 1 y 20.78 % en la SE 2. El bucle virtual inicial reduce estos valores antes del inicio de las iteraciones reales, de modo que la primera iteración real parte con errores RMS de 3.68 % y 6.15 % respectivamente. La convergencia finaliza con errores de 0.84 % en la SE 1 y 1.49 % en la SE 2. Ambas curvas descienden de forma continua a lo largo del proceso, aunque la SE del piso 10 se mantiene por encima de la SE del piso 9 durante todas las iteraciones, por lo que controla la convergencia global.

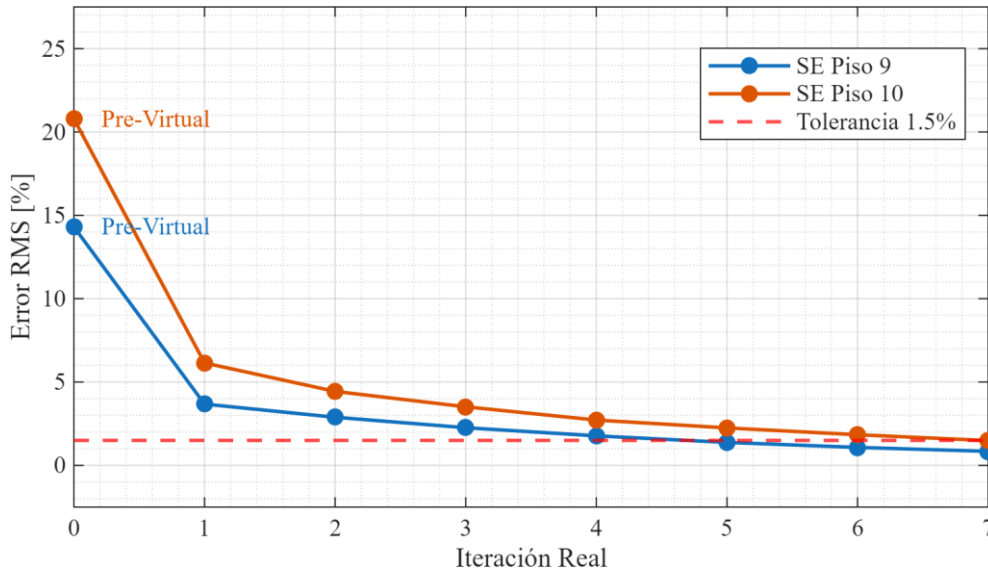


Figura 39. Convergencia iteraciones reales (ATHI)

El bucle virtual que se ejecuta previo a las iteraciones reales requiere de 22 iteraciones virtuales para satisfacer la tolerancia, como se aprecia en la Figura 40, partiendo de errores RMS virtuales de 13.59 % y 17.82 % en las interfaces de los pisos 9 y 10 respectivamente, y finalizando con 0.067 % y 0.092 %. Ambas curvas presentan un descenso sostenido del error a lo largo del ciclo virtual, manteniéndose la curva del piso 10 por encima de la del piso 9 durante todo el proceso.

