



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

IDENTIFICACIÓN EN MARCOS EQUIPADOS CON DIAGONALES DE
PANDEO RESTRINGIDO SOMETIDOS A DAÑO SÍSMICO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA SÍSMICA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JUAN MANUEL MARTÍNEZ PINTO

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
RODRIGO RETAMALES SAAVEDRA
VIVIANA MERUANE NARANJO

SANTIAGO DE CHILE
2018

IDENTIFICACIÓN EN MARCOS EQUIPADOS CON DIAGONALES DE PANDEO RESTRINGIDO SOMETIDO A DAÑO SÍSMICO.

Las diagonales de pandeo restringido son disipadores sísmicos compuestos por una diagonal de acero cubierta por un elemento restrictor que impide su pandeo, permitiendo que la histéresis asociada al elemento sea amplia, y con gran capacidad de disipar energía. Debido al elemento restrictor, no es posible hacer una inspección visual directa luego de un gran sismo, y toma importancia conocer los resultados de la identificación del sistema cuando las diagonales trabajan disipando energía.

Para ello, se evalúa la respuesta no lineal con un modelo Bouc-Wen calibrado para representar Diagonales de Pandeo Restringido, en un sistema de un grado de libertad, y en un marco diseñado con estos elementos. Se usan registros sísmicos y ruidos blanco como aceleración basal. Los resultados obtenidos se procesan con tres técnicas de identificación lineal ampliamente usadas: Espectro de Densidad de Potencia (PSD), Identificación en el SubEspacio Estocástico SSI-COV, y *Multivariable Output Error State Space* MOESP.

Los registros se aplican primeramente para que los sistemas trabajen en respuesta lineal, y luego cada excitación es amplificada para obtener la respuesta en tres niveles de incursión no lineal. Se analizan la respuesta en frecuencia, amortiguamiento y formas modales. En el sistema de un grado de libertad se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo, variando la rigidez post-fluencia de la histéresis y la suavidad de la curva en la transición a la fluencia. En el marco se realiza un análisis sobre el marco modelado con diagonales bilineales, y otro cuyas diagonales son modeladas con histéresis suavizada.

El resultado para ambos sistemas es que las técnicas de identificación detectan frecuencias cercanas a la elástica, que disminuyen a medida que se entra en el rango no lineal. El amortiguamiento aumenta con la incursión en el rango no lineal y presenta gran dispersión en su determinación, en especial para los primeros modos del marco analizado. El parámetro del modelo Bouc-Wen que más influye en los cambios es el que controla la transición a la fluencia y la suavidad de la histéresis. Para pequeñas no linealidades y una ley bilineal, la frecuencia permanece igual a la lineal y elástica. En el caso del marco, la primera forma modal identificada permanece sin grandes cambios, mientras que otras formas exhiben mayores grados de dispersión. De cualquier forma, visualmente siguen siendo reconocibles, aunque en algunos casos se acoplen con otras formas modales. Todas las técnicas de identificación arrojan resultados consistentes entre sí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que me han apoyado en este proceso. A mi familia, amigos, profesores, y compañeros. Sin este apoyo no hubiera sido posible terminar este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

Identificación en Marcos equipados con Diagonales de Pandeo Restringido sometido a daño sísmico.....	ii
Tabla de Contenido.....	iv
Índice de Ilustraciones.....	vi
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Símbolos.....	vi
1. Introducción.....	1
Organización del Trabajo.....	2
2. Descripción de Elementos y Procedimiento de Diseño.....	3
2.1 Diagonales de Pandeo Restringido.....	3
2.1.1 Componentes de la Diagonal de Pandeo Restringido.....	3
2.1.2 Historia del BRB.....	4
2.2 Diseño de Marcos equipados con Diagonales de Pandeo Restringido.....	5
2.2.1 Disposiciones especiales para el diseño de marcos equipados con diagonales de pandeo restringido. [8].....	6
2.2.2 Ensayos para validar Diagonales de Pandeo Restringido.....	6
3. Marco Teórico.....	8
3.1 Modelos Dinámicos de Respuesta en tiempo.....	8
3.1.1 Modelo Espacio Estado.....	8
Descomposición modal de la matriz de estado.....	9
Relación entre modos de Matriz de Estado Continua y Discreta.....	9
3.1.2 Modelo Bouc Wen.....	10
Ley Constitutiva.....	10
Reseña sobre funcionamiento de las ecuaciones.....	10
Variantes de histéresis con el modelo bouc-wen.....	12
3.1.3 Sistema Lineal equivalente.....	14
Energía disipada en un sistema de 1 GDL en resonancia [9].....	15
Amortiguamiento lineal Equivalente [9].....	15
3.1.4 Descomposiciones Matriciales.....	16
Descomposición en Valores Singulares (SVD).....	16
Descomposición QR.....	17

Descomposición LQ	17
3.2 Identificación de Estructuras	17
3.2.1 Selección de máximos en espectro de potencia (PSD)	18
Demostración Matemática	18
PSD con transformada rápida de fourier.....	19
3.2.2 Identificación paramétrica en el Subespacio Estocástico (SSI-COV).	21
3.2.3 Identificación paramétrica en el Subespacio Estocástico para excitaciones no estacionarias (MOESP)	23
3.2.4 Diagrama de Estabilización y Algoritmo FMO	24
3.2.5 Selección automática de modos en diagramas de estabilización	26
4. Identificación sobre sistema de 1 grado de libertad	29
4.1 Procedimiento.....	29
4.2 Identificación con P.S.D.....	31
Caso 1: Sistema Elastoplástico incursionando en el rango No-Lineal.....	31
Caso 2: Aumento de la Rigidez Post-Fluencia.....	35
Caso 3: Suavización en transición a la fluencia.	39
Caso 4: Identificación sobre pulso	48
4.3 Identificación con SSI-COV	50
Caso 1: Sistema Elastoplástico incursionando en el rango No-Lineal.....	50
Caso 2: Aumento de la rigidez Post-fluencia.	52
Caso 3: Suavización en transición a la fluencia.	56
4.4 Identificación con MOESP.....	62
Caso 1: Sistema Elastoplástico incursionando en el rango No-Lineal.....	62
Caso 2: Aumento de la rigidez Post-fluencia.	65
Caso 3: Suavización en transición a la fluencia.	69
Caso 4: Análisis por ventana de caso	75
Caso 5: Segunda frecuencia identificada.	77
5. Análisis sobre Marco Arriostrado con Diagonales de Pandeo restringido	80
5.1 Modelo del Marco Arriostrado con Diagonales de Pandeo Restringido (BRBF) 80	
5.1.1 Geometría de la estructura.....	80
5.1.2 Cargas Sobre estructura.....	82
5.1.3 Características Sísmicas de la estructura.....	83

5.1.4	Propiedades Modales.....	83
5.1.5	Amortiguamiento de la Estructura	88
5.1.6	Ortogonalidad de Modos.....	89
5.1.7	Respuesta histerética del Marco.....	89
5.2	Identificación sobre Marco Arriostrado con Diagonales de pandeo restringido.....	90
5.3	Resultados identificación.	93
5.3.1	Resultados P.S.D.....	93
	Caso 1: Simil bilineal.....	94
	Caso 2: Histéresis suavizada.....	97
	Resumen PSD	102
5.3.2	Resultados SSI-COV	103
	Caso 1: Simil Bilineal	104
	Caso 2: Histéresis Suavizada	124
5.3.3	Resultados MOESP	139
	Caso 1: Simil Bilineal	141
	Caso 2: Histéresis Suavizada	161
6.	Análisis de Resultados.....	176
6.1	Identificación sobre oscilador de 1 G.D.L.	176
6.2	Identificación con SSI-COV	176
6.3	Identificación con MOESP.....	176
6.4	Identificación con PSD en el BRBF.....	177
6.5	Identificación con SSI-COV en el BRBF	177
6.6	Identificación con Moesp en el BRBF	179
6.7	Comentarios Generales	180
	Bibliografía.....	183

1. INTRODUCCIÓN

Las Diagonales de Pandeo Restringido, o BRB, por su denominación en inglés *Buckling Restrained Braces*, son disipadores sísmicos que se están usando en países con experiencia sísmica y alta investigación como Japón, Nueva Zelanda, y Estados Unidos, debido a su gran capacidad de disipar energía y buenos resultados experimentados en grandes sismos.

Consisten en diagonales de acero recubiertas con un encasillamiento que impide el pandeo en compresión, compuesto por un perfil cerrado de acero relleno de hormigón, separado de la diagonal por una goma antiadherente. Gracias a que se garantiza un comportamiento sin pandeo en el ciclo de deformaciones, el elemento entra en fluencia tanto en tracción como en compresión obteniendo una histéresis amplia, estable, y capaz de disipar una gran cantidad de energía gracias a las grandes dimensiones del elemento.

El problema surge al momento de inspeccionar las diagonales luego de un gran sismo. Debido a que el acero dañado está recubierto por el elemento restrictor al pandeo, es imposible visualizar directamente daños, si son leves o graves, o si indeseadamente hubo fractura durante el sismo; en definitiva, si hay que reemplazar el elemento por uno nuevo.

Se propone para solucionar este problema la inspección indirecta mediante el registro de aceleraciones durante un sismo de grandes proporciones, investigar si las técnicas lineales de identificación usadas habitualmente son capaces de detectar daños en los elementos. Las técnicas probadas son la identificación no paramétrica sobre la selección de *peaks* en el espectro de potencia, conocida como PSD [1] la Identificación Paramétrica en el Subespacio Estocástico SSI-COV [2], y su variante para excitaciones conocidas MOESP [3].

La investigación se hace sobre modelos teóricos generados a partir de registros de terremotos en territorio nacional. Se realiza primeramente modelos histeréticos de un grado de libertad (GDL) sobre un oscilador del tipo Bouc-Wen (Wen, 1976), considerado distintos grados de daño sobre el elemento y realizando un análisis de sensibilidad respecto a sus parámetros. Se pretende ver cómo varía la rigidez equivalente identificada, que en primera intuición debiera ser igual a la secante sobre la máxima deformación, y en amortiguamiento equivalente.

A continuación, se realiza la identificación sobre una estructura plana tipo marco equipado con diagonales de Pandeo Restringido, diseñado de acuerdo a las normas chilenas y estadounidenses pertinentes. Se pretende analizar las variaciones en los modos detectados, tanto en su periodo, amortiguamiento y forma, y ver si esto es concluyente para detectar daño sobre una diagonal o sobre un grupo de ellas, por ejemplo, las que están en un mismo nivel. El marco usado corresponde a un silo minero ya construido en el norte de nuestro país, el cual es rediseñado para incorporar los elementos de estudio. Con ellos se busca averiguar profundizar la identificación sobre elementos no lineales y establecer qué se lee cuando se realiza una identificación lineal sobre un movimiento con componentes no lineales; avanzar en el campo de la investigación de daño de estructuras sometidas a grandes sismos; y contribuir al uso de estructuras con un mejor diseño sísmico en

nuestro país, al poner a prueba maneras de detectar daños en estructuras equipadas con diagonales de pandeo restringido.

ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

En el capítulo 2 de la tesis se detalla sobre el elemento de estudio, su historia y aplicaciones. A continuación, en el capítulo 3, se desarrolla el marco teórico de los modelos lineal y no lineal utilizados para obtener la respuesta del sistema. También se incluye la descripción de las técnicas de identificación lineales usadas.

En el capítulo 4 se encuentra la descripción del modelo de 1 de libertad analizado, los registros de aceleración que solicitan, y cómo varían los parámetros que definen al sistema no lineal. Se exponen también los resultados que arrojan las técnicas de identificación. En el capítulo siguiente, n°5, se describe el marco a analizar, y sus principales características dinámicas, y se exponen los resultados de la identificación sobre él. Finalmente, en el capítulo 6, se desarrolla el análisis de los resultados y sus conclusiones.

Se adjunta dos anexos, el primero con el detalle del rediseño del marco utilizado en el capítulo 5, y el segundo con las tablas completas que describen los resultados de la identificación hecha en el mismo capítulo mencionado.

2. DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS Y PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

2.1 DIAGONALES DE PANDEO RESTRINGIDO

Las Diagonales de Pandeo Restringido son disipadores de energía compuestos por una diagonal de acero diseñada para poder fluir en tracción y compresión, recubiertas por un elemento restrictor de acero y hormigón que impide el pandeo en compresión, de manera que la histéresis formada en un sismo de grandes proporciones sea amplia, y encierre una gran cantidad de energía. La representación gráfica de esta idea la muestra la Figura 1, diferenciando el comportamiento de una diagonal pandeable (a), con el de uno de pandeo restringido (b).

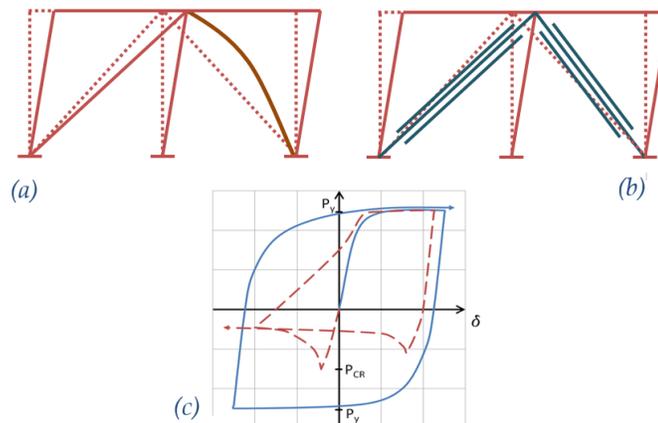


FIGURA 1: ESQUEMA DE HISTÉRESIS DE LA DIAGONAL DE PANDEO RESTRINGIDO. (A) DIAGONAL PANDEADA, (B) DIAGONAL CON RESTRICCIÓN AL PANDEO, (C) HISTÉRESIS DE AMBAS DIAGONALES, EN LÍNEAS SEGMENTADAS LA QUE CORRESPONDE AL MARCO A Y EN CONTÍNUA LA QUE CORRESPONDE AL MARCO B. (REFERENCIA: WWW.HERA.ORG.NZ).

El propósito detrás del diseño de estos elementos es sacar un mejor provecho de la ductilidad del acero concentrando los daños en ellos y disipando energía sísmica, reduciendo de esta manera la demanda sobre el resto de la estructura.

2.1.1 COMPONENTES DE LA DIAGONAL DE PANDEO RESTRINGIDO.

Las diagonales de pandeo restringido (BRB) se componen de un elemento de acero, que tiene la responsabilidad de resistir las cargas axiales, y un elemento restrictor, que tiene la responsabilidad de impedir el pandeo en compresión del primero. Además, en la interfaz de ambos elementos se introduce una capa deslizante que impide que el segundo elemento tome cargas axiales.

A su vez, el elemento de acero se puede subdividir en tres partes como se muestra en la Figura 2: La parte A que corresponde a la unión con la placa de conexión; la parte C que corresponde al núcleo, que es la que entrará en fluencia; y la zona B de transición. Las partes B y C estarán recubiertas por el elemento restrictor. Éste, por su parte, se compone comúnmente de una sección de hormigón que recubre al núcleo siguiendo su forma y de un encasillamiento externo de acero (Figura 3).

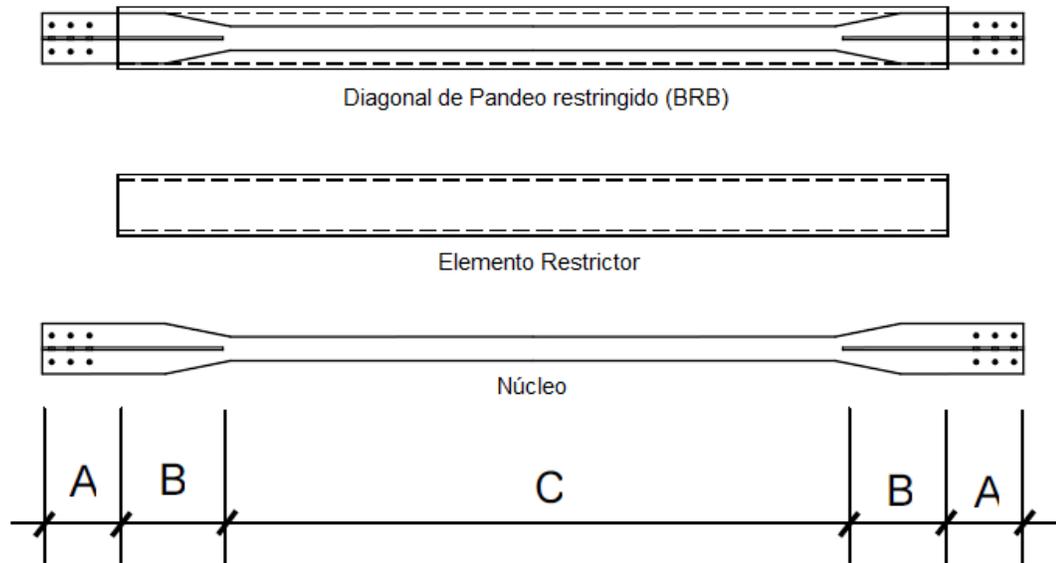


FIGURA 2: PARTES QUE COMPONENE LA DIAGONAL DE PANDEO RESTRINGIDO. (REFERENCIA: THE NORTH AMERICAN STEEL CONSTRUCTION CONFERENCE, NASCC, POR LA AISC) [4]

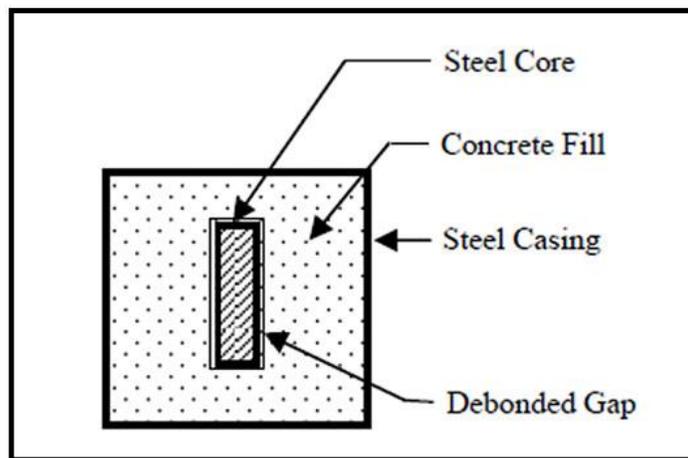


FIGURA 3: SECCIÓN TRANSVERSAL DEL BRB. NÚCLEO DE ACERO QUE TOMA CARGAS AXIALES (STEEL CORE), RELLENO DE HORMIGÓN (CONCRETE FILL), ENCASILLAMIENTO DE ACERO EXTERNO (STEEL CASING), Y CAPA DESLIZANTE ENTRE NÚCLEO DE ACERO Y HORMIGÓN (DEBONDED GAP). [5]

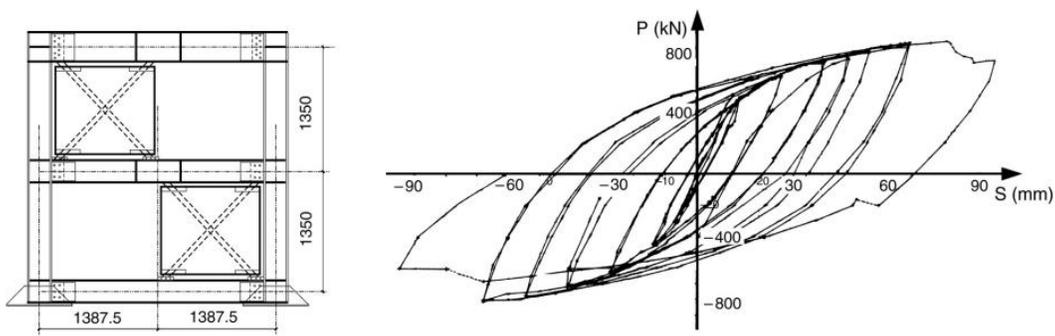
2.1.2 HISTORIA DEL BRB

Las Diagonales de Pandeo Restringido nacieron en Japón a partir de la idea sacarle el máximo provecho a una diagonal de acero, restringiendo su pandeo en compresión a partir elementos que sirvieran de tope y permitieran alcanzar la fluencia del mismo.

El primer elemento restringido al pandeo nació en 1971 [6], y no fue una diagonal propiamente tal, sino un muro plano de acero restringido por otro par de muros de hormigón dispuestos a cada lado de éste.

A partir de esta idea, se probaron unos años más tarde diagonales de acero de sección rectangular encerradas por los mismos muros. Este experimento incluyó diagonales simples, dispuestas en forma de X, la prueba de un marco de dos niveles, así como la prueba de distintos materiales

antideslizantes entre el elemento mismo y los restrictores de pandeo. Los resultados arrojaron una histéresis estable, con endurecimiento cíclico, y la necesidad de usar un elemento antideslizante para lograr mejor comportamiento.