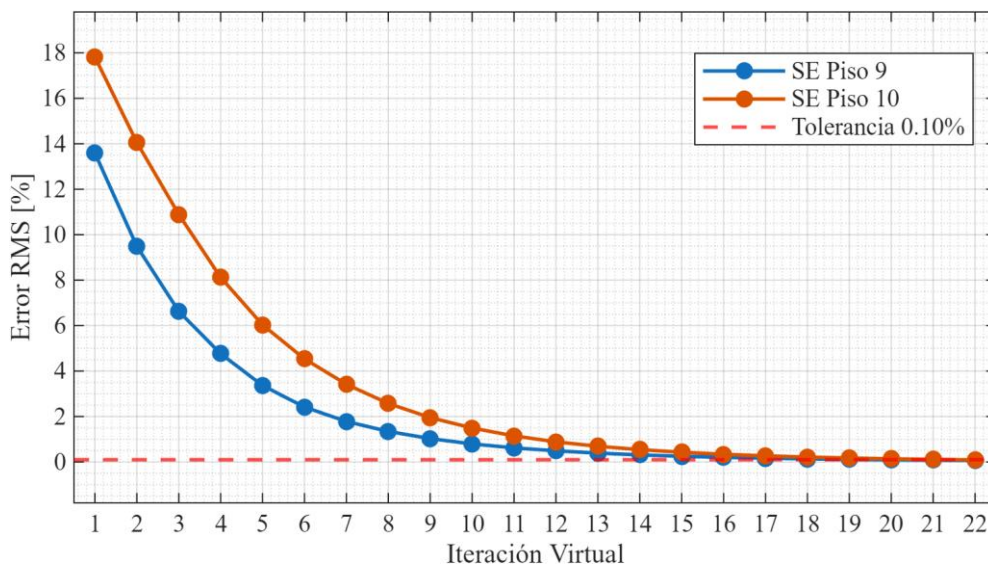


Figura 40. Convergencia iteraciones virtuales (ATHI)

Las historias de drift en los pisos de interfaz 9 y 10, mostradas en la Figura 41 para las iteraciones reales 1, 3 y 7, evidencian una buena aproximación a la respuesta de referencia desde la primera iteración real. En ambos pisos, las diferencias entre las señales de interfaz y la referencia se concentran en los tramos de mayor amplitud del registro y resultan levemente más visibles en el piso 10. En la tercera iteración, la superposición mejora de forma moderada, mientras que en la séptima iteración las diferencias respecto de la referencia dejan de ser apreciables a lo largo del registro. Esto es consistente con la reducción previa lograda por el bucle virtual, que permite iniciar las iteraciones reales desde un estado en el que las señales de interfaz ya presentan un alto grado de compatibilidad.

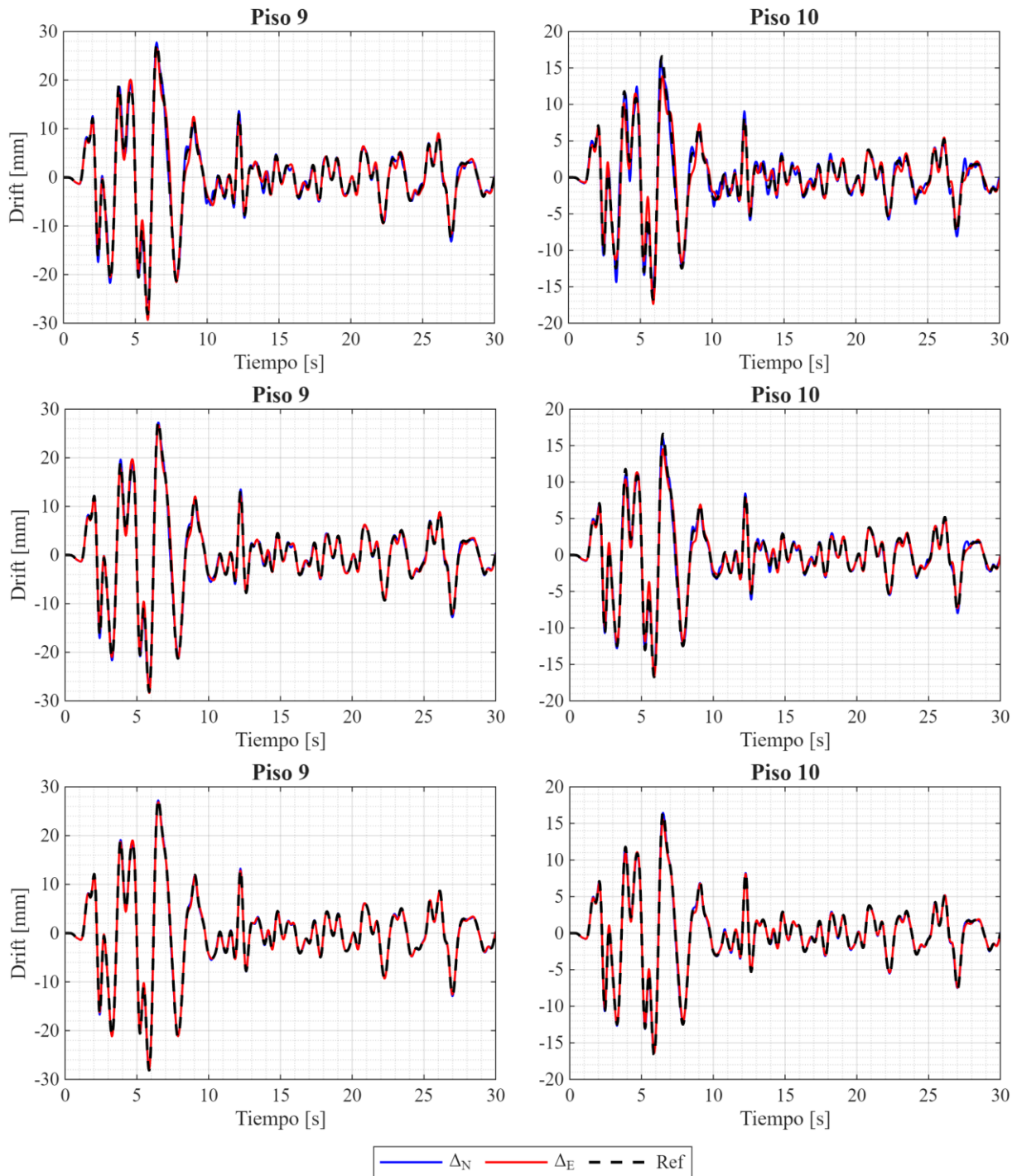


Figura 41. Respuesta de drift en iteraciones reales 1, 3 y 7 (ATHI)

En el ciclo virtual, la respuesta de drift en los pisos de interfaz 9 y 10 muestra una aproximación progresiva entre las señales de interfaz virtuales, como se aprecia en la Figura 42. En la primera iteración virtual se observan diferencias visibles respecto de la referencia en ambos pisos. Estas discrepancias son más notorias en el piso 10. En la tercera iteración, la superposición mejora de manera apreciable, lo que indica que la mayor corrección ocurre en la etapa inicial del ciclo virtual. En la iteración 22, las diferencias entre señales de interfaz y referencia dejan de ser apreciables, lo que respalda la capacidad de la matriz identificada para representar adecuadamente la dinámica del sistema.