[6]

FIGURA 4: EXPERIMENTO DIAGONAL DE ACERO RESTRINGIDA AL PANDEO POR MUROS DE HORMIGÓN, EJECUTADO EN 1973 WAKABAYASHI ET AL. (IZQ) ESQUEMA MARCO, (DER) RESPUESTA EN HISTÉRESIS. (REF: [6])

La primera diagonal al pandeo restringido con un tubo de acero relleno de hormigón que envuelve a la diagonal misma como elemento restrictor, fue experimentada en 1976 en el mismo Japón [6]. El comportamiento fue el esperado si bien no se ocupó en ese entonces la capa antideslizante. Investigaciones posteriores establecieron la necesidad del uso de la misma, sus materiales ideales, especificaciones sobre el elemento restrictor para asegurar que este efectivamente restringiera el pandeo del elemento, así como cuidados sobre las conexiones y otros aspectos del BRB.

En la década de los ochenta se tomó interés por este sistema apuntando a su comercialización por parte de una compañía. La primera estructura en equiparse con estos elementos fue construida en Japón en 1988. Luego del terremoto de Kobe en 1995, las diagonales de pandeo restringido mostraron un buen comportamiento y se masificó su uso en ese mismo país. En el año 2000 se hicieron los primeros experimentos en California, EEUU. En el año 2003 el uso de los elementos fue regularizado en el código FEMA450, y luego fueron incorporados en el estandar del AISC341 en su versión del 2005, y también en la del 2010.

2.2 DISEÑO DE MARCOS EQUIPADOS CON DIAGONALES DE PANDEO RESTRINGIDO.

El diseño de los marcos equipados con diagonales de pandeo restringido (BRBF), está enfocado en proveer a la estructura de capacidad de disipación de energía sísmica a través de la fluencia sin pandeo de sus diagonales, mientras que el marco quede idealmente elástico.

Para ello, las diagonales serán idealmente BRB, diseñadas de tal manera que ante un sismo de diseño fluyan en tracción y compresión sin sufrir pandeo local ni global, mientras que los otros elementos del marco sean capaces de resistir el sismo soportando las cargas estáticas probables y las sísmicas.

Para ello la norma estadounidense AISC 341 – 10 aborda disposiciones especiales que deben ser cumplidas en el momento del diseño de la estructura, además de test que deben cumplir los BRB para ser admitidos como tales.

El sismo de diseño y la combinación con las otras cargas en la estructura deben tomarse según la norma local vigente. Para el caso de estructuras industriales rige la “NCh2369”, y debe diseñarse para una estructura equivalente sin BRB y verificada como un análisis no lineal adecuado.

2.2.1 DISPOSICIONES ESPECIALES PARA EL DISEÑO DE MARCOS EQUIPADOS CON DIAGONALES DE PANDEO RESTRINGIDO. [7]

- El diseño del núcleo del BRB se hará considerando una resistencia de diseño $\phi P_{y_{sc}}$ (LRFD), siendo $P_{y_{sc}}$ la resistencia nominal del elemento tomando en cuenta la sección transversal del núcleo del elemento, y ϕ el factor de reducción de la resistencia.
- Las demás componentes de la diagonal, deben ser diseñadas para resistir la resistencia ajustada de diseño igual a fluencia probable del elemento, o *adjusted brace strength*, P_{ad}

$$P_{ad} = \begin{cases} \beta \omega R_y P_{y_{sc}} & \text{en compresión} \\ \omega R_y P_{y_{sc}} & \text{en tracción} \end{cases} \quad (1)$$

Siendo R_y la razón entre la fluencia esperada y la nominal del acero, ω el factor de ajuste por endurecimiento, β el factor de ajuste para el esfuerzo en compresión.

En base a este esfuerzo debe evitarse las fallas por tensión última en el núcleo de acero, así como pandeo en cualquier zona de la diagonal, o en el elemento restrictor.

- En base a una deformación de entrepiso equivalente a 1.5 veces la deformación de diseño, se debe evitar el daño y pandeo en compresión del BRB en cualquiera de sus partes.
- Las vigas deben ser capaces de resistir cargas que provengan de la fluencia simultánea de los BRB, considerando que estas pueden desarrollar la resistencia ajustada (1). En configuraciones de V, o V invertida se hace especialmente importante chequear el pandeo, y eventualmente disponer de restricciones al pandeo fuera del plano del marco restringiendo el desplazamiento perpendicular al plano en el punto de intersección de las diagonales.
- Las columnas deben ser capaces de resistir las solicitaciones sísmicas incluyendo la sobrerresistencia de las diagonales definida en la ecuación (1). No necesitan ser mayores a lo que arroje un análisis no lineal consistente.

2.2.2 ENSAYOS PARA VALIDAR DIAGONALES DE PANDEO RESTRINGIDO.

El fabricante de diagonales de pandeo restringido debe certificarse de la idoneidad de su producto a través de ensayos hechos a cada tipo de diagonal, o respaldar su diseño con ensayos anteriores. Estos consisten en cargar cíclicamente el elemento de manera que se produzcan deformaciones axiales en su núcleo y rotacionales a nivel de las conexiones, y certificar empíricamente que ante estas solicitaciones no se compromete el desempeño del BRB.

Las exigencias del ensayo se detallan en el capítulo K3 de la norma AISC-341-10 [7]

En el primer ensayo, el de comportamiento global del elemento, se toma como parámetro de control Δ_b la deformación axial del elemento y se registra su fuerza axial.

En el segundo ensayo, relativo a las componentes de sujeción a nivel de subsistema, se toma como parámetro de control Δ_b , la deformación rotacional a nivel de las conexiones. Busca testear la fortaleza de las mismas para que un pandeo en ellas no perjudique la capacidad de disipación de energía del elemento.

Cabe destacar que para este último ensayo no está explícitamente definido cómo se combinará la carga axial con el momento en los extremos, ya que a priori no se conoce cómo se combinarán estas cantidades durante el sismo. Una combinación sugerida en la norma es mantener una rotación constante a su máximo valor esperado y variar la carga axial, lo que es una opción práctica para ciertos equipos.

Para cada uno de estos tipos de ensayo se generan una secuencia de carga que se deberá seguir en ambos test. La secuencia se detalla a continuación:

- 2 ciclos de carga a la deformación $\Delta_b = \Delta_{by}$
- 2 ciclos de carga a la deformación $\Delta_b = 0.5 \Delta_{bm}$
- 2 ciclos de carga a la deformación $\Delta_b = \Delta_{bm}$
- 2 ciclos de carga a la deformación $\Delta_b = 1.5 \Delta_{bm}$
- 2 ciclos de carga a la deformación $\Delta_b = 2 \Delta_{bm}$
- Sucesivos ciclos de carga a la deformación $\Delta_b = 1.5 \Delta_{bm}$, hasta completar una deformación inelástica acumulada de al menos $200 \Delta_{by}$. (no necesaria para el ensayo de las componentes de sujeción).

Siendo Δ_{by} la deformación de control del elemento en la primera fluencia significativa visualizada en el ensayo mismo, y Δ_{bm} la deformación de diseño del elemento correspondiente a la deformación de diseño del edificio. Esta última cantidad no debe ser menor a la correspondiente a una deriva de entre piso de 0.01.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 MODELOS DINÁMICOS DE RESPUESTA EN TIEMPO.

Tanto para la modelación de estructuras y obtención de respuestas, como para trabajar en identificación de sistemas, es necesario describir los modelos con los cuales, a partir de la excitación, se obtiene la respuesta de una estructura en desplazamiento, velocidad y aceleración de sus grados de libertad, y fuerzas en los elementos que la componen.

Se describirá entonces, el modelo Espacio-Estado, sobre el cual se basa la teoría de las técnicas paramétricas de identificación de sistemas a utilizar, y el modelo de ley constitutiva no lineal Bouc-Wen, usado para obtener las respuestas no lineales requeridas y su método de integración para 1 grado de libertad (GDL).

3.1.1 MODELO ESPACIO ESTADO.

El modelo espacio estado es una reorganización de la ecuación de equilibrio dinámico (2), que permite reducir el orden de la ecuación diferencial de dos, a uno: (3)

$$[M]\{\ddot{v}(t)\} + [C]\{\dot{v}(t)\} + [K]\{v(t)\} = [B_p]\{u(t)\} \quad (2)$$

$$\{\dot{x}(t)\} = [A_c]\{x(t)\} + [B_c]\{u(t)\} \quad (3)$$

Siendo

$$x(t) = \begin{Bmatrix} v(t) \\ \dot{v}(t) \end{Bmatrix} \quad A_c = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} [0] \\ -[M]^{-1}[B_p] \end{bmatrix} \quad (4)$$

Esto permite resolver problemas prácticos de manera más sencilla. En particular, es posible realizar una modificación a las matrices $[A_c]$ y $[B_c]$ de manera de trabajar con señales discretas y obtener de manera iterativa la respuesta de un sistema (35), tan solo conociendo el estado inicial de un sistema x_0 , directo de v_0 y \dot{v}_0 con: (4)

$$\{x_{k+1}\} = [A]\{x_k\} + [B]\{u_k\} \quad (5)$$

Siendo

$$[A] = e^{[A_c]\Delta t} \quad [B] = [A_c]^{-1}[[A] - [I]][B_c] \quad (6)$$

A la matriz $[A_c]$ y $[A]$ se les llama Matriz de Estado Continua, y Matriz de Estado Discreta de un sistema lineal, respectivamente.

Por otro lado, es posible capturar la respuesta de un sistema y a través de este modelo obtener las relaciones matriciales entre ellas. Para ello se define el vector $y(t)$ que recoge el tiempo, velocidad o aceleración del sistema en l sensores (7), relacionándose con la respuesta y la aceleración externa a través de la ecuación (8) en continuo o (9) en discreto, siguiendo [8]

$$\{y(t)\} = [C_a]\{\ddot{v}(t)\} + [C_v]\{\dot{v}(t)\} + [C_u]\{v(t)\} \quad (7)$$

$$\{y(t)\} = [C_d]\{x(t)\} + [D_d]\{u(t)\} \quad (8)$$

$$\{y_k\} = [C_d]\{x_k\} + [D_d]\{u_k\} \quad (9)$$

Siendo $[C_a]$, $[C_v]$, y $[C_u]$ matrices binarias de 1 y 0, y $[C_d]$ y $[D_d]$

$$[C_d] = [[C_u] - [C_a][M]^{-1}[K] \quad [C_v] - [C_a][M]^{-1}[C]], \quad [D_d] = [C_a][M]^{-1}[B_p] \quad (10)$$

Las ecuaciones matrices (6) y (9) son especialmente importantes para las técnicas de identificación paramétricas, profundizadas en los puntos 3.2.2 y 3.2.3.

DESCOMPOSICIÓN MODAL DE LA MATRIZ DE ESTADO.

La Matriz de estado $[A_c]$ se construye a partir de las matrices $[M]$, $[C]$, y $[K]$, (4) y por lo tanto contiene la información del sistema. En particular, los valores y vectores propios de $[A_c]$ tienen relación con los valores y vectores propios del sistema.

Al descomponer la matriz $[A_c]$:

$$[A_c] = [\Psi][\Lambda][\Psi]^{-1} \quad (11)$$

Siendo $[\Psi]$ la matriz que contiene los vectores propios y $[\Lambda]$ los valores en su diagonal:

$$[\Psi] = [\{\Psi_1\} \quad \dots \quad \{\Psi_{2N}\}] \quad [\Lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{2N} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Se obtiene que cada vector $\{\Psi_i\}$ estará compuesto por los vectores propios del sistema $\{\Phi_i\}$ y cada valor λ_i por los valores propios del sistema ω_i y su amortiguamiento β_i (13). Los valores propios obtenidos serán complejos, y habrá N pares conjugados uno por cada modo. Así mismo, habrá dos vectores propios por modo.

$$\{\Psi_i\} = \begin{bmatrix} \{\Phi_i\} \\ \lambda_i \{\Phi_i\} \end{bmatrix} \quad \lambda_{i,i+1} = -\omega_i \beta_i \pm i \omega_i \sqrt{1 - \beta_i^2} \quad (13)$$

La Ecuación (14) representa la forma inversa, es decir, cómo obtener el amortiguamiento y frecuencias a partir del análisis modal de $[A_c]$. Para obtener las formas modales $\{\Phi_i\}$ basta con tomar valor absoluto de las primeras N filas de $[\Psi]$ y eliminar los vectores repetidos.

$$\omega_i = \sqrt{\lambda_i \lambda_{i+1}} \quad \beta_i = -\frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2\sqrt{\lambda_i \lambda_{i+1}}} \quad (14)$$

RELACIÓN ENTRE MODOS DE MATRIZ DE ESTADO CONTINUA Y DISCRETA.

Si se resuelve el problema de valores y vectores propios sobre la Matriz de Estado Discreta $[A]$ y no sobre la continua $[A_c]$, entonces habrá un escalamiento de los valores propios, y los vectores propios se conservarán. Esto gracias a la propiedad de expansión de la exponencial de una matriz diagonal, y la definición de $[A]$ en ecuación (4). Con ellos, la descomposición modal de $[A]$ queda: [8],

$$[A] = e^{[A_c]\Delta t} = [\Psi]e^{[\Lambda]\Delta t} [\Psi]^{-1} \quad (15)$$

Con lo cual, si μ_i es un valor propio de $[A]$, entonces se relaciona con λ_i , el valor propio de $[A_c]$, según:

$$\mu_i = e^{\lambda_i \Delta t} \quad (16)$$

3.1.2 MODELO BOUC WEN

El modelo Bouc-Wen es ampliamente utilizado para representar sistemas histeréticos no lineales. Se usará para representar el comportamiento del BRB.

Su funcionamiento se basa en considerar una variable adicional, el desplazamiento histerético, que permite capturar los cambios de rigidez en el tiempo. El comportamiento de esta variable queda establecido por una ecuación diferencial de primer orden que debe ser considerada junto a las ecuaciones de equilibrio.

LEY CONSTITUTIVA

La fuerza restitutiva $F_s(t)$ del sistema, que reemplaza al término $[K]v(t)$ en la ecuación de equilibrio dinámico (2), queda gobernada por las ecuaciones: [9]

$$F_s(t) = k_{post} k_e v(t) + (1 - k_{post}) k_e z(t), \quad (17)$$

$$\dot{z}(t) = \dot{v}(t) (A - (\beta \text{sign}(z(t)\dot{v}(t)) + \gamma) |z(t)|^n) \quad (18)$$

Siendo $v(t)$ el desplazamiento, k_e la rigidez inicial, k_{post} la razón rigidez post y pre fluencia, y $z(t)$ la variable adicional, el desplazamiento histerético, que depende de la ecuación diferencial de primer orden (18). A su vez, esta ecuación diferencial contiene los parámetros adimensionales A, β, γ y n con los cuales es posible darle la forma a la histéresis.

Una de las formas histeréticas posibles es la bi-lineal. Para ello se ajustan los parámetros A, β y γ según (19), de manera que la ecuación (18) se transforme en:

$$A = 1, \quad \beta = \gamma = \frac{1}{2 v_y^n} \quad (19)$$

$$\dot{z}(t) = \dot{v}(t) \left(1 - \frac{1}{2} \left| \frac{z(t)}{v_y} \right|^n (\text{sign}(z(t)\dot{v}(t)) + 1) \right) \quad (20)$$

Siendo v_y la deformación de fluencia del sistema, y n un parámetro a elección con el cual es posible controlar la suavidad de la curva al momento de pasar por el punto de fluencia. Si éste es bajo ($n < 5$), se obtendrá una transición suave, si es alto ($n > 20$), una súbita que se asemeja a la bi-lineal perfecta.

RESEÑA SOBRE FUNCIONAMIENTO DE LAS ECUACIONES.

Para describir el funcionamiento de las ecuaciones, asumiremos un valor grande en el parámetro n . Matemáticamente asumimos $n \rightarrow \infty$.

- i. Se parte con $z(0) = v(0) = 0$ y se cumple condición $|z(t)| < v_y$. Mientras esto ocurra $\left|\frac{z(t)}{v_y}\right|^n \rightarrow 0$ y $\dot{z}(t) = \dot{v}(t)$. Lo anterior implica $z(t) = v(t)$, condición que al imponerla en la expresión (17) resulta el sistema lineal y elástico de la ecuación (21).

$$F_s(t) = k_e v(t) \quad (21)$$

- ii. Cuando el sistema llega a la fluencia, es decir se llega al punto A de la Figura 5 se cumple condición $u(t) = z(t) = v_y$ y también $sign(z(t)\dot{v}(t)) = 1$. Lo anterior implica que $\left|\frac{z(t)}{v_y}\right|^n \rightarrow 1$ y por (20) $\dot{z}(t) = 0$. Esto quiere decir que $z(t) = v_y$, igualdad que al reemplazar la en la ecuación (17) resulta en la ecuación (22), que corresponde a la fase de fluencia.

$$F_s(t) = k_e v_y + k_{post} k_e (v - v_y) \quad (22)$$

Dicha condición se cumplirá mientras no haya cambio signo en la velocidad.

- iii. Cuando ocurre el cambio de signo en la velocidad (punto B de Figura 5), $sign(z(t)\dot{v}(t)) = -1$ y la ecuación (20) impone $\dot{z}(t) = \dot{v}(t)$. Con dicha igualdad se cumple ahora $z(t) = v(t) + cte$, y la ecuación (17) da como resultado la ecuación (23)

$$F_s(t) = k_e (v(t) - v^*) \quad (23)$$

Es demostrable que v^* corresponde a la deformación del punto de intersección de la recta BC de la Figura 5(c) con el eje horizontal. Lo anterior implica un comportamiento elástico en torno a otro punto de equilibrio.

Este comportamiento se mantendrá mientras $|z(t)| < v$, condición que se rompe si $v(t) = v_{max}$ o $u(t) = v_{max} - 2v_y$, siendo v_{max} la deformación máxima alcanzada en ii (pto B de la Figura 5).

Luego de esto se vuelve a las condiciones de ii, es decir de un oscilador en fluencia. En el caso de la Figura 5, la condición se viola en el punto C, donde $z(t) = -v_y$ y se pasa a tener fluencia en la dirección negativa, únicamente cambia el signo de v_y en la ecuación (22).

Se estará en fase de fluencia hasta que las condiciones del punto ii se rompan, es decir, hasta que haya un cambio de signo en la velocidad. Luego de esto, se volvería a las condiciones del punto iii.

Se entiende entonces que se estará alternando entre las condiciones $\dot{z}(t) = \dot{v}(t)$ del punto iii y $z(t) = \pm v_y$ del punto ii, que implican rigidez k_e y rigidez $k_{post} \cdot k_e$, respectivamente, replicando correctamente la histéresis bi-lineal.

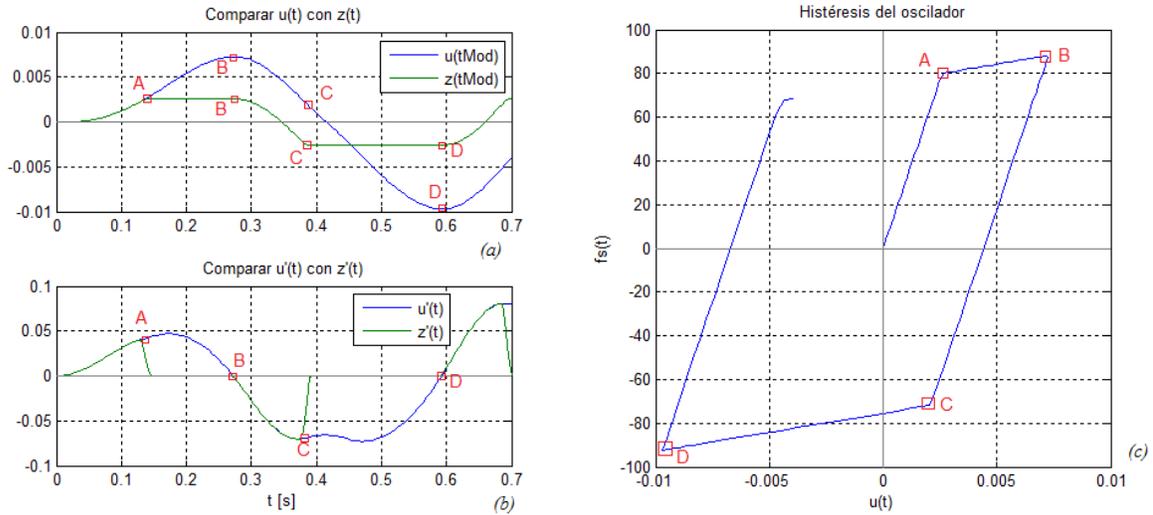


FIGURA 5: ESQUEMA DE HISTÉRESIS TIPO BOUC-WEN

Notar que el análisis hecho de los puntos anteriores asume $n \rightarrow \infty$ y por tanto es válido para un valor de n grande. Si se toman valores menores, el comportamiento no cambia significativamente, únicamente se tendrá una mayor suavidad en la curva en torno a los puntos de fluencia, pues la caída de velocidad de $\dot{z}(t) = \dot{v}(t)$ a $\dot{z}(t) = 0$ se hará gradualmente, tal como lo muestra la Figura 6, en que $n = 5$. Notar que en esta figura que $\dot{z}(t)$ decae suavemente a 0 en los puntos A y C, e igualmente se mantiene la igualdad entre $\dot{z}(t) = \dot{u}(t)$ en las fases elásticas, es decir, antes de A, entre B y C, y después de D.

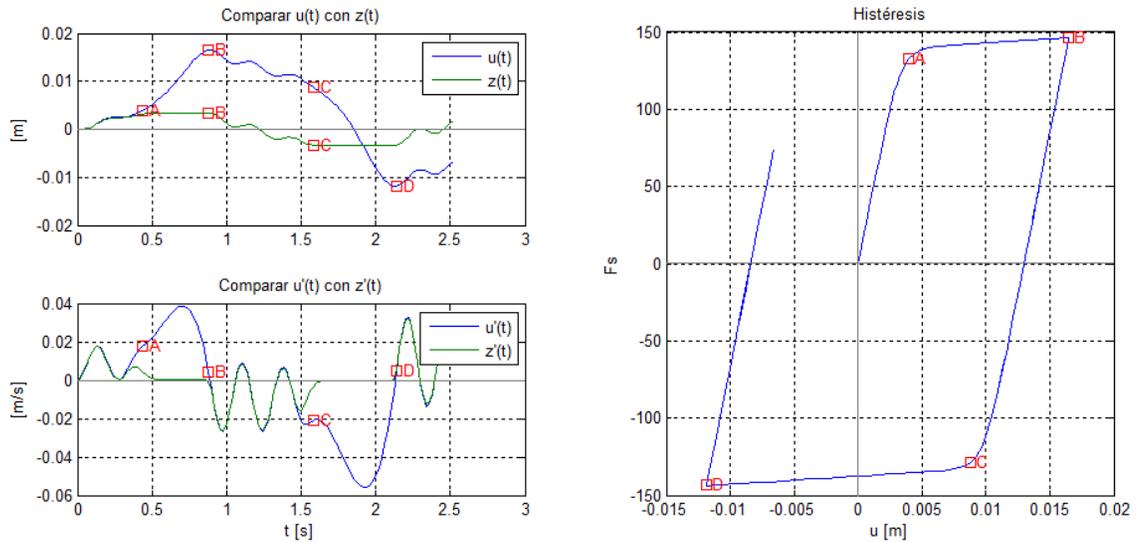


FIGURA 6: ESQUEMA HISTÉRESIS TIPO BOUC WEN PARA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA SUAVIZADA.

VARIANTES DE HISTÉRESIS CON EL MODELO BOUC-WEN

Es posible encontrar otros tipos de histéresis más allá de la bi-lineal, variando la forma de los parámetros A , β y γ , introduciendo rigidización o flexibilización del sistema en distintos puntos de la histéresis.

Usando las ecuación (17) y (18), podemos encontrar una expresión para la rigidez tangente instantánea del sistema, $k_T(t)$. La fluencia quedará definida en términos de estos mismos tres parámetros, tal como lo muestra la ecuación (25), válida si $\beta + \gamma > 0$. La rigidez inicial quedará expresada como lo indica la ecuación (26), la que toma el valor k_e si $A = 1$. La rigidez post fluencia será $k_Y = a k_e$ si $\beta + \gamma > 0$, independiente del valor de A .

$$k_T(t) = \frac{dFs}{du}(t) = \frac{dFs}{dt} \left(\frac{du}{dt} \right)^{-1} \quad (24)$$

$$= ak_e + (1 - a)k_e(A - (\beta \text{sign}(z(t)\dot{u}(t)) + \gamma)|z(t)|^n)$$

$$u_y = \frac{1}{A} \sqrt[n]{\frac{A}{\beta + \gamma}} \quad (25)$$

$$k_{inicial} = k_e(a + (1 - a)A) \quad (26)$$

La Figura 7 muestra distintos casos de histéresis que se obtienen con distintos valores de β y γ , y asumiendo el parámetro $A = 1$. Cabe destacar que esta última imposición no limita ninguna forma de histéresis, dado que es posible tratar este parámetro como redundante [10].

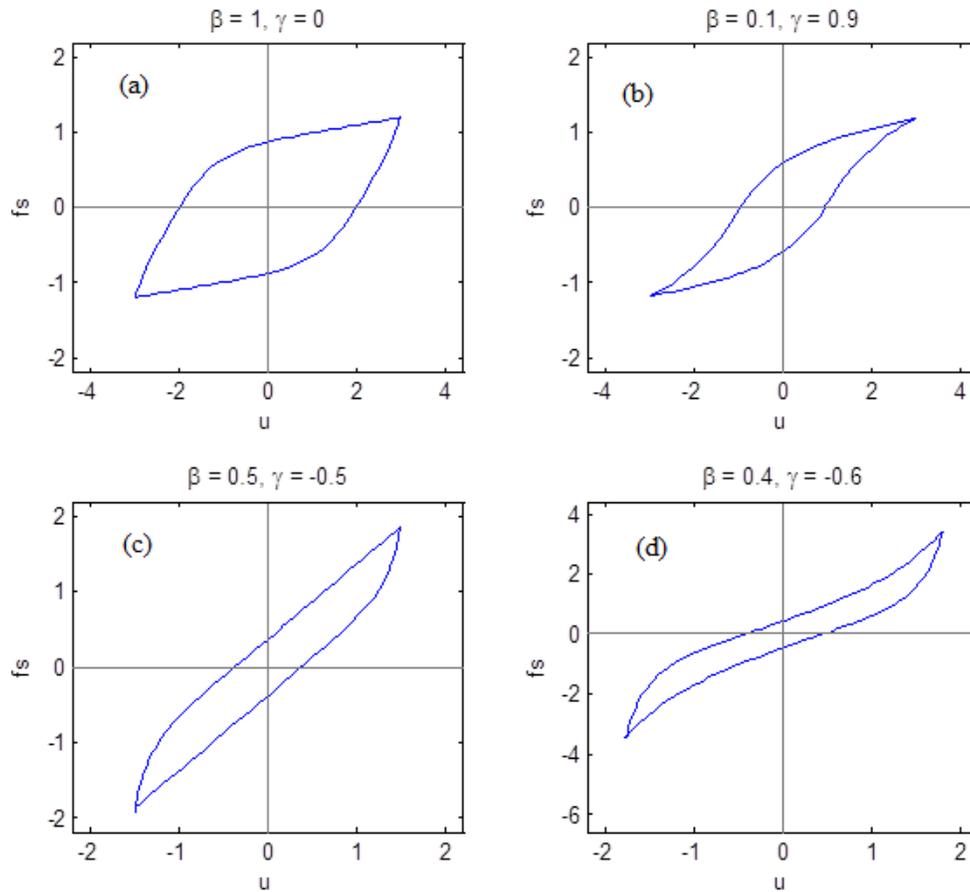


FIGURA 7: HISTÉRESIS BAJO DISTINTOS CASOS DE β, γ CON $A=1, K_E = 1, A = 1$.

En los casos (a) y (b) de la Figura 7, fluyen en $v_y = 1$ y $f_s = 1$. La diferencia está en la pendiente con que se parte desde la deformación máxima al momento de comenzar un semi-ciclo: el primer caso, en que $\beta > \gamma$, la rigidez tangente resulta ser mayor a la inicial $k_T > k_e$; en el segundo, en que $\beta < \gamma$, la rigidez tangente resulta ser menor a la inicial $k_T < k_e$.

En el caso (c) de la misma figura, en que $\beta = \gamma$, la histéresis tiene la particularidad de no tener una fluencia definida. Parte lineal y elástica y cuando llega a su deformación máxima retorna con una rigidez mayor, luego se suaviza hasta alcanzar nuevamente la rigidez inicial.

En el caso (d), en que $\beta + \gamma < 0$, hay un endurecimiento post-fluencia, el cual es muy sensible tanto la mencionada suma, como a n . Bajo estas condiciones, el modelo pierde estabilidad.

Como se ve el modelo es capaz de producir un gran número de formas de histéresis. Además se han hecho modificaciones para introducir a la histéresis asimetría [11], efectos de degradación [12] y de pinzamiento [13]

3.1.3 SISTEMA LINEAL EQUIVALENTE

El sistema lineal equivalente es una aproximación lineal a un sistema histerético no lineal. Dado que la energía en sistemas lineales definidos por (2) se disipa únicamente por el término $[C]\{\dot{v}(t)\}$, se ajusta la matriz $[C]$ de manera de disipar la misma energía que un sistema histerético no lineal.

Para un sistema de 1 grado de libertad, obtener dicho valor, o su equivalente β , es una medida del nivel de disipación de energía que ha llegado el sistema.

ENERGÍA DISIPADA EN UN SISTEMA DE 1 GDL EN RESONANCIA [8]

Para un sistema de 1 grado de libertad, cuya ecuación de movimiento queda descrita por (27), variante de 1 grado de libertad de (2), es posible obtener la energía disipada en un ciclo de movimiento armónico W_D mediante (35), si se está en régimen permanente bajo una excitación armónica uniforme de frecuencia $\bar{\omega}$ (28).

$$m \ddot{v}(t) + c \dot{v}(t) + k v(t) = p(t) \quad (27)$$

$$p(t) = P_0 \sin(\bar{\omega}t - \phi) \quad (28)$$

$$W_D = \pi c \bar{\omega} v_{max}^2 \quad (29)$$

Siendo P_0 la fuerza que define amplitud de la forzante armónica, ϕ el ángulo que define su fase, y v_{max} la deformación máxima alcanzada en cada ciclo de este régimen.

Reordenando (29), es posible obtener el valor de c a partir de la energía disipada W_D y la deformación máxima del sistema, así como obtener β considerando su definición en (30):

$$\beta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (30)$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (31)$$

$$c = \frac{W_D}{\pi \bar{\omega} v_{max}^2} \quad (32)$$

$$\beta = \frac{W_D}{2\pi \bar{\omega} m \omega_n v_{max}^2} \quad (33)$$

Si el sistema está en resonancia, es decir $\bar{\omega} = \omega_n$, la expresión (33) toma la forma expresada en (34), con lo cual β queda expresado en función de la energía disipada en el ciclo, y la energía elástica máxima alcanzada en el mismo, W_E .

$$\beta = \frac{W_D}{4\pi W_E} \quad (34)$$

$$W_E = \frac{k v_{max}^2}{2} \quad (35)$$

AMORTIGUAMIENTO LINEAL EQUIVALENTE [8]

La expresión en (34) define la razón de amortiguamiento que debe tener un sistema lineal para que disipe una cierta cantidad de energía W_D en un ciclo, cuando éste oscila en resonancia a su frecuencia natural ω_n .

Esta misma expresión se usa para obtener el amortiguamiento equivalente para un sistema histerético, β_{eq} considerando que la energía disipada W_D se obtiene por el área encerrada en un ciclo de histéresis. Dado que durante un sismo los ciclos histeréticos son múltiples y de distintas

amplitudes, se define dicho ciclo como la envolvente de la histéresis. La energía elástica máxima alcanzada, W_E se obtiene de la máxima deformación. Por extensión, la rigidez equivalente k_{eq} será aquella que sea consistente con W_E , es decir la rigidez secante a la máxima deformación de la histéresis. La Figura 8 ilustra estos conceptos.

El par β_{eq} - k_{eq} , amortiguamiento y rigidez equivalente, constituye el llamado sistema equivalente.

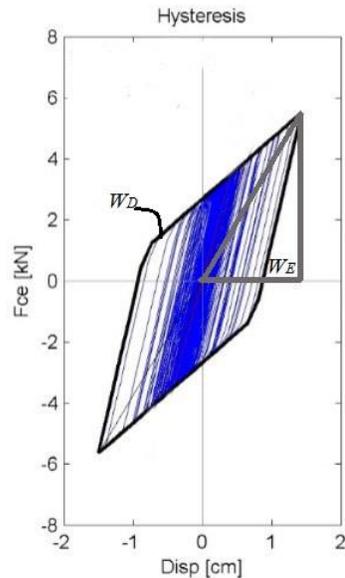


FIGURA 8: ESQUEMA TIPO DE SISTEMA EQUIVALENTE. W_D ES LA ENERGÍA DISIPADA, EQUIVALENTE A LA ENCERRADA POR LA ENVOLVENTE DE LA HISTÉRESIS, Y W_E LA ENERGÍA ELÁSTICA MÁXIMA ALCANZADA, EQUIVALENTE AL ÁREA ENCERRADA EN EL TRIÁNGULO.

3.1.4 DESCOMPOSICIONES MATRICIALES

En esta sección se muestran diversas descomposiciones matriciales, las que son usadas en la identificación paramétrica.

DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES (SVD)

La Descomposición en Valores Singulares o SVD, es una factorización de una matriz, no necesariamente cuadrada, en matrices de vectores ortonormales y diagonales, constituyendo la generalización de la descomposición en valores y vectores propios para una matriz no cuadrada.

Se caracteriza por descomponer una matriz $[X]$ de $m \times n$ en

$$[X] = [U][\Sigma][V]^T \quad (36)$$

Donde $[U]$ y $[V]$ son matrices cuadradas ortonormales de $m \times m$ y $n \times n$, respectivamente, y $[\Sigma]$ es una matriz diagonal de $m \times n$. A cada uno de los valores de la diagonal de $[\Sigma]$ se les llama autovalor o valor propio.

Si llamamos r a la cantidad de valores propios no nulos, podremos representar el sistema según

$$[X] = \begin{bmatrix} [U_1] & [U_2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Sigma_1] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_1]^T \\ [V_2]^T \end{bmatrix} = [U_1][\Sigma_1][V_1]^T \quad (37)$$

Siendo $[U_1]$ y $[V_1]$ matrices de $m \times r$ y $[\Sigma_1]$ matriz cuadrada $r \times r$ con los valores propios no nulos del sistema en su diagonal. Con ello, se reduce el tamaño del problema al eliminar vectores redundantes.

DESCOMPOSICIÓN QR

La descomposición QR es una factorización de una matriz $[X]$ en un producto de una matriz cuadrada ortonormal $[Q]$ y una triangular superior $[R]$, de manera que:

$$[X] = [Q][R] \quad (38)$$

Debido a la ortogonalidad de $[Q]$, se cumple que si $[Q_1]$ y $[Q_2]$ son submatrices de $[Q]$ tal que

$$[Q] = \begin{bmatrix} [Q_1] \\ [Q_2] \end{bmatrix} \quad (39)$$

Entonces

$$[Q_1][Q_2]^T = [0], [Q_1][Q_1]^T = [I], [Q_2][Q_2]^T = [I] \quad (40)$$

DESCOMPOSICIÓN LQ

La descomposición LQ es una factorización de una matriz $[X]$ en un producto de una matriz cuadrada ortonormal $[Q]$ y una triangular inferior $[L]$, de manera que:

$$[X] = [L][Q] \quad (41)$$

Debido a la ortogonalidad de $[Q]$, se cumple que si $[Q_1]$ y $[Q_2]$ son submatrices de $[Q]$ tal que

$$[Q] = \begin{bmatrix} [Q_1] & [Q_2] \end{bmatrix} \quad (42)$$

Entonces,

$$[Q_1]^T [Q_2] = [0], [Q_1]^T [Q_1] = [I], [Q_2]^T [Q_2] = [I] \quad (43)$$

3.2 IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS

La identificación de estructuras son un conjunto de métodos enfocados en determinar las propiedades dinámicas de estructuras a partir del registro de datos recopilados de su respuesta dinámica. Comúnmente se captura la aceleración sobre estructuras bajo condiciones de ruido ambiental o durante un sismo, y se obtienen las propiedades modales de la estructura, tales como los periodos fundamentales, el amortiguamiento lineal equivalente y las formas modales.

Existen varios métodos de identificación publicados, los principales de ellos son los que asumen el comportamiento de la estructura como lineal y las propiedades modales constantes. Entre ellos está la identificación no paramétrica sobre la selección de máximos en el espectro de potencia, conocida como PSD [1] y la Identificación Paramétrica en el Subespacio Estocástico [2] para ruido ambiental, y su variante para excitaciones estacionarias MOESP [3] para excitaciones conocidas.

Los métodos descritos en el párrafo anterior han sido probados numerosas veces asumiendo comportamiento lineal, sin embargo, es necesario conocer en más detalle cómo varían los parámetros identificados a medida que la estructura va entrando en el rango no lineal, o en otras palabras, cómo variarán los parámetros identificados a medida que el BRB va trabajando y disipando energía.

A continuación, se detallará el marco teórico sobre el que se basa la identificación estos tres métodos de identificación lineales y que serán usados en el estudio de las Diagonales de Pandeo Restringido.

3.2.1 SELECCIÓN DE MÁXIMOS EN ESPECTRO DE POTENCIA (PSD)

El Espectro de Potencia, o Espectro de Densidad de Potencia (PSD) [1], entrega la potencia de una señal distribuida en distintas frecuencias. Al tomar una señal que corresponda a la respuesta de una estructura $y(t)$, su espectro mostrará mayor potencia para aquellas frecuencias que correspondan a las naturales de la estructura, y por lo tanto detectando adecuadamente los máximos locales de la función es posible obtener sus frecuencias naturales. Además, con la forma de los mismos, es posible detectar la razón de amortiguamiento de los modos asociados.

El método se basa en tomar un registro de respuesta de aceleraciones de un sistema o estructura excitada bajo condiciones ambientales, que se pueden suponer adecuadamente con las propiedades de Ruido Blanco Gaussiano, esto es, una señal que no tiene correlación estadística entre dos instantes de tiempo diferentes, y que posee un espectro de potencia constante. Al hacer esto, el espectro potencia de la respuesta será proporcional al cuadrado de la función de transferencia que tiene como máximos locales a las frecuencias naturales del sistema.

DEMOSTRACIÓN MATEMÁTICA

El Espectro densidad de potencia, $S_{yy}(f)$ se obtiene a partir de la transformada de Fourier de la respuesta $y(t)$ de la estructura, sea esta desplazamiento, velocidad o aceleración:

$$S_{yy}(f) = Y^*(f)Y(f) \quad (44)$$

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (45)$$

Con ello, se obtienen un espectro para $f \in (-\infty, \infty)$, simétrico respecto a 0. Para obtener el espectro descrito únicamente en frecuencias positivas $S_y(f)$, basta duplicar la parte positiva de éste:

$$S_y(f) = 2Y^*(f)Y(f) \quad (46)$$

Por otro lado, si caracterizamos la respuesta de un sistema lineal y elástico de un grado de libertad como la convolución entre la excitación $x(t)$ y la respuesta al impulso $h(t)$ (ecuaciones (47) y (48)), podemos relacionar en el espacio de las frecuencias a la transformada de Fourier de cada una de estas funciones de la manera expresada en la ecuación (49), siendo $Y(f)$, $H(f)$ y $X(f)$ las transformadas de Fourier de $y(t)$, $h(t)$ y $x(t)$, respectivamente.

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (47)$$

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_D} e^{-\omega\beta t} \sin(\omega_D t) \quad (48)$$

$$Y(f) = X(f)H(f) \quad (49)$$

Al pre multiplicar la ecuación (49) por el conjugado complejo, y usando la ecuación (44), es posible relacionar la transformada de Fourier de la excitación y función de transferencia con el espectro densidad de potencia:

$$S_{yy}(f) = Y^*(f)Y(f) = H^*(f)X^*(f)X(f)H(f) = H^*(f)|X(f)|^2H(f) \quad (50)$$

Gracias al teorema de Wiener-Khintchine, podemos relacionar el término $|X(f)|^2$ con la transformada de Fourier de la función de autocorrelación $R_{xx}(t)$:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t + \tau)dt \quad (51)$$

$$S_{xx}(f) = X^*(f)X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau)e^{-i2\pi f\tau}d\tau \quad (52)$$

Si aplicamos la definición de Ruido blanco Gaussiano a la excitación $x(t)$, es decir que su función de autocorrelación R_{xx} tiene un solo valor no nulo en 0 (ecuación (53)) igual a la varianza de la señal σ^2 , es posible reescribir (50) y establecer que $S_{yy}(f)$ es proporcional al cuadrado de la transformada de Fourier de la función respuesta al impulso (54).

$$R_{xx}(t) = \sigma^2\delta(t) \quad (53)$$

$$S_{yy}(f) = \sigma^2|H(f)|^2 \quad (54)$$

Finalmente, la transformada de Fourier de la respuesta al impulso es proporcional al cuadrado de la función de transferencia, que tiene como máximo local a la frecuencia natural del sistema o modo de análisis, f_n .

$$H(f) = \frac{1}{m} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2 + 2i\beta \frac{f_n}{f}}} \quad (55)$$

Cabe destacar que si la respuesta $y(t)$ es desplazamiento, velocidad o aceleración no varía la proporcionalidad de su Espectro de potencia respecto a la función de transferencia, gracias a la propiedad de la derivada de la transformada de Fourier que establece una proporcionalidad en módulo entre ellas.