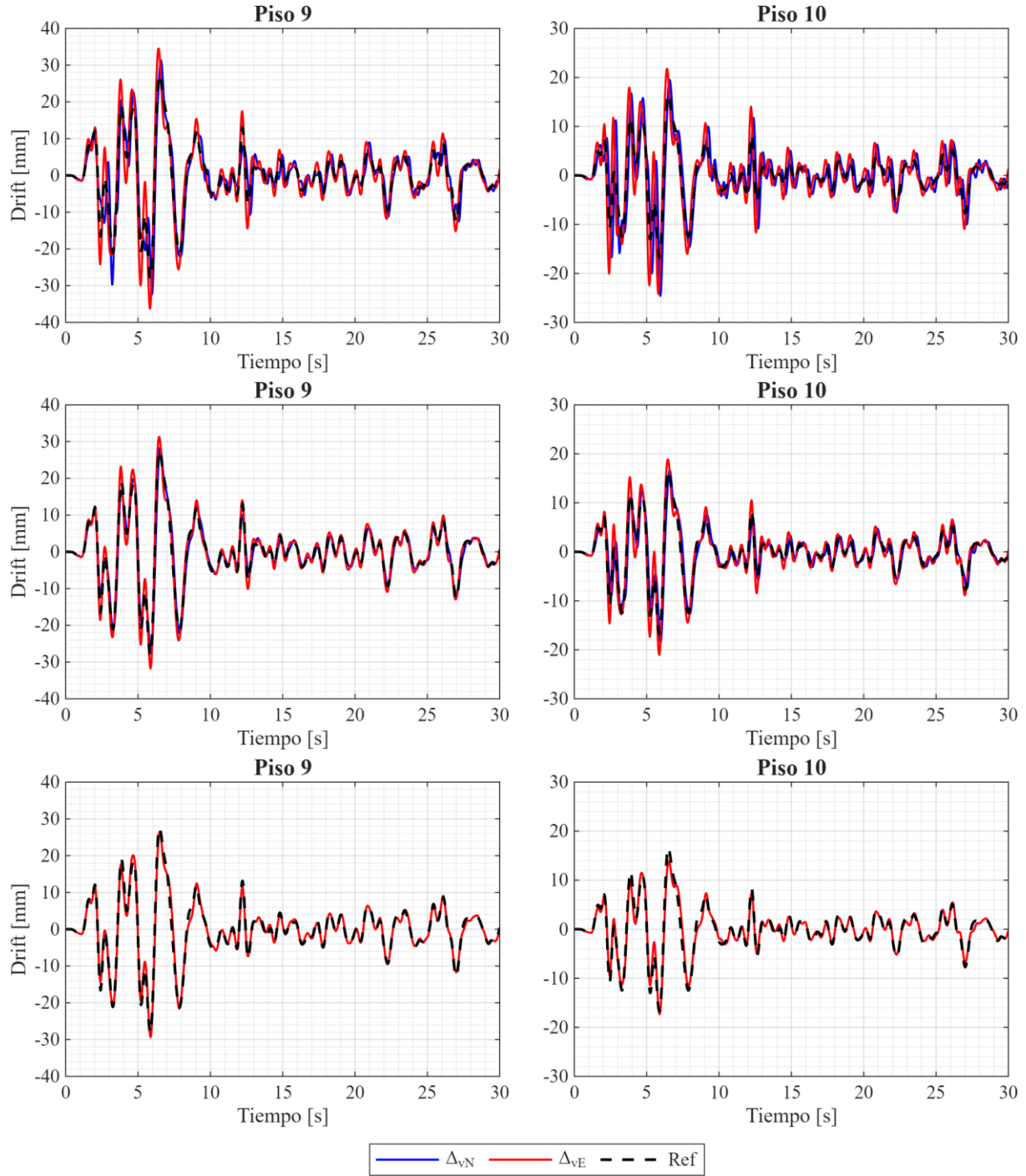


Figura 42. Respuesta de drift en iteraciones virtuales 1,3 y 22 (ATHI)

Las Figura 43 y Figura 44 muestran que las envolventes absolutas de drift y velocidad relativa por piso se aproximan a la referencia desde la primera iteración real. En la envolvente absoluta de drift las diferencias en los pisos de interfaz 9 y 10 son bajas desde el inicio, con errores de 1.38 % y 3.04 % respecto de la referencia, respectivamente. En la envolvente absoluta de velocidad relativa, la aproximación también es buena en el piso 9, con un error inicial de 1.51 %, mientras que en el piso 10 se mantiene la discrepancia más importante, alcanzando 25.3 % en la primera iteración, aunque su respuesta permanece por debajo de la obtenida para la estructura con 8 amortiguadores. A medida que avanzan las iteraciones, ambos perfiles se ajustan progresivamente a la referencia en toda la altura. En la iteración final, la mayor diferencia permanece en el piso 10, con un error de 1.15 % en velocidad relativa máxima.

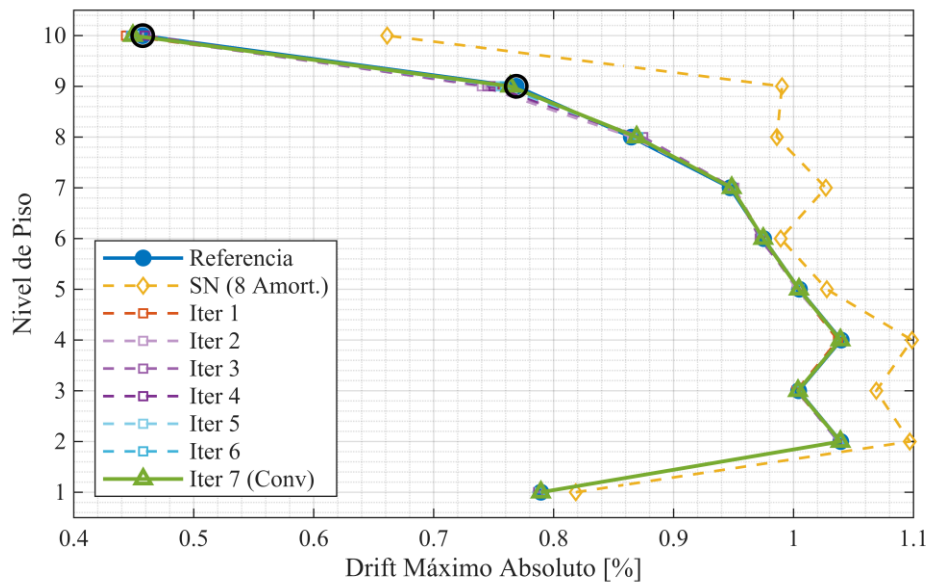


Figura 43. Envolvente absoluta de drift por piso (ATHI)

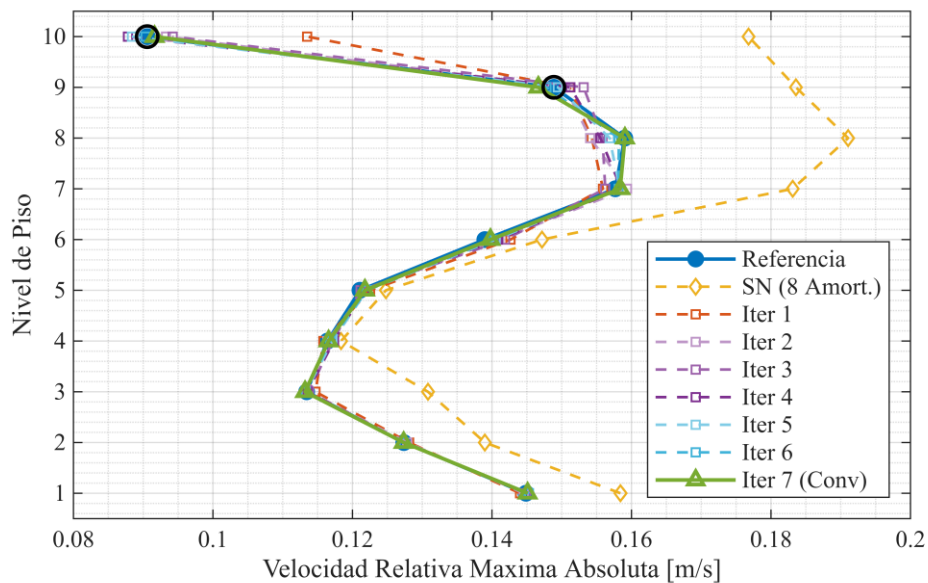


Figura 44. Envolvente absoluta de velocidad relativa por piso (ATHI)

En la estructura completa, como se resume en la Tabla 18, ATHI reduce los errores respecto de THI. La mejora más significativa se observa en la velocidad relativa y fuerza máxima, cuyos errores disminuyen de 0.940 % a 0.017 %, mientras que en el drift máximo, el error se reduce de 0.083 % a 0.060 %. En este caso, ATHI entrega una mejor estimación de los máximos absolutos globales de la estructura.

Tabla 18. Máximos absolutos de la respuesta global con THI y ATHI

Piso	Magnitud	Referencia	THI	Error THI [%]	ATHI	Error ATHI [%]
4	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	38.05	38.02	0.083	38.03	0.060
8	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.1590	0.1605	0.940	0.1591	0.017
8	$ F_E _{max}$ [kN]	3.181	3.210	0.940	3.181	0.017

En los pisos de interfaz, la Tabla 19 compara los resultados obtenidos con THI y ATHI en los pisos 9 y 10. En el piso 9, THI presenta errores menores que ATHI en las tres magnitudes evaluadas, siendo la diferencia más visible la de la velocidad relativa máxima, cuyo error aumenta de 0.160 % a 1.493 %. En el piso 10, en cambio, ATHI mejora la estimación de la velocidad relativa máxima y de la fuerza máxima, reduciendo sus errores de 1.976 % a 1.154 % y de 3.323 % a 0.230 %, respectivamente, aunque en el drift máximo el error aumenta de 0.694 % a 1.778 %. Esto muestra que, en términos de respuesta de interfaz, ATHI no asegura necesariamente una mejora respecto de THI en todas las magnitudes ni en ambos niveles.