PSD CON TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Para trabajar con señales reales, es necesario encontrar las expresiones correspondientes en el espacio discreto. Para ello, la ecuación (45) se transforma en una sumatoria discreta, observable en

la ecuación (56) y los espectros $S_{yy}(f)$ y $S_y(f)$ quedan descritos por las ecuaciones (57) y (58) para todos índices $n \in [1, N]$, con N el número de muestras a F_s muestras por segundo.

$$c_n = \sum_{k=1}^N y_k e^{-i2\pi(n-1)(k-1)/N} \quad (56)$$

$$S_{yy} = \frac{N-1}{F_s} c_n^* c_n \quad (57)$$

$$S_{yn} = 2c_n^* c_n \quad (58)$$

Además, debido a la cantidad de errores presentes en la toma de datos es necesario tomar un gran número de espectros para obtener una estimación Robusta del PSD. Por ello, es frecuente tomar un gran registro de las aceleraciones en una estructura, de 15 minutos o incluso una hora, y luego seleccionar varias ventanas dentro del mismo. Cada uno se filtra adecuadamente para frecuencias razonables en la estructura, se procesa independientemente y luego se promedia. Esto hace resaltar las frecuencias naturales de la estructura, presentes en los espectros de todas las ventanas, mientras que los otros máximos locales aparecen aleatoriamente en frecuencias distintas en cada ventana, y su promedio resulta ser un valor bajo.

El espectro de la Figura 9, muestra el aspecto que debería tener un Espectro de Potencia para una estructura con comportamiento lineal y elástico.

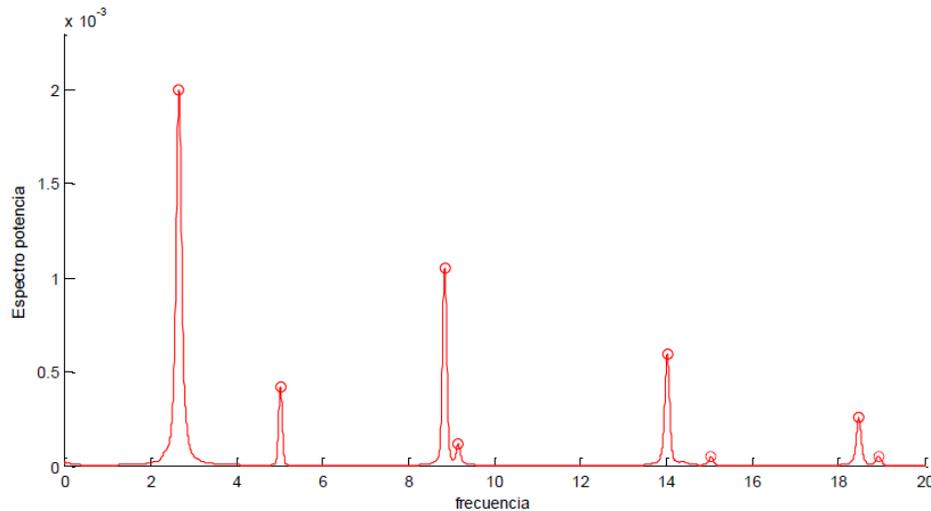


FIGURA 9: ESPECTRO POTENCIA TIPO, COMPORTAMIENTO LINEAL Y ELÁSTICO. 8 MODOS DETECTADOS.

Cabe destacar que aprovechando la proporcionalidad entre el cuadrado de la función de transferencia $H(f)$ y el PSD (54), es también posible encontrar la razón de amortiguamiento β midiendo la amplitud del *peak* del espectro: mientras más amplio sea, indica que en el sistema actúa un mayor amortiguamiento. Lamentablemente, para casos reales, la estimación de β es poco robusta y el método no es considerado como un buen estimador de este parámetro, a menos que los tiempos de muestreo sean muy grandes.

Para efectos del trabajo a realizar, no será considerado el parámetro β , debido a que las estimaciones no lineales hacen menos creíbles los resultados obtenidos del mismo.

3.2.2 IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA EN EL SUBESPACIO ESTOCÁSTICO (SSI-COV).

La técnica de identificación paramétrica SSI-COV, MOESP, y otras como ERA, Ibrahim y Next-ERA se basan en la construcción de la matriz de estado $[A]$ del sistema estudiado a partir del registro de datos observados, y de la obtención de valores y vectores propios de la misma. Se diferencian entre ellas en qué tipo de excitaciones trabajan y cómo las ordenan, pero básicamente lo hacen reordenando la respuesta registrada en matrices de Hankel o Toeplitz¹, a las cuales se les realizan descomposiciones matriciales SDV o QR para obtener las matrices $[A]$ y $[C_d]$ del sistema, y por ende sus propiedades modales.

El método SSI-COV trabaja con las covarianzas de la señal de respuesta en ruido blanco de un sistema lineal y elástico, (59), ordenándolas en bloques $[R_i]$ según la disposición de la Matriz de Toeplitz $[T]$ (60). Siguiendo [8]

$$[R_i] = \mathbb{E}\{\{y_{k+i}\}\{y_k\}^T\} \quad (59)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} [R_i] & [R_{i-1}] & \cdots & [R_1] \\ [R_{i+1}] & [R_i] & \cdots & [R_2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [R_{2i-1}] & [R_{2i-1}] & \cdots & [R_i] \end{bmatrix} \quad (60)$$

Debido a las propiedades del ruido blanco gaussiano en la excitación de entrada, la matriz de covarianza de salida del estado siguiente $[G]$ (64), es relacionable directamente con $[R_i]$ (62).

$$[G] = \mathbb{E}\{\{z_{k+i}\}\{y_k\}^T\} \quad (61)$$

$$[R_2] = [C_d][A][G], \quad [R_i] = [C_d][A]^{i-1} [G], \quad (62)$$

La propiedad anterior permite expresar la matriz $[T]$ en términos de multiplicaciones entre $[C_d]$, $[A]$, y $[G]$, agrupadas en dos grandes matrices, $[O_i]$ y $[\Gamma_i]$, llamadas matrices de Observabilidad y Controlabilidad, respectivamente.

$$[T] = [O_i][\Gamma_i] \quad (63)$$

$$[O_i] = \begin{bmatrix} [C_d] \\ [C_d][A] \\ \vdots \\ [C_d][A]^{i-1} \end{bmatrix}, \quad [\Gamma_i] = [[A]^{i-1}[G] \quad \cdots \quad [A][G] \quad [G]] \quad (64)$$

¹ Matriz de Toeplitz: Matriz cuadrada en la que los elementos de sus diagonales son constantes, y están ordenadas de acuerdo a un patrón descendiente de izquierda a derecha. Siguen el siguiente esquema:

$$[T] = \begin{bmatrix} a_0 & a_{-1} & a_{-2} & a_{-3} \\ a_1 & a_0 & a_{-1} & a_{-2} \\ a_2 & a_1 & a_0 & a_{-1} \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \end{bmatrix}$$

La descomposición SDV de la matriz $[T]$, expresada en (65), nos permite obtener las matrices $[O_i]$ y $[\Gamma_i]$, visualizables en las ecuaciones (66) y (67), respectivamente. La partición en bloques $[U_1]$, $[\Sigma_1]$, y $[V_1]$ es razonable debido a que gran cantidad de valores en la diagonal de $[\Sigma]$ son nulos o casi nulos. Estos se particionan de tal manera que $[\Sigma_2] \approx [0]$. A la dimensión de la partición, que es el número de valores de la diagonal de $[\Sigma_1]$, se le llama orden del modelo: n_i . El valor de n_i corresponde al doble de modos que se obtendrán finalmente.

Debido a que los resultados son sensibles a n_i , es común tomar varios de ellos y ordenarlos en un diagrama de estabilización, explicado a mayor profundidad en el punto 3.2.4.

$$[T] \xrightarrow{SDV} [U][\Sigma][V]^T = \begin{bmatrix} [U_1] & [U_2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Sigma_1] & [0] \\ [0] & [\Sigma_2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_1]^T \\ [V_2]^T \end{bmatrix} \approx [U_1][\Sigma_1][V_1]^T \quad (65)$$

$$[O_i] = [U_1][\Sigma_1]^{1/2} \quad (66)$$

$$[\Gamma_i] = [\Sigma_1]^{1/2}[V_1]^T \quad (67)$$

Dado una partición, para obtener la matriz de estado $[A]$ se procede a operar dos submatrices de $[O_i]$ expresadas en la ecuación (68). Ambas matrices se relacionan en lo que se conoce como desplazamiento de la matriz de observabilidad (69). Mediante la obtención de la pseudo inversa de $[O_i^\dagger]$, es posible resolver la ecuación. La descomposición QR (71) también es alternativa para resolver (69). La matriz $[C_d]$ se obtiene directamente de la definición de $[O_i]$ en (64), capturando su primer bloque, que corresponde a sus primeras l filas.

$$[O_i^\uparrow] = \begin{bmatrix} [C_d] \\ [C_d][A] \\ \vdots \\ [C_d][A]^{i-2} \end{bmatrix}, \quad [O_i^\downarrow] = \begin{bmatrix} [C_d][A] \\ [C_d][A]^2 \\ \vdots \\ [C_d][A]^{i-1} \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$[O_i^\uparrow][A] = [O_i^\downarrow] \quad (69)$$

$$[A] = [O_i^\uparrow]^\dagger [O_i^\downarrow] \quad (70)$$

$$[O_i^\uparrow] \xrightarrow{QR} [Q][R], \text{ y } [A] = [R]^{-1}[Q]^T [O_i^\downarrow] \quad (71)$$

El proceso de identificación con SSI-COV entonces, consiste en tomar la respuesta de la estructura en l sensores, sacar su covarianza y construir la matriz de Toeplitz, luego realizar la descomposición SDV, seleccionar los valores de la diagonal, particionar las matrices $[U_1]$, $[\Sigma_1]$, construir la matriz $[O_i]$ para luego obtener $[A]$ y $[C_d]$ a través de ellas.

Cabe destacar que para la identificación realizada, no se requiere el cálculo directo de la matriz de covarianza de salida del estado siguiente $[G]$, pero el hecho de que la excitación provenga de ruido blanco hace que esta permita construir una matriz de controlabilidad $[\Gamma_i]$ a partir de la cual es válido el método.

3.2.3 IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA EN EL SUBESPACIO ESTOCÁSTICO PARA EXCITACIONES NO ESTACIONARIAS (MOESP)

El modelo MOESP, *Multivariable Output Error State Space* [3], es un método de identificación paramétrica que permite identificar sistemas con excitaciones no estacionarias, como por ejemplo sismos. Básicamente, ordena la respuesta del sistema y la excitación basal en una gran matriz de Hankel y realiza una transformación matricial LQ², que permite manejar el efecto de la excitación de entrada y obtener una matriz de observabilidad desde la que se obtiene la matriz de estado.

El método parte desde el modelo Espacio Estado discreto, explicado en 3.1.1 y expresado en (72) y (73).

$$\{x_{k+1}\} = [A]\{x_k\} + [B]\{u_k\} \quad (72)$$

$$\{y_k\} = [C_d]\{x_k\} + [D_d]\{u_k\} \quad (73)$$

Considerando la ecuación (72), es posible expresar $\{x_k\}$ en función de $\{x_0\}$ y $\{u_k\}$, es decir la respuesta del sistema en el tiempo k a partir del estado inicial y la excitación (74). Además, con la ecuación (73), se expresa la respuesta en el tiempo k , pero en término de los datos observados $\{y_k\}$.

$$\{x_k\} = [A]^k\{x_0\} + \sum_{i=0}^{k-1} [A]^{k-i-1}[B]\{u_i\} \quad (74)$$

$$\{y_k\} = [C_d][A]^k\{x_0\} + [C_d] \left[\sum_{i=0}^{k-1} [A]^{k-i-1}[B]\{u_i\} \right] + [D_d]\{u_k\} \quad (75)$$

Ordenando un conjunto de bloques $\{y_k\}$ en una matriz de Henkel, la ecuación (73) toma la forma extendida expresada en (76).

$$[Y] = [O_i][X] + [T][U] \quad (76)$$

Donde:

$$[Y] = \begin{bmatrix} \{y_0\} & \{y_1\} & \cdots & \{y_{q-1}\} \\ \{y_1\} & \{y_{i+1}\} & \cdots & \{y_q\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \{y_{i-1}\} & \{y_i\} & \cdots & \{y_{q+i-1}\} \end{bmatrix} \quad [U] = \begin{bmatrix} \{u_0\} & \{u_1\} & \cdots & \{u_{q-1}\} \\ \{u_1\} & \{u_{i+1}\} & \cdots & \{u_q\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \{u_{i+q-1}\} & \{u_i\} & \cdots & \{u_{q+i-1}\} \end{bmatrix} \quad (77)$$

$$[O_i] = \begin{bmatrix} [C_d] \\ [C_d][A] \\ \vdots \\ [C_d][A]^{i-1} \end{bmatrix}, \quad [X] = [\{x_0\} \quad \{x_1\} \quad \cdots \quad \{x_{q-1}\}], \quad (78)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} [D_d] & [0] & \cdots & [0] \\ [C_d][B] & [D_d] & \cdots & [0] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [C_d][A]^{i-2}[B] & [C_d][A]^{i-1}[B] & \cdots & [D_d] \end{bmatrix} \quad (79)$$

² La transformación LQ factoriza una matriz arbitraria en el producto de una matriz triangular inferior, [L], y la traspuesta de una ortonormal [Q]. Es un caso análogo a la factorización QR.

La dimensión q , que corresponde al número de columnas de $[Y]$, $[U]$ y $[X]$, se establece como un número entero a elección, que debe ser mayor a la suma del número de filas de $[Y]$ y $[U]$.

Con (76), se obtiene la matriz de Observabilidad $[O_i]$, a partir de los datos registrados, al igual que en (63) de SSI-COV, sin embargo, a diferencia de esta última ecuación, está presente el sumando $[T][U]$ que no permite desarrollar el método con el mismo procedimiento descrito en 3.2.2. Al construir la matriz $[H]$ (80), y realizar en ella una descomposición LQ (81), es posible obtener las relaciones (82) y (83).

$$[H] = \begin{bmatrix} [U] \\ [Y] \end{bmatrix}, \quad (80)$$

$$[H] \xrightarrow{LQ} [L][Q]^T = \begin{bmatrix} [L_{11}] & [0] \\ [L_{21}] & [L_{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Q_1]^T \\ [Q_2]^T \end{bmatrix} \quad (81)$$

$$[U] = [L_{11}][Q_1]^T \quad (82)$$

$$[Y] = [L_{21}][Q_1]^T + [L_{22}][Q_2]^T \quad (83)$$

Aplicando la descomposición descrita en la ecuación (81) y (82) en (76), se obtiene (74). Al post multiplicar esta ecuación por $[Q_2]$, y gracias a la propiedad de ortogonalidad de las columnas de $[Q]$ (40), se obtiene la expresión (85).

$$[L_{21}][Q_1]^T + [L_{22}][Q_2]^T = [O_i][X] + [T][L_{11}][Q_1]^T \quad (84)$$

$$[L_{22}] = [O_i][X][Q_2] \quad (85)$$

De esta manera, se elimina la presencia del sumando $[T][U]$ de la ecuación (76), y la ecuación (85) constituye una relación completamente análoga a (63) de SSI-COV al definir $[\Gamma_i] = [X][Q_2]$. Lo que sigue del proceso es idéntico a este método: la descomposición SDV de $[L_{22}]$, partición de matrices $[U_1]$, $[\Sigma_1]$, y $[V_1]$, obtención de $[O_i]$, matriz de estado $[A]$, y propiedades modales del sistema, como se indica en ecuaciones (65) a la (71).

3.2.4 DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y ALGORITMO FMO

Cuando se habló de la partición de la descomposición de la matriz de Toeplitz en 3.2.2 y 3.3.3, se dijo que el rango de la partición de las matrices $[U_1]$, $[\Sigma_1]$, y $[V_1]$ influían en la respuesta final de la identificación. Por lo mismo, comúnmente se elige un rango de números $n_k = \{2, 4 \dots n_{max}\}$, y con cada uno de ellos se seleccionan matrices $[U_1]_k$, $[\Sigma_1]_k$, y $[V_1]_k$ a las cuales se le aplican las ecuaciones (65) a (71) a la matriz $[T]$, si se trata de SSI-COV, y $[L_{22}]$ si se trata de MOESP. El resultado son un conjunto de frecuencias, amortiguamientos y formas modales asociadas a cada n_k .

Se puede graficar la o las frecuencias $\{f_k\}$ por cada orden n_k y disponerlas horizontalmente en un gráfico n_k vs f_k . Con ellos, se obtienen gráficos de puntos dispersos con muchas frecuencias identificadas, pero en aquellas asociadas realmente a un modo, se identificarán en numerosos órdenes y visualmente se notará una columna sobre la o las frecuencias correspondientes (Figura 10).

La razón por la cual aparecen tantos puntos son por errores propios de la medición. Es común encontrar aparentes modos que no tienen relación con la física del problema, llamados espurios. Se debe con criterio seleccionar los reales, o recurrir a métodos automáticos de selección de modos que agilicen la identificación [14]

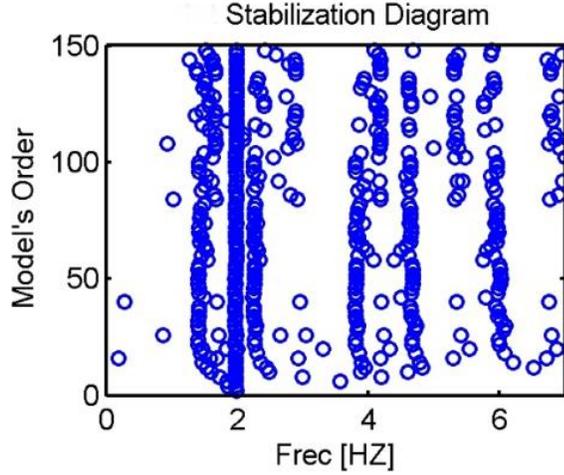


FIGURA 10: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN TIPO. PRESENCIA DE MODO FUNDAMENTAL EN F = 2 HZ. MODOS ESPURIOS EN OTRAS FRECUENCIAS.

Por otra parte, y para agilizar más aún el algoritmo, es posible evitar realizar para cada orden n_k una descomposición QR o cálculo de Pseudo Inversa, y aproximar realizando una partición matricial a partición matricial a partir del máximo orden del modelo, proceso conocido como algoritmo de identificación con múltiples órdenes, o FMO.

Dada la matriz de Observabilidad identificada con el máximo orden del modelo n_{max} , $[\mathcal{O}_i]_{n_{max}}$ (86), se realiza la partición de la matriz $[\mathcal{O}_i^\dagger]_{n_{max}}$ y $[\mathcal{O}_i^\downarrow]_{n_{max}}$ análogamente a cómo se hizo en (68), teniéndose (87). A continuación, se realiza una única descomposición QR para $[\mathcal{O}_i^\dagger]_{n_{max}}$ obteniéndose $[Q_M]$ y $[R_M]$ (88). Si además, se define $[S_M]$ de acuerdo a (89), la matriz $[A]$ se obtiene de acuerdo a la ecuación (90).

$$[\mathcal{O}_i]_{n_{max}} = [U_1]_{n_{max}} [\Sigma_1]_{n_{max}}^{1/2} \quad (86)$$

$$[\mathcal{O}_i^\dagger]_{n_{max}} [A]_{n_{max}} = [\mathcal{O}_i^\downarrow]_{n_{max}} \quad (87)$$

$$[\mathcal{O}_i^\dagger]_{n_{max}} \xrightarrow{QR} [Q_M][R_M] \quad (88)$$

$$[S_M] = [Q_M]^T [\mathcal{O}_i^\downarrow]_{n_{max}} \quad (89)$$

$$[A]_{n_{max}} = [R_M]^{-1} [S_M] \quad (90)$$

El procedimiento es análogo al descrito en las ecuaciones (68) a la (71), pero únicamente para el orden máximo del modelo. Para el resto de los $n_k < n_{max}$ se realiza a una partición de las matrices $[R_M]^{-1}$ y $[S_M]$, descrito en (96), de manera que $[R_{k11}]$ y $[S_{k11}]$ sean matrices cuadradas de $n_k \times n_k$. La matriz $[A]_k$ estimada se obtiene mediante (92) [14], y con (13), (14) y (15) las propiedades modales del sistema son rificables en diagramas de estabilización.

$$[R_M]^{-1} = \begin{bmatrix} [R_{k11}] & [R_{k12}] \\ [0] & [R_{k22}] \end{bmatrix} \quad [S_M] = \begin{bmatrix} [S_{k11}] & [S_{k12}] \\ [S_{k22}] & [S_{k22}] \end{bmatrix} \quad (91)$$

$$[A]_k = [R_{k11}][S_{k11}] \quad (92)$$

3.2.5 SELECCIÓN AUTOMÁTICA DE MODOS EN DIAGRAMAS DE ESTABILIZACIÓN

Para la selección automática de modos se aplica el método propuesto por Bakir [15]. Este se basa en someter a los modos encontrados a criterios de validación que deben cumplir los modos reales, a comparar la consistencia entre modos que aparecen asociados a distintos órdenes del modelo, y a reconocerlos como tales agrupándolos si sus características son similares.