Tabla 19. Máximos absolutos de la respuesta en los pisos de interfaz con THI y ATHI

Piso	Magnitud	Referencia	THI	Error THI [%]	ATHI	Error ATHI [%]
9	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	28.14	28.30	0.593	27.96	0.629
9	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.1489	0.1491	0.160	0.1466	1.493
9	$ F_E _{max}$ [kN]	2.977	2.973	0.140	2.970	0.257
10	$ \Delta_N _{max}$ [mm]	16.74	16.73	0.694	16.44	1.778
10	$ \Delta v_N _{max}$ [m/s]	0.0906	0.089	1.976	0.0916	1.154
10	$ F_E _{max}$ [kN]	1.812	1.872	3.323	1.807	0.230

ATHI reduce las iteraciones reales de 12 a 7 gracias a la convergencia previa del bucle virtual. Los errores RMS presentados en la Tabla 20 muestran que ATHI mejora el drift y velocidad relativa en ambos pisos de interfaz, siendo la mayor reducción la de la velocidad relativa del piso 10. En contraste, el error RMS de fuerza aumenta respecto de THI tanto en el piso 9 como en el piso 10.

Tabla 20. Comparación de iteraciones y errores RMS entre THI y ATHI

Señal	THI [%]	ATHI [%]
Iteraciones Reales	12	7
Error RMS Drift (Piso 9)	0.366	0.340
Error RMS Velocidad rel. (Piso 9)	0.903	0.827
Error RMS Fuerza (Piso 9)	0.547	1.049
Error RMS Drift (Piso 10)	0.813	0.671
Error RMS Velocidad rel. (Piso 10)	1.853	1.621
Error RMS Fuerza (Piso 10)	1.107	1.678

7 Conclusiones

En esta memoria se evaluó el desempeño de los algoritmos THI y ATHI en simulaciones híbridas offline aplicadas a sistemas estructurales con amortiguadores viscosos. A diferencia de los trabajos de Guo et al., enfocados en dispositivos inerciales de control como TMD y AMD, este estudio considera amortiguadores viscosos como subestructuras experimentales. Se analizaron configuraciones de 1 y 10 grados de libertad con una y dos subestructuras experimentales, considerando la precisión de la respuesta, la compatibilidad alcanzada en la interfaz, el número de iteraciones, sensibilidad al parámetro λ y el uso de filtros de Wiener como alternativa de identificación.

- En los casos estudiados, THI logra la convergencia y aproxima adecuadamente la respuesta de referencia, aunque requiere un número elevado de iteraciones reales. Además, se observa que las primeras iteraciones reales pueden presentar amplificaciones importantes antes de alcanzar la compatibilidad. Este comportamiento debe considerarse en una eventual implementación experimental, ya que podría aumentar las demandas iniciales sobre el actuador y la subestructura experimental.
- La sensibilidad del parámetro λ , evaluada en el caso 1 GDL, muestra que $\lambda = 0.2$ entrega el mejor equilibrio entre estabilidad y velocidad de convergencia. Valores menores favorecen una convergencia más estable, pero más lenta, mientras que valores mayores generan correcciones más agresivas que pueden producir mesetas en el proceso iterativo. Por lo tanto, este parámetro debe tratarse como una variable de ajuste relevante dentro del método.
- ATHI reduce el número de iteraciones reales respecto de THI en todas las configuraciones estudiadas, pasando de 16 a 2 en el caso de 1 GDL, de 7 a 2 en la configuración de 10 GDL con una SE, y de 12 a 7 en la configuración con dos SE. La reducción es menor en el caso con dos interfaces, lo que muestra que la compatibilidad en la frontera se vuelve más exigente al aumentar el número de subestructuras experimentales.
- Al comparar los errores de drift, velocidad relativa y fuerza en los pisos de interfaz, ATHI no siempre entrega valores menores que THI. En algunos casos, los errores de ATHI son levemente mayores, aunque se mantienen cercanos a la respuesta de referencia. Por ello, el aporte principal del método está en disminuir la cantidad de iteraciones reales manteniendo una precisión global adecuada, más que en mejorar simultáneamente todas las respuestas evaluadas.
- En los casos lineales estudiados, la identificación mediante mínimos cuadrados fue suficiente para construir la planta virtual representativa y alcanzar la convergencia real con pocas iteraciones. Por esta razón, la implementación desarrollada en esta memoria no requirió incorporar la etapa de optimización TLPO considerada en la formulación original de ATHI.
- El filtro de Wiener regularizado, evaluado en el caso de 1 GDL, no entrega una mejora en relación con el método de identificación de sistemas basado en mínimos cuadrados (LS). Aunque el sistema identificado logra converger en el dominio virtual, el error RMS real se mantiene estancado en torno a 18.74 % y no cumple con la tolerancia exigida. Este resultado muestra que la convergencia del bucle virtual no garantiza la convergencia real del algoritmo, ya que la identificación de la dinámica del sistema resulta determinante para el desempeño del algoritmo ATHI.