Los criterios de validación que deben cumplir los modos reales, son el rango de frecuencias (ni negativos ni extremadamente altos), el rango de amortiguamiento (ni negativos ni extremadamente altos), y presencia de par conjugado dentro del conjunto de modos del mismo orden n_k . Dichos criterios son llamados criterios fuertes.

Luego de esto, con los valores que pasaron por la primera validación, se evalúa la consistencia entre modos asociados a distintos órdenes del modelo. Para ello, agrupan los valores propios de acuerdo a frecuencia, estableciendo contenedores, o *bins*, que agruparán todos los modos cuyas frecuencias se encuentren contenidas en un rango Δf . El conjunto de los contenedores, deben barrer todo el rango de frecuencias de análisis.

Luego de esto, para cada *bin* se evaluarán los criterios débiles, esto es, la distancia en frecuencia, amortiguamiento, y ortogonalidad entre formas modales. Se toma cada modo asociado a un orden n_k y se evalúa el error porcentual en frecuencia, amortiguamiento, y la distancia MAC [16] al modo identificado en el orden n_{k+1} :

$$\frac{f_{k+1} - f_k}{f_k} < tol_f \quad (93)$$

$$\frac{\beta_{k+1} - \beta_k}{\beta_k} < tol_\beta \quad (94)$$

$$1 - MAC(k, k+1) < tol_{FM} \quad (95)$$

Siendo f_k la frecuencia identificada en el orden k , β_k el amortiguamiento identificado en el orden k , tol_f la tolerancia a la distancia en frecuencia, tol_β la tolerancia a la distancia en amortiguamiento, tol_{FM} la tolerancia al nivel de ortogonalidad de formas modales, y MAC el criterio de ortogonalidad entre dichas formas, que se define según:

$$MAC(i, j) = \frac{|\{\phi_i\}^* \{\phi_j\}|^2}{(\{\phi_i\}^* \{\phi_i\})(\{\phi_j\}^* \{\phi_j\})} \quad (96)$$

Siendo $\{\phi_i\}$ la forma modal asociada al subíndice i , $\{\phi_j\}$ la forma modal asociada al subíndice j y $()^*$ la conjugada traspuesta del vector.

Si se cumple con dichos criterios, se considera que el modo n_k , cumple con un acierto, doble-acierto, o triple-acierto, según la cantidad de criterios que haya cumplido. Si en un bin están contenidos más de una cantidad mínima de Triple Aciertos, *minTA*, se constituye un modo.

Luego de este proceso de selección, se espera que un modo quede asociado a un bin, y que haya cumplido los criterios descritos, mientras que aquellos puntos de los diagramas no asociados a modos reales queden separados en bins distintos, o bien no hayan pasado los criterios débiles dentro del mismo bin. Como es posible que un mismo modo quede contenido en dos bin vecinos, se evalúan criterios de vecindad y se agrupan estos en un solo.

Con los *bins* resultantes, se puede visualizar un diagrama de Estabilización con columnas claras, asociadas a los modos identificados. La Figura 11 muestra el antes y después del proceso de filtrado. En la figura izquierda está el diagrama sin filtrar, mientras que en la figura derecha se muestran las columnas con los modos identificados. Se muestran en gris los modos que no pasaron los criterios débiles; desaparecen de esta figura aquellos modos que no han pasado los criterios fuertes.

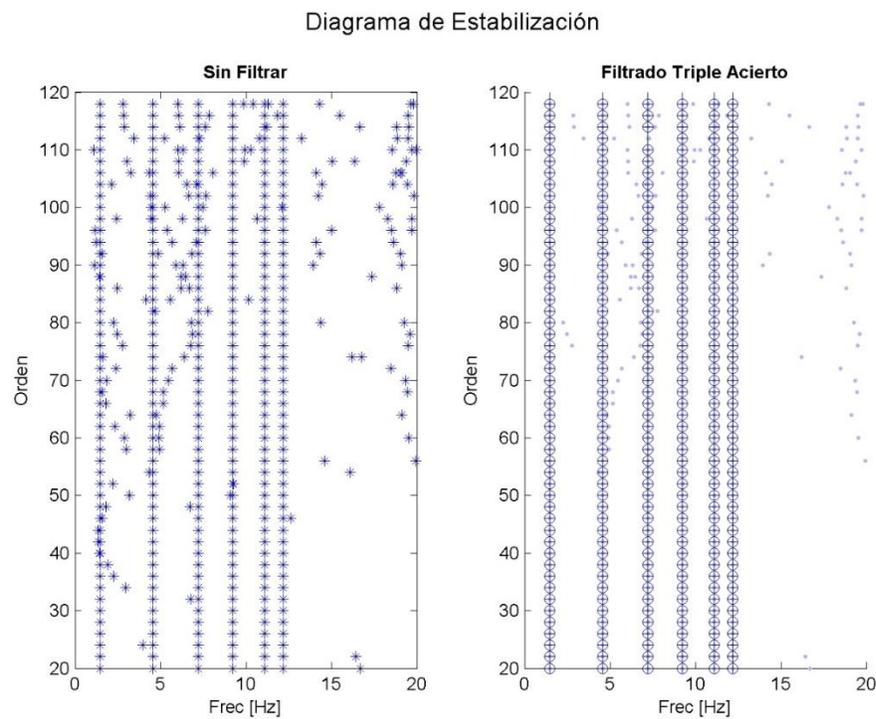


FIGURA 11: PROCESO DE SELECCIÓN AUTOMÁTICA DE MODOS. VISUALIZACIÓN EN DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN ANTES (IZQ) Y DESPUÉS (DER) DEL PROCESO. FRECUENCIAS IDENTIFICADAS EN 1.5 HZ, 4.5 HZ, 7.2 HZ, 9.2 HZ, 11 HZ Y 12 HZ.

Así mismo, es visualizable el proceso de filtrado un diagrama de frecuencias v/s amortiguamiento, llamado *Cluster*.

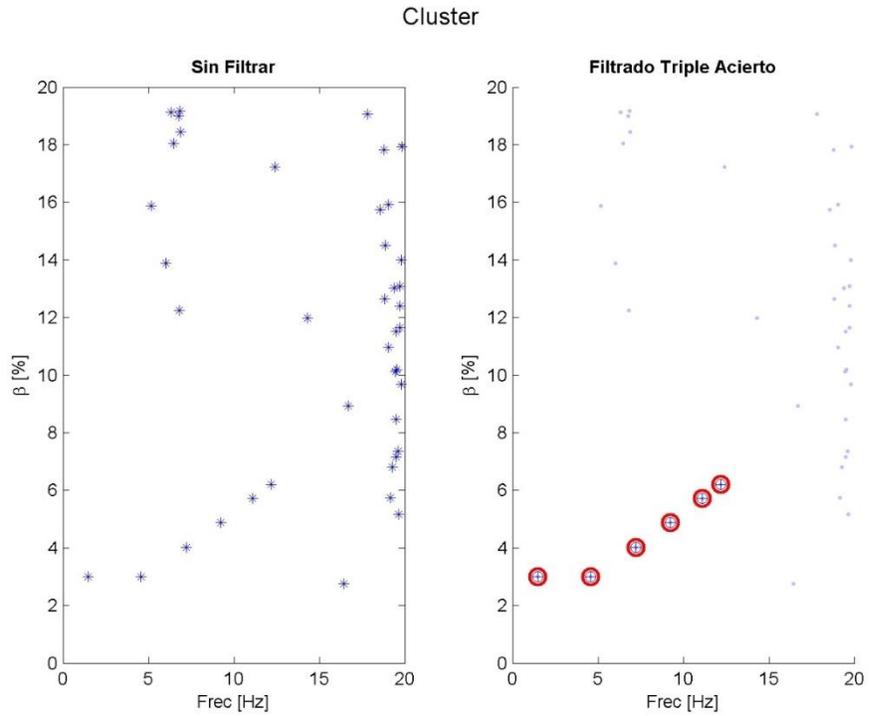


FIGURA 12: CLUSTER ANTES DEL FILTRADO (IZQ), Y DESPUÉS DEL FILTRADO (DER)

Se contó con la colaboración del trabajo de Joaquín Bilbao [17] y Pastor Villalpando [18] que desarrollaron estas técnicas de identificación automática y la pusieron a disposición de la presente memoria. **La ecuaciones mostradas arriba son parte del material del curso Dinamica Avanzada [8]**

4. IDENTIFICACIÓN SOBRE SISTEMA DE 1 GRADO DE LIBERTAD

4.1 PROCEDIMIENTO.

Se construye un sistema de un grado de libertad representado en la Figura 13, cuya fuerza resistente está a cargo de un BRB modelado como oscilador Bouc-Wen, y cuenta con una disipación equivalente a $\beta = 2\%$ para el rango lineal. Se eligen tres periodos iniciales de análisis para modelar el sistema, $T_{ini} = 0.2$, $T_{ini} = 0.5$ y $T_{ini} = 1.5$ s, y dos tipos de aceleraciones basales: Ruido Blanco Gaussiano (WGN) y el terremoto de Melipilla, mostrados en la Figura 14. Para cada uno de esos sistemas y solicitaciones, se obtiene la respuesta no-lineal del sistema y luego se identifica con los métodos lineales adecuados: WGN se identifica con PSD y SSI-COV, mientras que el sismo con MOESP.

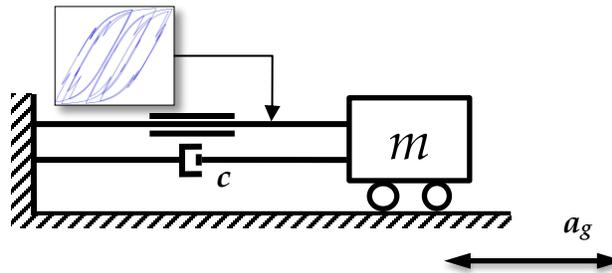


FIGURA 13: ESQUEMA OSCILADOR BOUC WEN DE 1 GDL. MASA UNITARIA Y AMORTIGUAMIENTO INICIAL DE 2%.

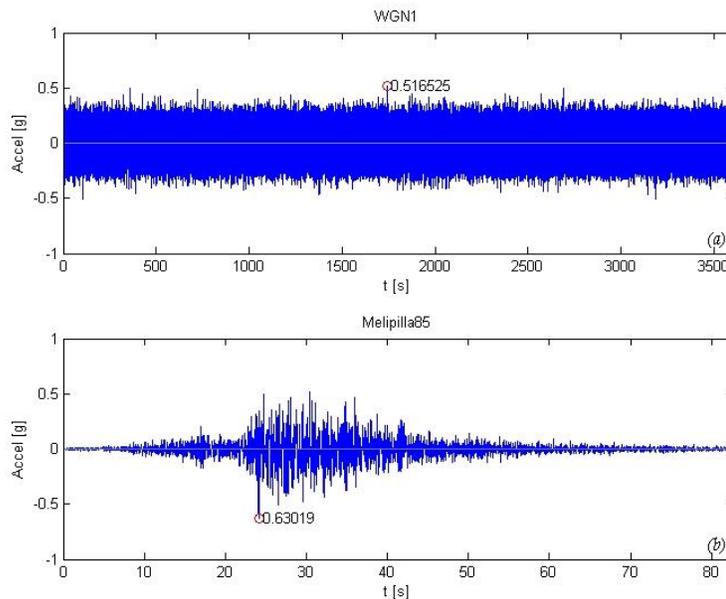


FIGURA 14: EXCITACIONES BASEALES USADAS (A) RUIDO BLANCO GAUSSIANO. (B) TERREMOTO DE LLOLLEO 1985, REGISTRO DE MELIPILLA.

Para cada uno de los periodos de análisis y aceleración basales, se hacen variar los parámetros del sistema de manera de analizar los efectos de cambiar los mismos en la identificación. Se agrupan en casos de acuerdo a qué efecto se quiere analizar:

- **Caso 1. Incursión en el rango no lineal:** Se identifican cuatro sistemas elastoplásticos con factor de reducción de la respuesta $R = 0.8$ (lineal y elástico), **2, 5 y 8**. Para ello se procesa la respuesta del sistema lineal y elástico y luego se proporciona una fluencia igual a la fuerza máxima dividida en R .
Los parámetros del modelo Bouc-Wen, n y K_{post} , se ajustan iguales a 20 y 0, respectivamente, para obtener el modelo elastoplástico.
- **Caso 2. Aumento de la rigidez post-fluencia K_{post} :** Se crean cuatro sistemas en los que se hace aumentar la rigidez post-fluencia: $K_{post} = 0\%, 2\%, 20\% \text{ y } 50\%$. Primero se hacen para una baja incursión en el rango no lineal ($R = 2$), y luego para una alta ($R=8$). Para todos los sistemas se mantiene una transición a la fluencia súbita, es decir un $n = 20$.
- **Caso 3. Suavización de la caída de rigidez n .** Se analiza el efecto de la suavización en la caída de rigidez para cuatro valores del parámetro n : **20, 5, 2 y 0.8**. Se repite este proceso para incursión alta y baja en el rango no lineal ($R = 8$ y 2), y para dos niveles de rigidez post-fluencia ($K_{post} = 0$ y 20%).

La Tabla 1 muestra los parámetros a usar para cada caso.

	Sub-caso	R	K_{post}	n
Caso 1	1	0.5	0	20
	2	2	0	20
	3	5	0	20
	4	10	0	20
Caso 2	5	2	0	20
	6	2	0.02	20
	7	2	0.2	20
	8	2	0.5	20
	9	8	0	20
	10	8	0.02	20
	11	8	0.2	20
	12	8	0.5	20
Caso 3	13	2	0	20
	14	2	0	5
	15	2	0	2
	16	2	0	0.8
	17	2	0.2	20
	18	2	0.2	5
	19	2	0.2	2
	20	2	0.2	0.8
	21	8	0	20
	22	8	0	5

	23	8	0	2
	24	8	0	0.8
	25	8	0.2	20
	26	8	0.2	5
	27	8	0.2	2
	28	8	0.2	0.8

TABLA 1: CASOS PARA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DE IGD. DETALLE DE PARÁMETROS DE MODELO BOUC WEN. CASO 1 VARIACIÓN DE R, CASO 2 VARIACIÓN DE KPOST Y CASO 3 VARIACIÓN DE N.

Para efectos prácticos, se recurre a mostrar los resultados sintetizados en tablas y figuras y de cuatro en cuatro sub-casos, es decir, una para el sub-Caso 1 al 4, otra para el 2 al 8, luego 9 al 12 y así sucesivamente. De esta manera, en cada tabla se visualiza la variación de un parámetro mientras los otros permanecen constantes. Así, en el Caso 1 muestra una tabla, en el Caso 2 dos tablas, y en el Caso 3 cuatro tablas.

Algunas histéresis, Diagramas de potencia, Diagramas de Estabilización o Clusters son mostrados, para mayor comprensión visual, en especial en la primera técnica de identificación (PSD) a modo de ejemplo.

Además de los casos mostrados, se analizan casos especiales denominados “**Caso 4**”. En el caso de la identificación con PSD, se construye un sistema que oscila todo el tiempo en un rango lineal y elástico, salvo una única incursión en el rango no lineal debido a un pulso. Para la identificación con MOESP, se selecciona un caso particular y se realiza un análisis por ventanas de tiempo.

Adicionalmente, se incluye la detección del sistema equivalente en algunos casos de MOESP.

4.2 IDENTIFICACIÓN CON P.S.D.

Se presentarán a continuación los resultados del análisis con Identificación de máximos en el espectro de potencia. Como una manera de simplificar los resultados, se mostrarán las histéresis y P.S.D. solo para el sistema con periodo inicial $T_{ini} = 0.5s$, dado que los sistemas con $T_{ini} = 0.2s$ y $T_{ini} = 1.5s$ se presentan en tablas.

Para cada figura mostrada, se muestra histéresis del sistema, y sobre ella la rigidez identificada a manera de pendiente. Se muestra una línea por cada ventana de observación V_h . Además, se muestra PSD de cada ventana de observación, destacando en un círculo el máximo del PSD. Se muestran los valores, los cuales también se disponen en tablas para mejor comprensión.

CASO 1: SISTEMA ELASTOPLÁSTICO INCURSIONANDO EN EL RANGO NO-LINEAL.

Las siguientes figuras presentan las histéresis y el PSD de los sistemas del Caso 1, en que el sistema elastoplástico entra progresivamente en el rango no lineal. La Figura 15 identifica un sistema lineal ($R = 0.8$), la Figura 16 lo hace con un sistema no lineal con baja incursión en no linealidad ($R = 2$), la Figura 17 en uno con incursión media ($R = 5$), y Figura 18 en uno con incursión alta ($R = 10$).

Model Bouc Wen - Data: WGN1
 $T_{ini} = 0.5s, \beta = 0.02, kpost = 0, R = 0.5, n=20$

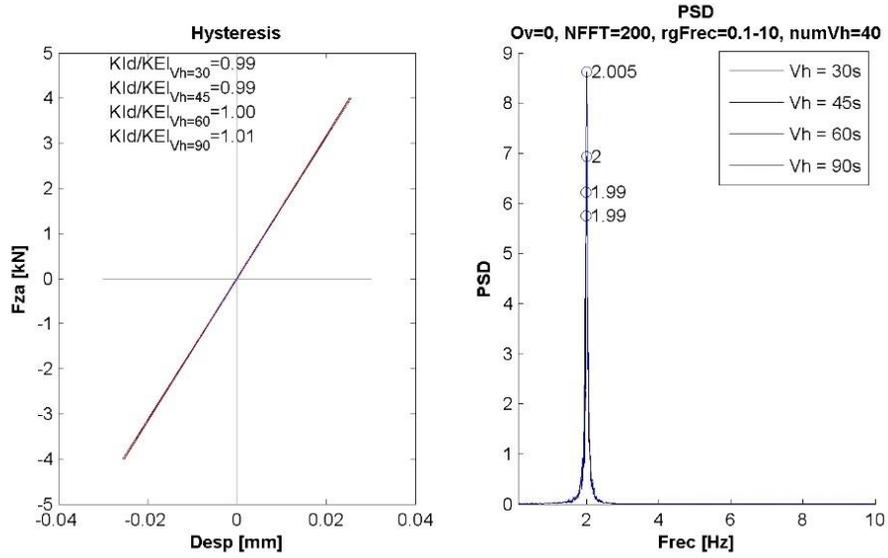


FIGURA 15: PSD PARA OSCILADOR LINEAL Y ELÁSTICO (R = 0.8)

Model Bouc Wen - Data: WGN1
 $T_{ini} = 0.5s, \beta = 0.02, kpost = 0, R = 2, n=20$

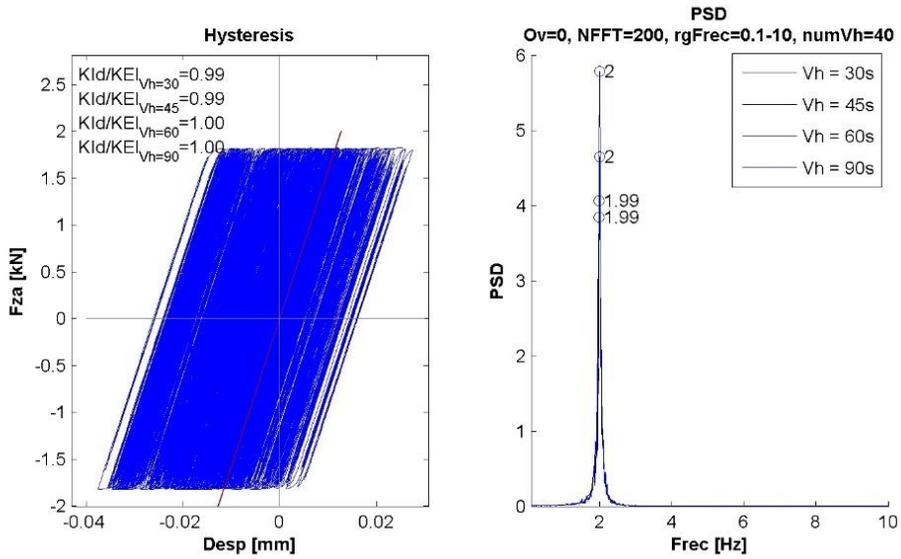


FIGURA 16: PSD PARA OSCILADOR ELASTOPLÁSTICO EN BAJA INCURSIÓN EN RANGO NO LINEAL R = 2.

Model Bouc Wen - Data: WGN1
 $T_{ini} = 0.5s$, $\beta = 0.02$, $k_{post} = 0$, $R = 5$, $n=20$

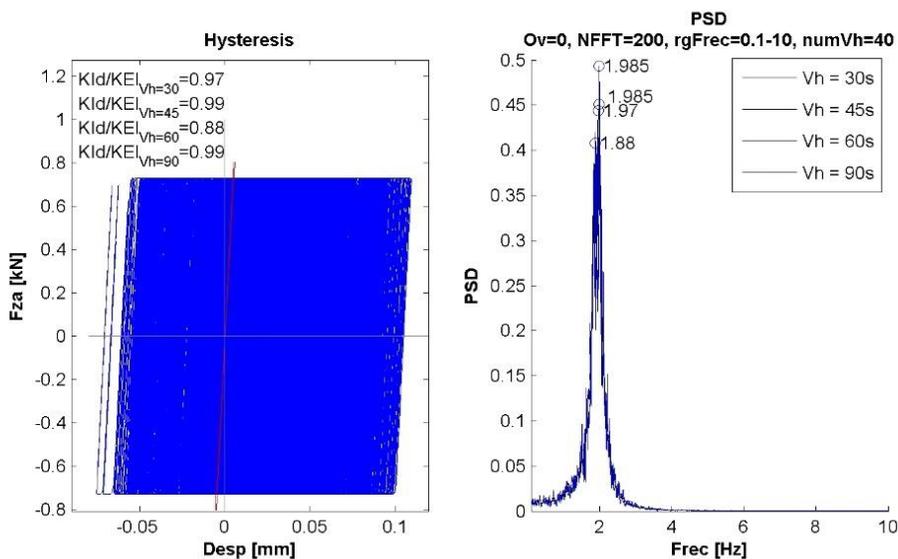


FIGURA 17: PSD PARA OSCILADOR ELASTOPLÁSTICO INCURSIÓN MEDIA EN RANGO NO LINEAL R = 5.

Model Bouc Wen - Data: WGN1
 $T_{ini} = 0.5s$, $\beta = 0.02$, $k_{post} = 0$, $R = 10$, $n=20$

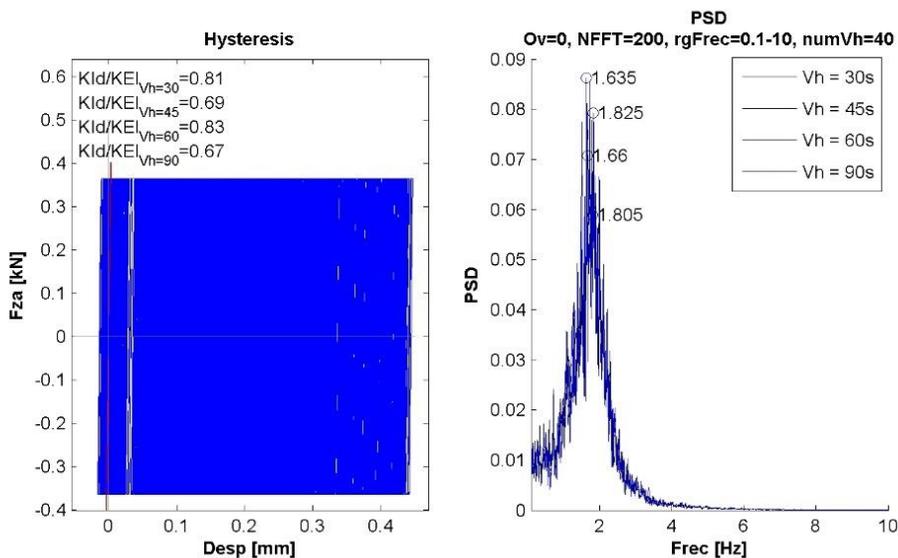


FIGURA 18: PSD PARA OSCILADOR ELÁSTOPLÁSTICO ALTA INCURSIÓN EN RANGO NO LINEAL (R = 10)

Las frecuencias identificadas en cada caso pueden ser relacionadas con una rigidez equivalente planteada sobre las Figuras anteriormente presentadas: (97),

$$K_{id} = m \cdot (2\pi \cdot f_{id})^2 \quad (97)$$

Siendo K_{id} la rigidez y f_{id} la frecuencia identificada. La Tabla 2 presenta estos resultados y la Figura 19 los esquematiza.

Periodo inicial sistema [s]	Tiempo de ventana de identificación [s]	R = 0.8	R = 2	R = 5	R = 10
$T_{ini} = 0.2$	30	0.99	0.98	0.91	0.82
	45	0.98	0.98	0.95	0.82
	60	1	1	0.92	0.82
	90	1	0.98	0.91	0.73
$T_{ini} = 0.5$	30	0.99	0.99	0.97	0.81
	45	0.99	0.99	0.99	0.69
	60	1	1	0.88	0.83
	90	1	1	0.99	0.67
$T_{ini} = 1.5s$	30	1.01	1.01	0.85	0.56
	45	1.01	1	0.94	0.6
	60	1	1	0.84	0.68
	90	1	1.01	1.01	0.59

TABLA 2: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN PSD SOBRE SISTEMA CON ELASTOPLASTICO ($K_{POST} = 0, n = 20$): RIGIDEZ IDENTIFICADA (K_{ID}) NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

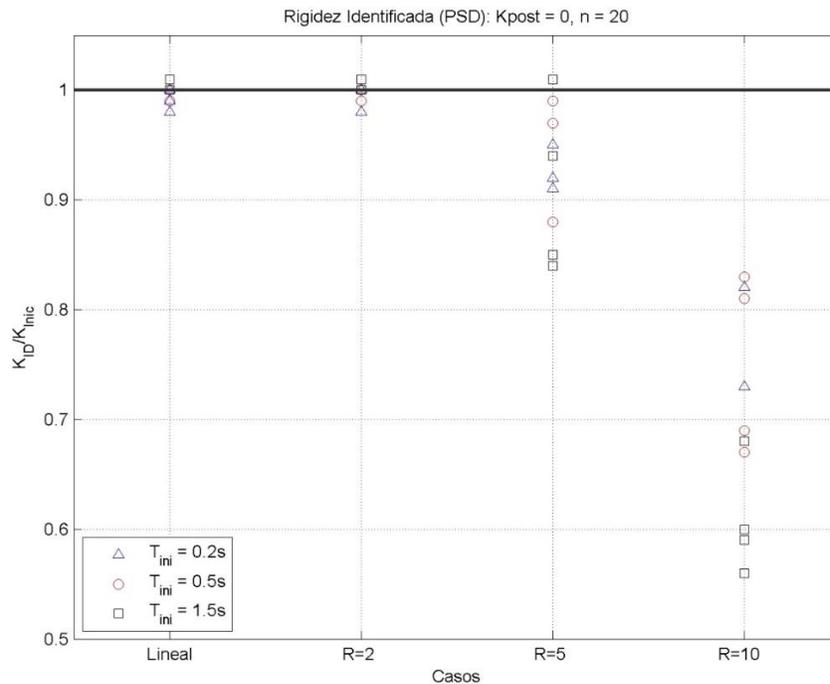


FIGURA 19: RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA. $R = 0.8, 2, 5, Y 10$. OSCILADOR ELASTOPLASTICO ($K_{POST} = 0, n = 20$):

CASO 2: AUMENTO DE LA RIGIDEZ POST-FLUENCIA

Las siguientes presentan las histéresis y el PSD de los sistemas del Caso 2, en que el sistema elastoplástico se transforma en un sistema bilineal aumentando su rigidez post-fluencia, reflejada en el parámetro K_{post} . Este varía de 0% a 50%.

Las Figura 20 y la Figura 21 muestran este incremento en el parámetro para un sistema de baja no linealidad ($R = 2$), mientras que las Figura 22 y Figura 23 presentan el mismo aumento, pero para un sistema de alta no linealidad ($R = 8$).

Baja no linealidad ($R = 2$).

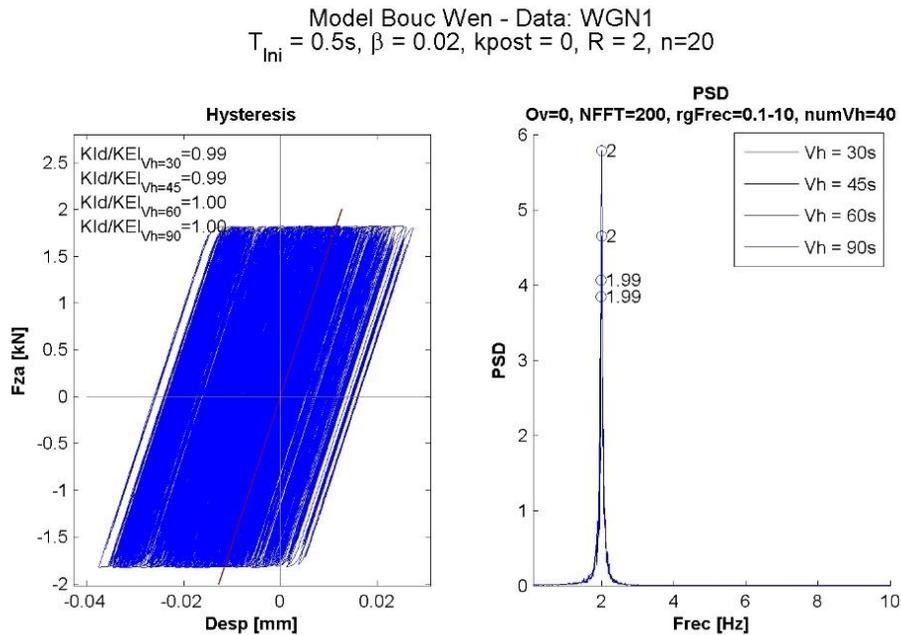


FIGURA 20: PSD PARA SISTEMA BILINEAL DE BAJA NO LINEALIDAD. KPOST NULO.

Model Bouc Wen - Data: WGN1
 $T_{ini} = 0.5s$, $\beta = 0.02$, $k_{post} = 0.5$, $R = 2$, $n=20$

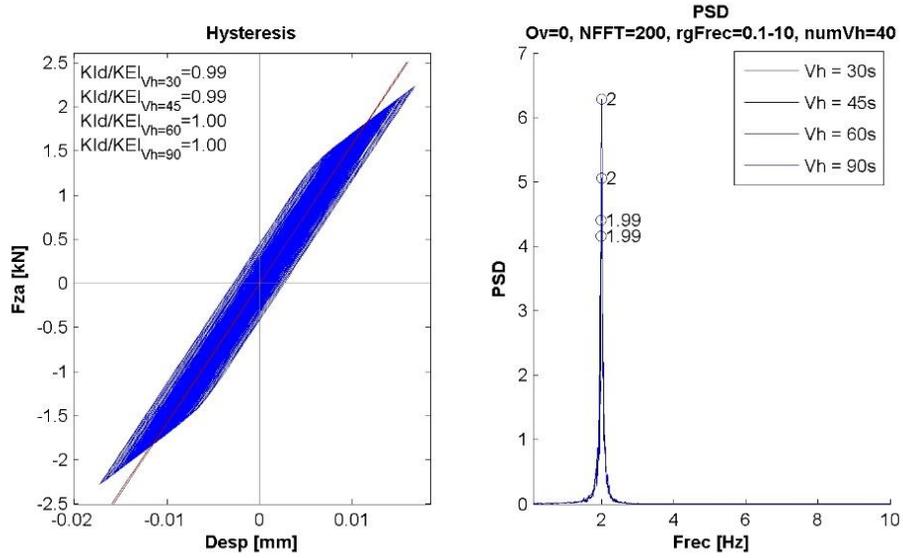


FIGURA 21: PSD PARA SISTEMA BILINEAL DE BAJA NO LINEALIDAD. KPOST ALTO (50%)

Alta no linealidad ($R = 8$).

Model Bouc Wen - Data: WGN1
 $T_{ini} = 0.5s$, $\beta = 0.02$, $k_{post} = 0$, $R = 8$, $n=20$

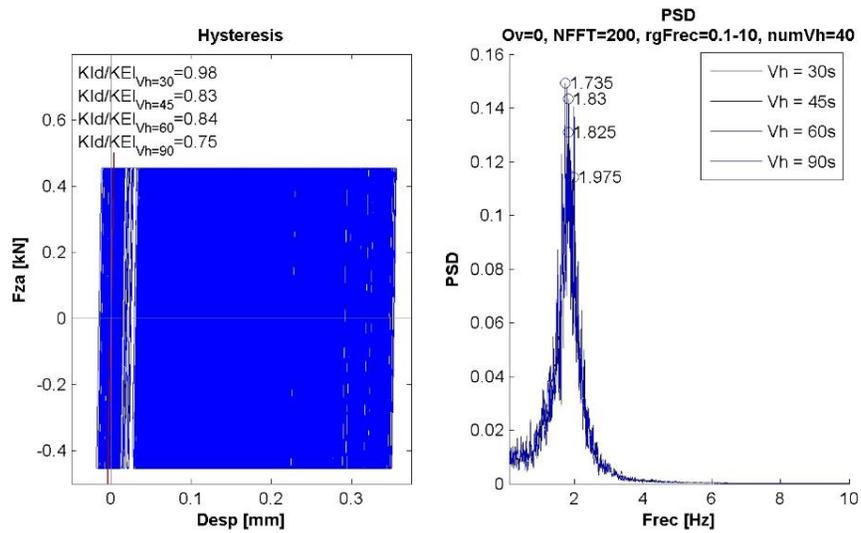


FIGURA 22: PSD PARA SISTEMA BILINEAL DE ALTA NO LINEALIDAD. KPOST NULO.

Model Bouc Wen - Data: WGN1
 $T_{ini} = 0.5s$, $\beta = 0.02$, $k_{post} = 0.5$, $R = 8$, $n=20$

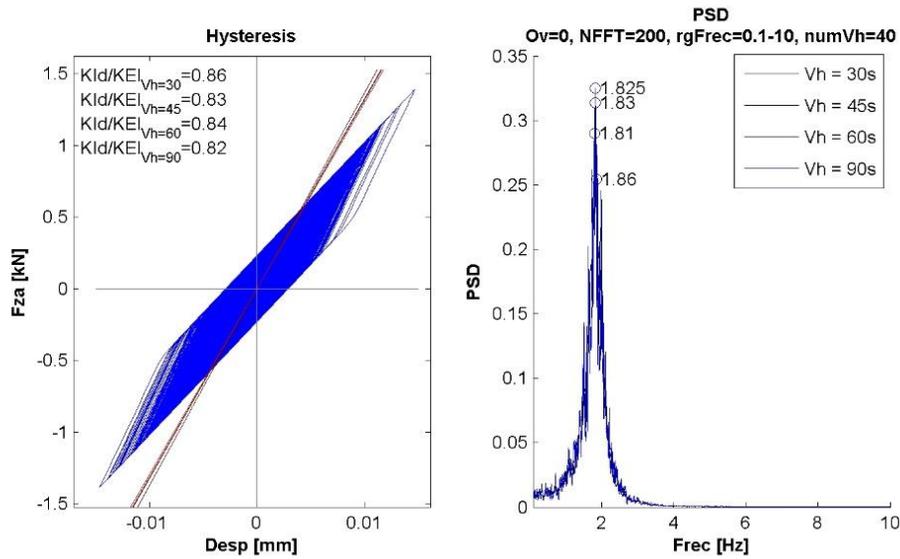


FIGURA 23: PSD PARA SISTEMA BILINEAL DE ALTA NO LINEALIDAD. KPOST ALTO (50%)

Las frecuencias identificadas en cada caso, se relacionan con una rigidez equivalente a través de (97). Esta rigidez normalizada por la rigidez inicial del sistema se presenta en la Tabla 3 y Tabla 4, para el caso de baja y alta incursión en el rango no lineal, respectivamente. Las Figura 24 y Figura 25 esquematizan estas tablas.

Periodo inicial sistema [s]	Tiempo de ventana de identificación [s]	Kpost			
		Kpost 0	Kpost 2%	Kpost 20%	Kpost 50%
$T_{ini} = 0.2$	30	0.98	0.98	0.98	0.98
	45	0.98	0.98	0.98	0.98
	60	1	1.99	0.98	0.98
	90	0.98	0.98	0.98	0.98
$T_{ini} = 0.5$	30	0.99	0.99	0.99	0.99
	45	0.99	0.99	0.99	0.99
	60	1	1	1	1
	90	1	1	1	1
$T_{ini} = 1.5s$	30	1.01	1.01	1.01	1.01
	45	1	1	1	1
	60	1	1	1	1
	90	1.01	1.01	1.01	1.01

TABLA 3: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN PSD SOBRE SISTEMA BILINEAL DE BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 2, n = 20$): RIGIDEZ IDENTIFICADA (K_{ID}) NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

Periodo inicial sistema [s]	Tiempo de ventana de identificación [s]	Kpost 0	Kpost 2%	Kpost 20%	Kpost 50%
$T_{ini} = 0.2$	30	0.91	0.91	0.82	0.9
	45	0.82	0.82	0.86	0.82
	60	0.82	0.82	0.82	0.82
	90	0.91	0.91	0.91	0.91
$T_{ini} = 0.5$	30	0.98	0.97	0.87	0.86
	45	0.83	0.83	0.83	0.83
	60	0.84	0.84	0.83	0.84
	90	0.75	0.8	0.8	0.82
$T_{ini} = 1.5s$	30	0.8	0.8	0.8	0.8
	45	0.81	0.82	0.82	0.82
	60	0.82	0.81	0.82	0.82
	90	0.82	0.82	0.82	0.84

TABLA 4: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN PSD SOBRE SISTEMA BILINEAL DE ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 8, n = 20$): RIGIDEZ IDENTIFICADA (K_{ID}) NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

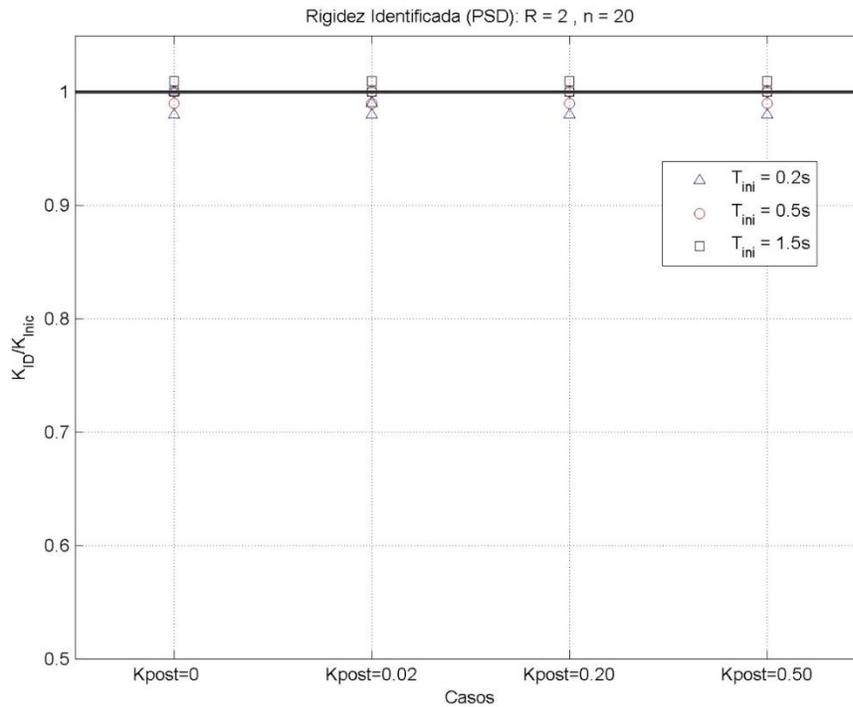


FIGURA 24: RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA. $R = 0.8, 2, 5, Y 10$. OSCILADOR ELASTOPLASTICO ($R = 2, n = 20$):

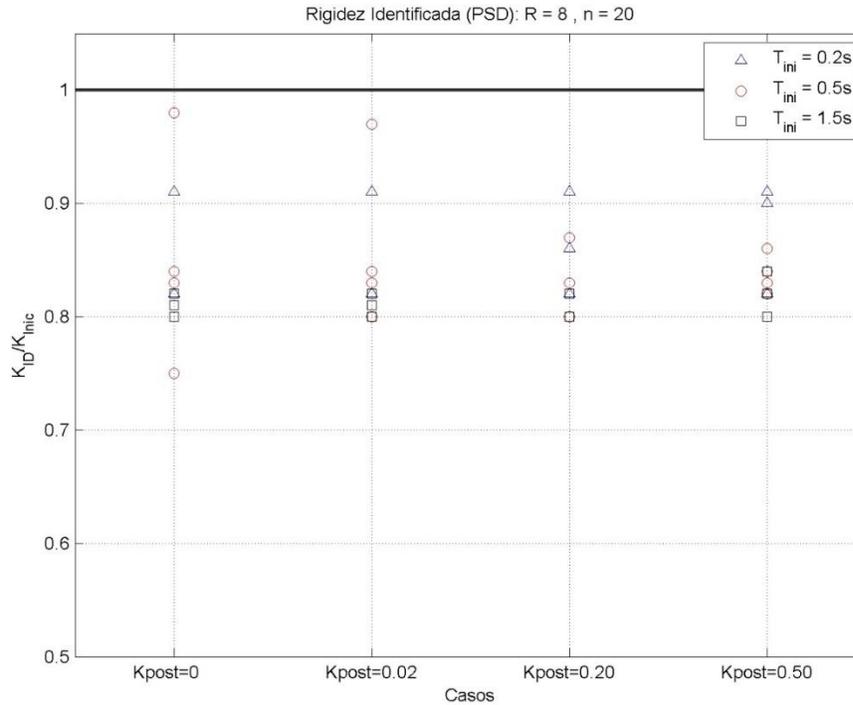


FIGURA 25: RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA. $R = 0.8, 2, 5, \text{ Y } 10$. OSCILADOR ELASTOPLASTICO ($R = 8, n = 20$)

CASO 3: SUAVIZACIÓN EN TRANSICIÓN A LA FLUENCIA.