Como trabajo futuro resulta pertinente evaluar los métodos en sistemas estructurales de mayor complejidad y con la adición de no linealidades, donde podría ser necesario incorporar la optimización de parámetros mediante TLPO. También se propone estudiar estrategias de ajuste adaptativo del parámetro λ y desarrollar criterios analíticos que permitan estimar valores de λ cercanos al equilibrio entre estabilidad y rapidez de convergencia.

8 Referencias

- Ahmadizadeh, M., Mosqueda, G., & Reinhorn, A. M. (2008). Compensation of actuator delay and dynamics for real-time hybrid structural simulation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37(1), 21–42. <https://doi.org/10.1002/eqe.743>
- Blakeborough, A., Williams, M. S., Darby, A. P., & Williams, D. M. (2001). The development of real-time substructure testing. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1786), 1869–1891. <https://doi.org/10.1098/rsta.2001.0877>
- Bonnet, P. A., Williams, M. S., & Blakeborough, A. (2007). Compensation of actuator dynamics in real-time hybrid tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 221(2), 251–264. <https://doi.org/10.1243/09596518JSCE301>
- Chae, Y., Kazemibidokhti, K., & Ricles, J. M. (2013). Adaptive time series compensator for delay compensation of servo-hydraulic actuator systems for real-time hybrid simulation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42(11), 1697–1715. <https://doi.org/10.1002/eqe.2294>
- Chen, C., Ricles, J. M., & Asce, M. (2008). *Development of Direct Integration Algorithms for Structural Dynamics Using Discrete Control Theory*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-93992008134:8676>
- Chen, C., Ricles, J. M., Marullo, T. M., & Mercan, O. (2009). Real-time hybrid testing using the unconditionally stable explicit CR integration algorithm. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(1), 23–44. <https://doi.org/10.1002/eqe.838>
- Christenson, R., Dyke, S., Zhang, J., Mosqueda, G., Chen, C., Nakata, N., Laplace, P., Song, W., Chae, Y., Marshall, G. A., Ou, G., Andres Riascos Gonzales, C., & Song, C. (2014). *Hybrid Simulation: A Discussion of Current Assessment Measures*.
- Dermitzakis, S. M. S. N. (1985). *COLLEGE OF ENGINEERING DEVELOPMENT OF SUBSTRUCTURING TECHNIQUES FOR ON-LINE COMPUTER CONTROLLED SEISMIC PERFORMANCE TESTING by Report to the National Science Foundation REPRODUCED BY*.
- Dogariu, L. M., Benesty, J., Paleologu, C., & Ciochină, S. (2021). An insightful overview of the wiener filter for system identification. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/app11177774>
- Fu, Y., Kasai, K., & Member, /. (1998). *COMPARATIVE STUDY OF FRAMES USING VISCOELASTIC AND VISCOUS DAMPERS*.
- Gui, Y., Wang, J. T., Jin, F., Chen, C., & Zhou, M. X. (2014). Development of a family of explicit algorithms for structural dynamics with unconditional stability. *Nonlinear Dynamics*, 77(4), 1157–1170. <https://doi.org/10.1007/s11071-014-1368-3>
- Guo, Y., & Pan, P. (2024). Accelerated time history iteration method for offline real-time hybrid testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 53(9), 2805–2826. <https://doi.org/10.1002/eqe.4133>
- Guo, Y., & Pan, P. (2025). Time History Iteration Method for Offline Real-Time Hybrid Testing Involving Multiple Experimental Substructures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. <https://doi.org/10.1002/eqe.70037>
- Guo, Y., Wang, H., & Pan, P. (2024). Time history iteration algorithm for offline real-time hybrid testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 53(1), 432–450. <https://doi.org/10.1002/eqe.4027>
- Hakuno, M., Shidawara, M., & Hara, T. (1969). DYNAMIC DESTRUCTIVE TEST OF A CANTILEVER BEAM, CONTROLLED BY AN ANALOG-COMPUTER. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 1969(171), 1–9. https://doi.org/10.2208/JSCEJ1969.1969.171_1