Las siguientes presentan las histéresis y el PSD de los sistemas del Caso 3, en que la histéresis del sistema bilineal se torna más curva por la suavización en el cambio de rigidez reflejada en el parámetro n . Este varía de $n=20$ (sistema bilineal), a $n = 0.8$, histéresis muy suave, acuerdo a lo estipulado en la Tabla 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se hace esta suavización de la curva en sistemas con alta y baja incursión en el rango no lineal, y con alta y baja rigidez post fluencia.

Las Figura 20 y la Figura 21 muestran la influencia de la suavización de la curva para un sistema de baja no linealidad ($R = 2$) y con rigidez post fluencia nula ($Kpost = 0$); las Figura 22 y la Figura 23 lo hacen para un sistema con rigidez post fluencia igual 20% de la inicial ($Kpost = 20\%$, $R = 2$); las Figura 22 y la Figura 23 lo hacen para un sistema de alta no linealidad ($R = 8$) y con rigidez post fluencia nula ($Kpost=0$); y finalmente las Figura 22 y la Figura 23 lo hacen para un sistema de alta no linealidad ($R = 8$) y con rigidez pos fluencia nula ($Kpost=20\%$);

Baja no linealidad ($R = 2$), Rigidez post fluencia nula ($K_{post} = 0$)

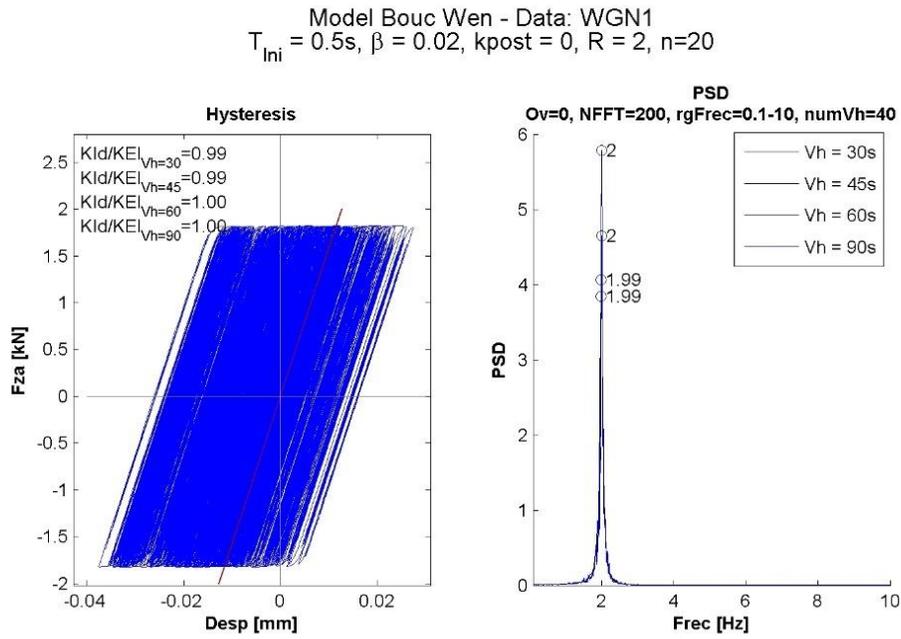


FIGURA 26: PSD PARA SISTEMA ELASTOPLÁSTICO. TRANSICIÓN A LA FLUENCIA SÚBITA ($n=20$)

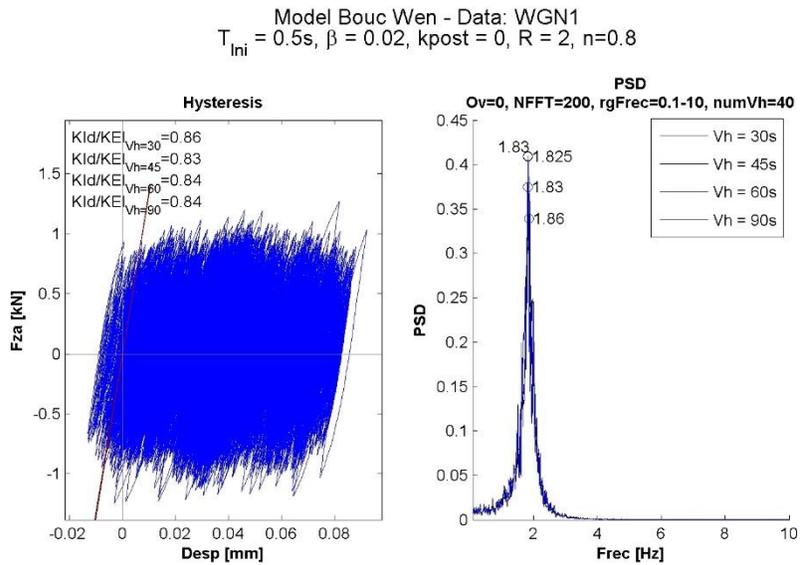


FIGURA 27: PSD PARA SISTEMA ELASTOPLÁSTICO. TRANSICIÓN A LA FLUENCIA MUY SUAVE ($n=0.8$)

Baja no linealidad ($R = 2$), Rigidez post fluencia alta ($K_{post} = 20\%$)

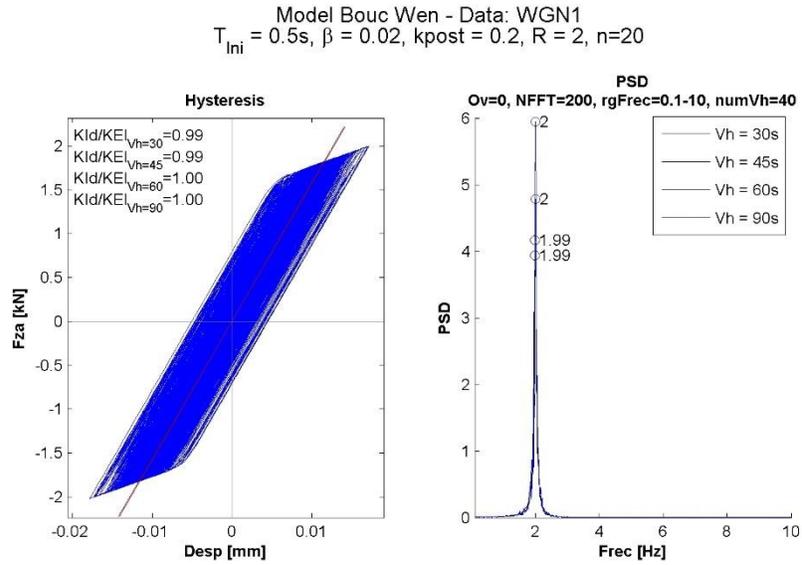


FIGURA 28: PSD PARA SISTEMA BILINEAL DE BAJA NO LINEALIDAD, KPOST ALTO. TRANSICIÓN A LA FLUENCIA SÚBITA ($n=20$).

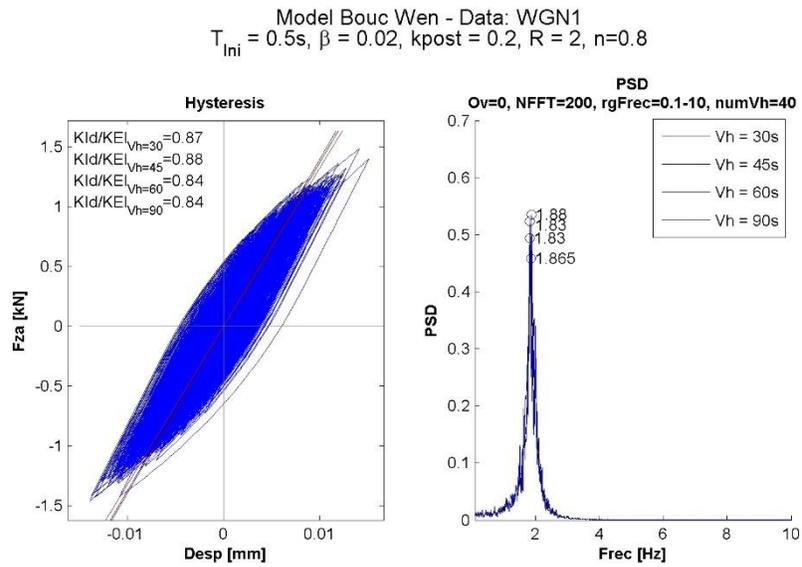


FIGURA 29: PSD PARA SISTEMA BILINEAL DE BAJA NO LINEALIDAD, KPOST ALTO. TRANSICIÓN A LA FLUENCIA MUY SUAVE ($n=0.8$).

Alta no linealidad ($R = 8$), Rigidez post fluencia nula ($K_{post} = 0$)

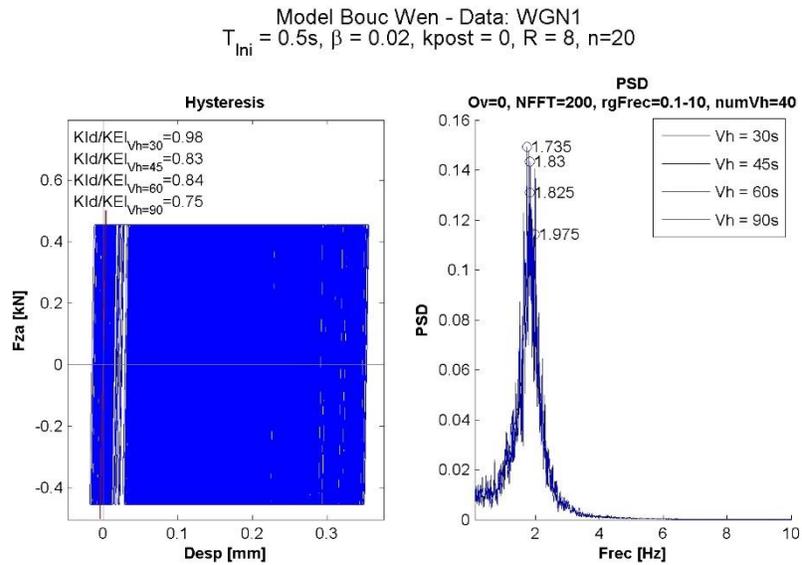


FIGURA 30: PSD PARA SISTEMA ELASTOPLÁSTICO. TRANSICIÓN A LA FLUENCIA SÚBITA ($n=20$)

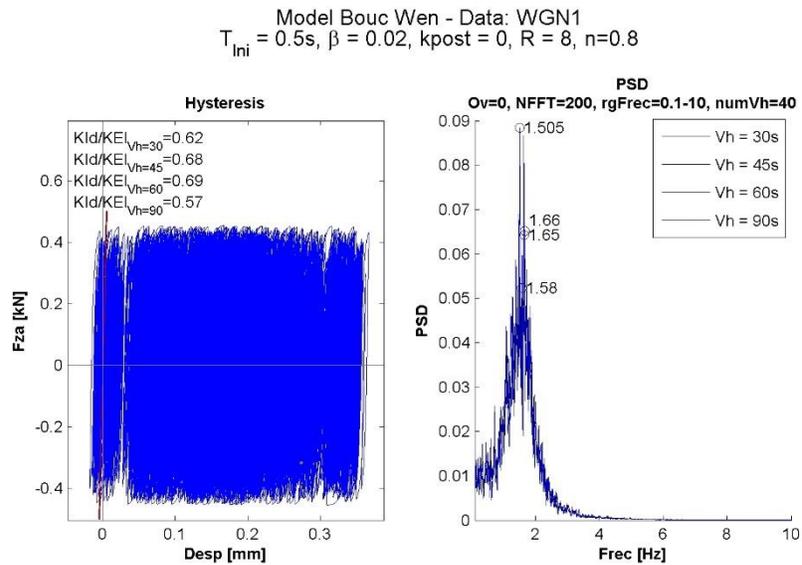


FIGURA 31: PSD PARA SISTEMA ELASTOPLÁSTICO. TRANSICIÓN A LA FLUENCIA MUY SUAVE ($n=0.8$).

Alta no linealidad ($R = 8$), Rigidez post fluencia alta ($K_{post} = 20\%$)

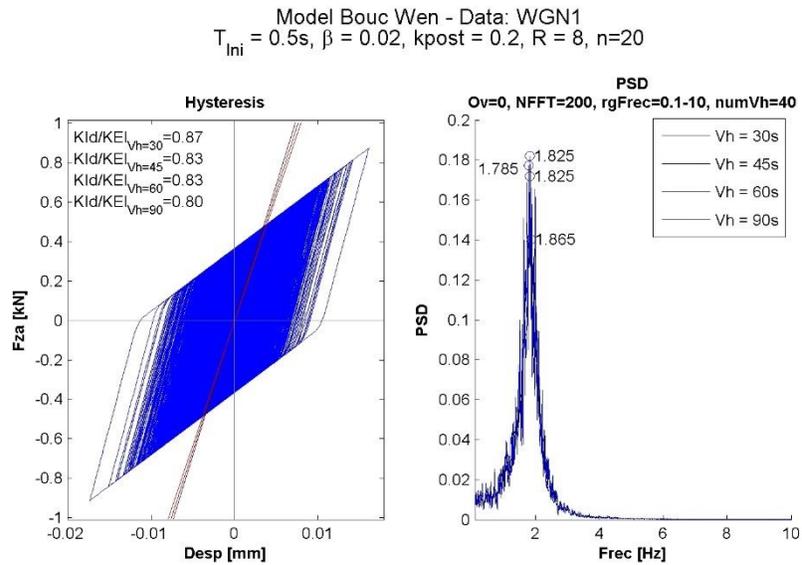


FIGURA 32: PSD PARA SISTEMA BILINEAL DE ALTA NO LINEALIDAD, KPOST ALTO. TRANSICIÓN A LA FLUENCIA SÚBITA ($n=20$).

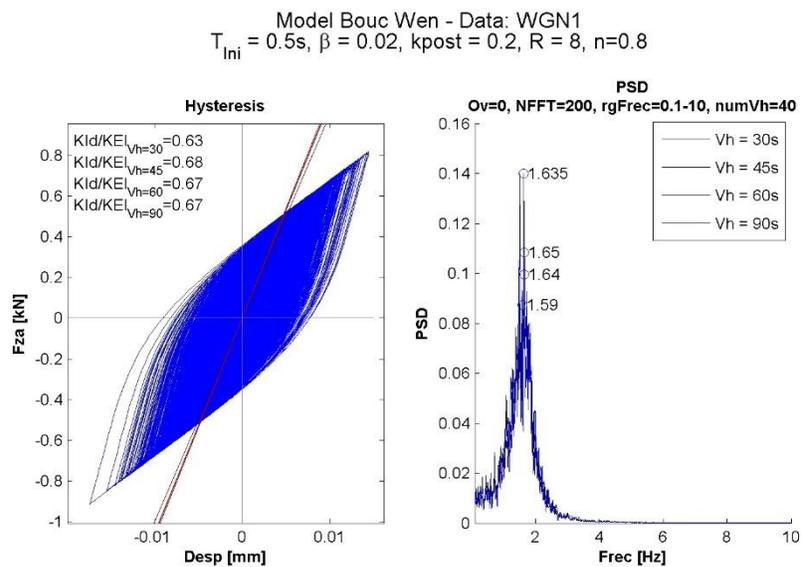


FIGURA 33: PSD PARA SISTEMA BILINEAL DE ALTA NO LINEALIDAD, KPOST ALTO. TRANSICIÓN A LA FLUENCIA MUY SUAVE ($n=0.8$).

Las frecuencias identificadas en cada caso, se relacionan con una rigidez equivalente a través de (97). Esta rigidez normalizada por la rigidez inicial del sistema se presenta en la Tabla 5 a Tabla 8. Las Figura 34 a la Figura 37 reflejan gráficamente esta información.

Periodo inicial sistema [s]	Tiempo de ventana de identificación [s]	$n = 20$	$n = 5$	$n = 2$	$n = 0.8$
$T_{ini} = 0.2$	30	0.98	0.98	0.98	0.82
	45	0.98	0.98	0.95	0.82
	60	1	0.98	0.98	0.82
	90	0.98	0.98	0.98	0.91
$T_{ini} = 0.5$	30	0.99	0.98	0.97	0.86
	45	0.99	0.99	0.99	0.83
	60	1	1	1	0.84
	90	1	1	1	0.84
$T_{ini} = 1.5s$	30	1.01	1.01	0.97	0.81
	45	1	0.98	0.95	0.84
	60	1	0.98	0.94	0.82
	90	1.01	1	1	0.82

TABLA 5: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN PSD SOBRE SISTEMA BILINEAL DE BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 2, n = 20$): RIGIDEZ IDENTIFICADA (K_{ID}) NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

Periodo inicial sistema [s]	Tiempo de ventana de identificación [s]	$n = 20$	$n = 5$	$n = 2$	$n = 0.8$
$T_{ini} = 0.2$	30	0.98	0.98	0.98	0.91
	45	0.98	0.98	0.95	0.86
	60	1	0.98	0.98	0.85
	90	0.98	0.98	0.98	0.91
$T_{ini} = 0.5$	30	0.99	0.98	0.97	0.87
	45	0.99	0.99	0.99	0.88
	60	1	1	1	0.84
	90	1	1	1	0.84
$T_{ini} = 1.5s$	30	1.01	1.01	0.98	0.81
	45	1	0.98	0.95	0.84
	60	1	0.98	0.94	0.82
	90	1.01	1	1	0.82

TABLA 6: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN PSD SOBRE SISTEMA BILINEAL DE ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 8, n = 20$): RIGIDEZ IDENTIFICADA (K_{ID}) NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

Periodo inicial sistema [s]	Tiempo de ventana de identificación [s]	$n = 20$	$n = 5$	$n = 2$	$n = 0.8$
$T_{ini} = 0.2$	30	0.91	0.82	0.82	0.66
	45	0.82	0.82	0.82	0.66
	60	0.82	0.82	0.82	0.53
	90	0.91	0.73	0.73	0.73
$T_{ini} = 0.5$	30	0.98	0.87	0.81	0.62
	45	0.83	0.83	0.68	0.68
	60	0.84	0.84	0.83	0.69
	90	0.75	0.75	0.67	0.57
$T_{ini} = 1.5s$	30	0.8	0.78	0.77	0.55
	45	0.81	0.81	0.6	0.6
	60	0.82	0.81	0.81	0.6
	90	0.82	0.82	0.62	0.45

TABLA 7: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN PSD SOBRE SISTEMA BILINEAL DE BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 2, n = 20$): RIGIDEZ IDENTIFICADA (K_{ID}) NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

Periodo inicial sistema [s]	Tiempo de ventana de identificación [s]	$n = 20$	$n = 5$	$n = 2$	$n = 0.8$
$T_{ini} = 0.2$	30	0.82	0.82	0.82	0.66
	45	0.86	0.82	0.82	0.66
	60	0.82	0.82	0.82	0.82
	90	0.91	0.82	0.73	0.73
$T_{ini} = 0.5$	30	0.87	0.86	0.81	0.63
	45	0.83	0.83	0.83	0.68
	60	0.83	0.83	0.83	0.67
	90	0.8	0.8	0.67	0.67
$T_{ini} = 1.5s$	30	0.8	0.78	0.77	0.56
	45	0.82	0.82	0.69	0.6
	60	0.82	0.82	0.81	0.6
	90	0.82	0.82	0.68	0.59

TABLA 8: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN PSD SOBRE SISTEMA BILINEAL DE ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 8, n = 20$): RIGIDEZ IDENTIFICADA (K_{ID}) NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

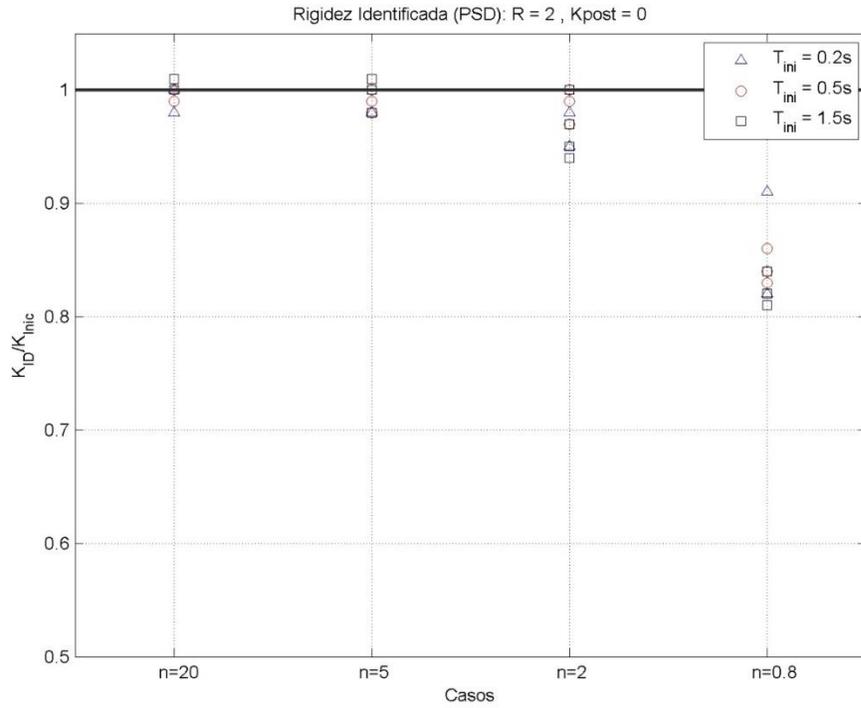


FIGURA 34: RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA. SISTEMA ELASTOPLASTICO DE BAJA NO LINEALIDAD PARA DISTINTAS SUAVIDADES DE LA CURVA DE HISTÉRESIS: $n = 20, 5, 2,$ Y 0.8 .