- Horiuchi, T., Inoue, M., Konno, T., & Namita, Y. (1999). Real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation and its application to a piping system with energy absorber. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(10), 1121–1141. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199910\)28:10<1121::AID-EQE858>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199910)28:10<1121::AID-EQE858>3.0.CO;2-O)
- McCrum, D. P., & Williams, M. S. (2016). An overview of seismic hybrid testing of engineering structures. En *Engineering Structures* (Vol. 118, pp. 240–261). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.039>
- Nakashima, M. (2020). Hybrid simulation: An early history. En *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (Vol. 49, Número 10, pp. 949–962). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/eqe.3274>
- Nakashima, M., & Masaoka, N. (1999). Real-time on-line test for MDOF systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(4), 393–420. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199904\)28:4<393::AID-EQE823>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199904)28:4<393::AID-EQE823>3.0.CO;2-C)
- Nakashima, M., & Takaoka, E. (1992). DEVELOPMENT OF REAL-TIME PSEUDO DYNAMIC TESTING. En *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS* (Vol. 21).
- Neild, S. A., Stoten, D. P., Drury, D., & Wagg, D. J. (2005). Control issues relating to real-time substructuring experiments using a shaking table. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(9), 1171–1192. <https://doi.org/10.1002/eqe.473>
- Phillips, B. M., & Spencer, B. F. (2013). Model-Based Feedforward-Feedback Actuator Control for Real-Time Hybrid Simulation. *Journal of Structural Engineering*, 139(7), 1205–1214. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000606](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000606)
- Shield, C. K., French, C. W., & Timm, J. (2001). Development and implementation of the effective force testing method for seismic simulation of large-scale structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1786), 1911–1929. <https://doi.org/10.1098/rsta.2001.0879>
- Silva, C. E., Gomez, D., Maghareh, A., Dyke, S. J., & Spencer, B. F. (2020). Benchmark control problem for real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106381>
- Takanashi, K., UDAGAWA, K., SEKI, M., OKADA, T., & TANAKA, H. (1975). NON-LINEAR EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF STRUCTURES BY A COMPUTER-ACTUATOR ON-LINE SYSTEM : Part 1 Detail of the System. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 229(0), 77-83,190. https://doi.org/10.3130/aijsaxx.229.0_77
- Wallace, M. I., Wagg, D. J., & Neild, S. A. (2005). An adaptive polynomial based forward prediction algorithm for multi-actuator Real-time dynamic substructuring. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 461(2064), 3807–3826. <https://doi.org/10.1098/rspa.2005.1532>
- Wu, B., Bao, H., Ou, J., & Tian, S. (2005). Stability and accuracy analysis of the central difference method for real-time substructure testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(7), 705–718. <https://doi.org/10.1002/eqe.451>
- Wu, B., Xu, G., Wang, Q., & Williams, M. S. (2006). Operator-splitting method for real-time substructure testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(3), 293–314. <https://doi.org/10.1002/eqe.519>