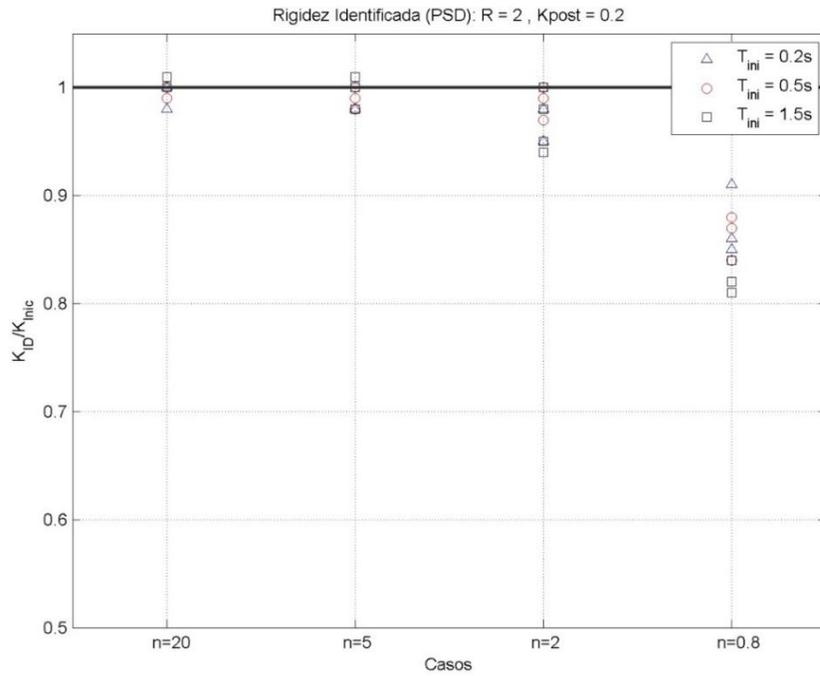


FIGURA 35: RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA. SISTEMA BILINEAL DE BAJA NO LINEALIDAD PARA DISTINTAS SUAVIDADES DE LA CURVA DE HISTÉRESIS: $n = 20, 5, 2,$ Y 0.8 .

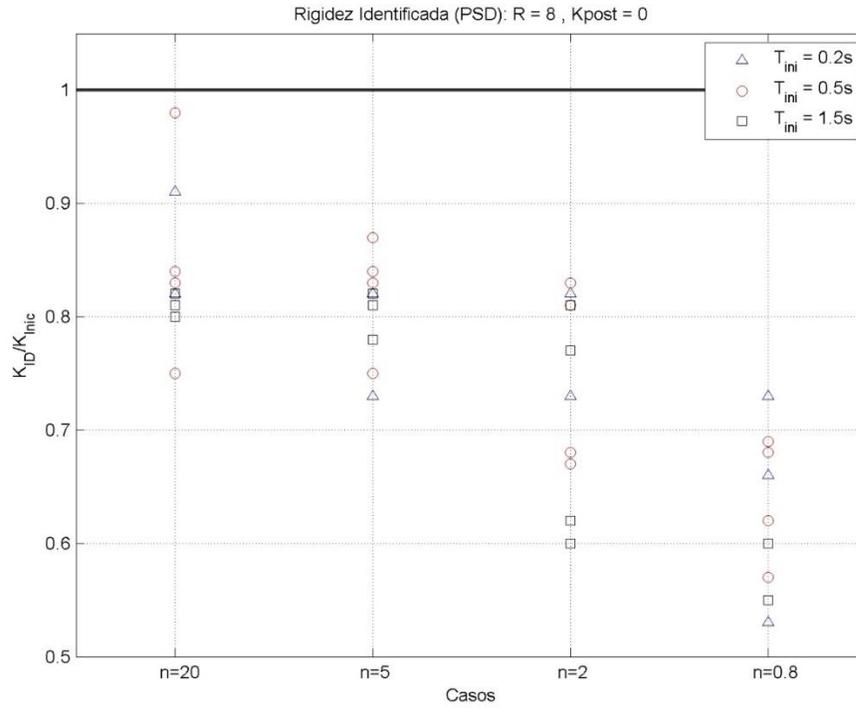


FIGURA 36: RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA. SISTEMA ELASTOPLASTICO DE ALTA NO LINEALIDAD, PARA DISTINTAS SUAVIDADES DE LA CURVA DE HISTÉRESIS: $n = 20, 5, 2,$ Y 0.8 .

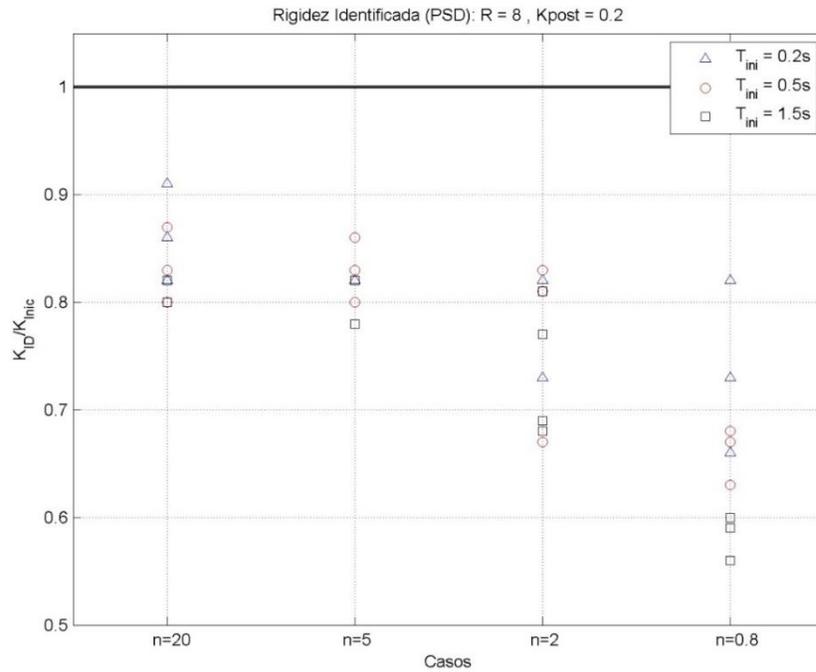


FIGURA 37: RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA. SISTEMA BILINEAL DE ALTA NO LINEALIDAD PARA DISTINTAS SUAVIDADES DE LA CURVA DE HISTÉRESIS: $n = 20, 5, 2,$ Y 0.8 .

CASO 4: IDENTIFICACIÓN SOBRE PULSO

Se realizó un caso especial donde se analizaba la lectura con la técnica PSD de un oscilador que se mantiene oscilando en el campo lineal y elástico durante 60 minutos, salvo en el momento en que es solicitado por un gran pulso que le produce una única incursión en el rango no lineal. Se analizaron tres casos. El primero cuando el pulso ocurre a $0.1 t_f$, el segundo cuando ocurre en $0.5 t_f$, y el tercero cuando ocurre a $0.9 t_f$, siendo t_f el tiempo total del registro (3600 segundos). La Figura 38 muestra la aceleración de los sistemas.

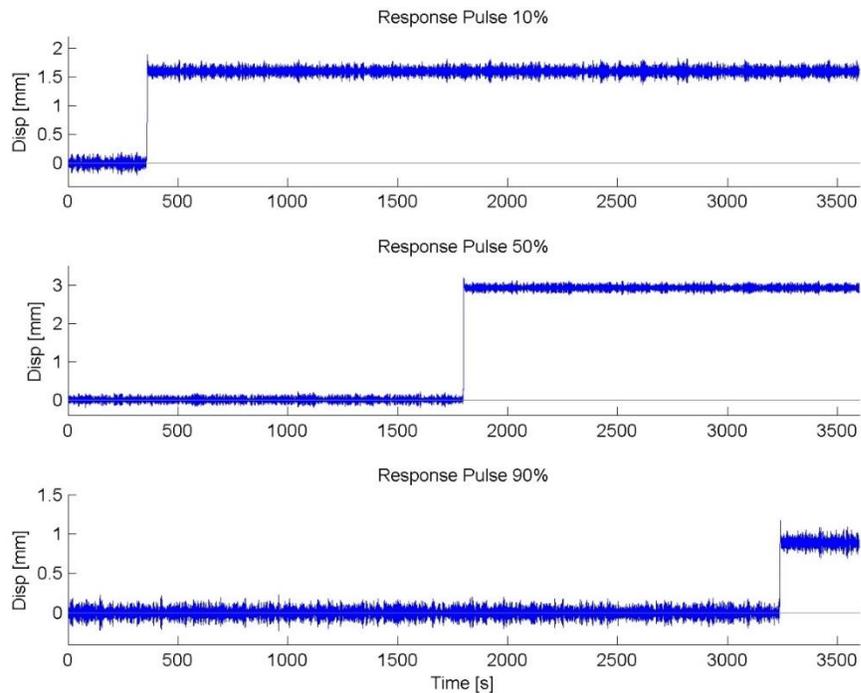


FIGURA 38: DESPLAZAMIENTO DE OSCILADOR SOMETIDO A UN PULSO QUE LO HACE INCURSIONAR UNA ÚNICA VEZ EN EL RANGO NO LINEAL.

La histéresis de dos de los sistemas, así como su espectro potencia y frecuencia identificada con la técnica PSD se muestran en las Figura 39 y Figura 40. La respuesta de estos sistemas se muestra tabulada en la Tabla 9.

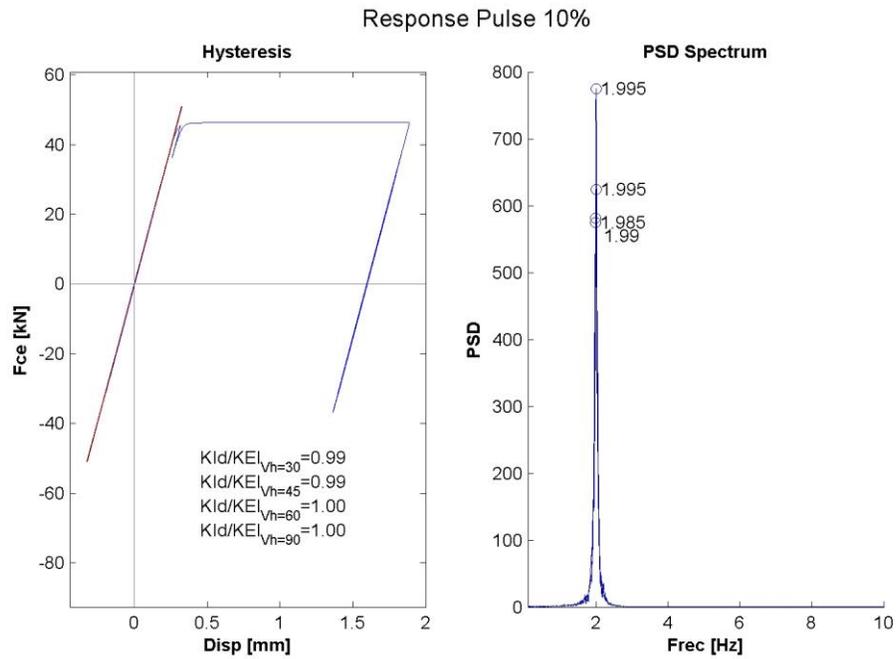


FIGURA 39: HISTÉRESIS Y ESPETRO DENSIDAD DE POTENCIA PARA PULSO EN EL INICIO DEL REGISTRO

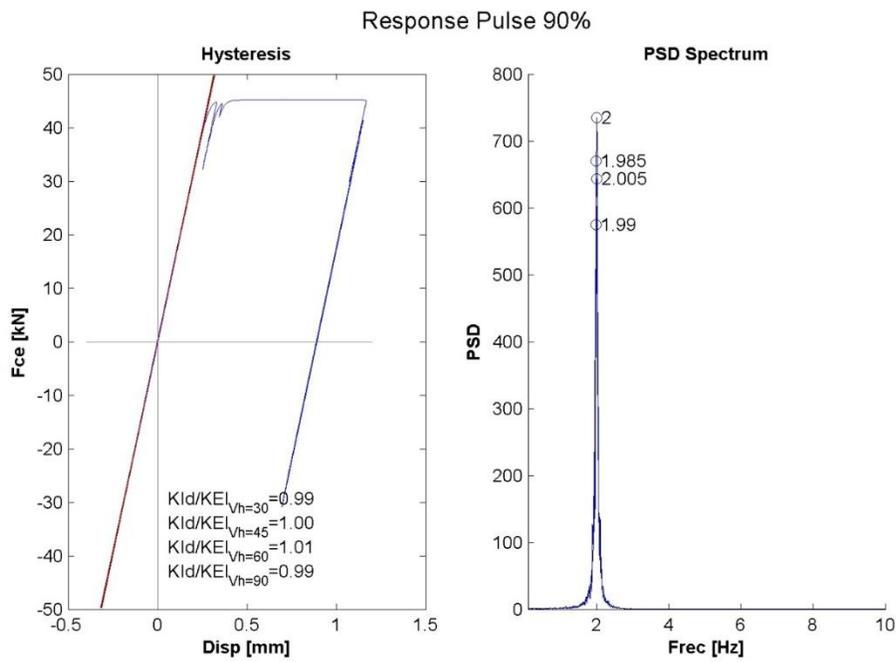


FIGURA 40: HISTÉRESIS Y ESPETRO DENSIDAD DE POTENCIA PARA PULSO EN EL FIANL DEL REGISTRO

Largo ventana	t=10%	t=50%	t=90%
---------------	-------	-------	-------

Vh = 30s	0.99	0.98	0.99
Vh = 45s	0.99	0.98	1.00
Vh = 60s	1.00	1.01	1.01
Vh = 90s	1.00	1.00	0.99

TABLA 9: RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA PARA CASO DE PULSO ÚNICO

4.3 IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV

Se presentarán a continuación los resultados del análisis con identificación paramétrica en el subespacio estocástico, SSI-COV.

CASO 1: SISTEMA ELASTOPLÁSTICO INCURSIONANDO EN EL RANGO NO-LINEAL.

Para los casos del sistema elastoplástico ($K_{post} = 0, n = 20$), en que la incursión en el rango no lineal va aumentando progresivamente, ($R = 0.8, 2, 5$ y 10), se identificó una frecuencia principal luego del proceso de selección automática, la cual se relaciona con su rigidez identificada a través de (97). Esta cantidad se encuentra normalizada por la rigidez inicial en la para cada caso de R . Para todos ellos, se muestra esta cantidad en la Tabla 10 y representada en las Figura 41 y Figura 42, en las que se muestra la rigidez y amortiguamiento identificado, respectivamente.

Adicionalmente, para el último caso con $R = 10$, se muestra la histéresis, rigidez identificada, diagrama de Estabilización y Cluster en la Figura 43.

	T_{ini}	$R = 0.8$	$R = 2$	$R = 5$	$R = 10$
K_{ID}/K_{EL}	0.2	0.99	0.99	0.95	0.84
	0.5	1.00	1.00	0.95	0.84
	1.5	1.00	1.00	0.93	0.79
β_{ID}	0.2	1.9%	2.4%	7.0%	20.5%
	0.5	2.2%	2.8%	8.4%	23.3%
	1.5	2.0%	2.7%	9.1%	23.7%

TABLA 10: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA ELASTOPLÁSTICO A DISTINTOS RANGOS DE INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL

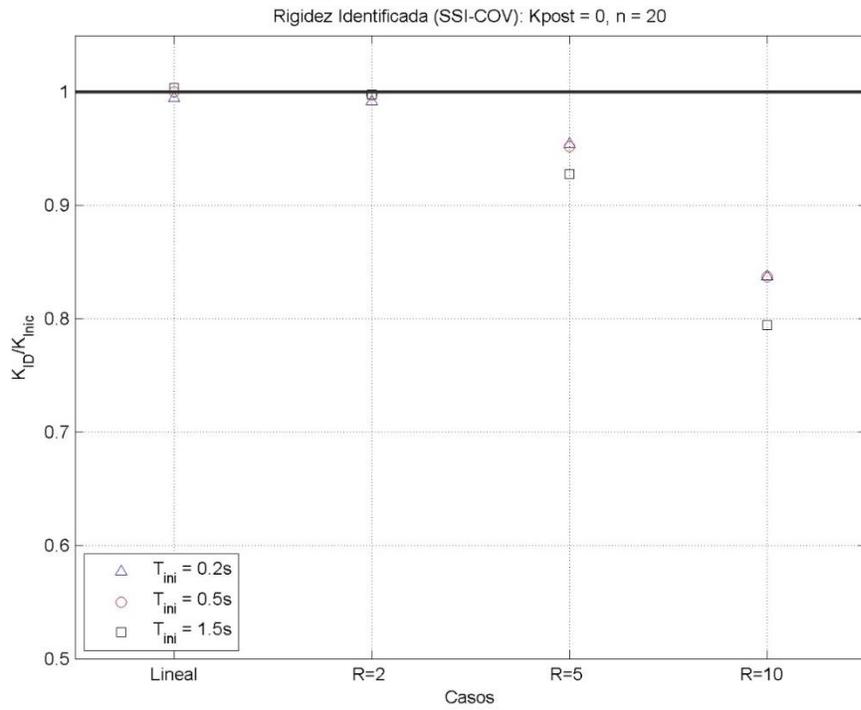


FIGURA 41: IDENTIFICACIÓN SOBRE SISTEMA ELASTOPLÁSTICO. RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL.

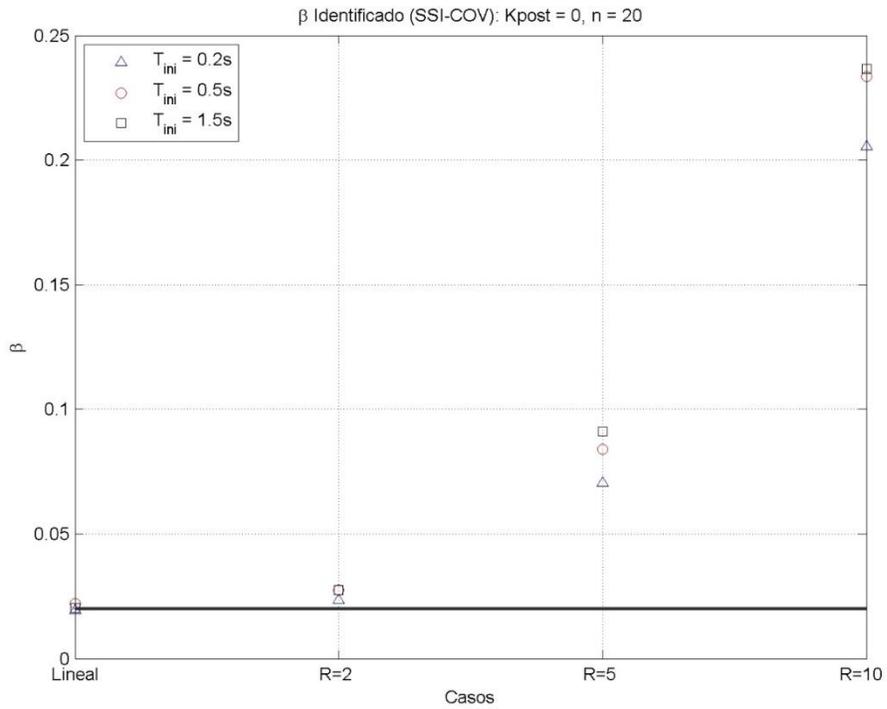


FIGURA 42: AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO PARA SISTEMA ELASTOPLÁSTICO SOMETIDO A DISTINTOS NIVELES DE NO LINEALIDAD.

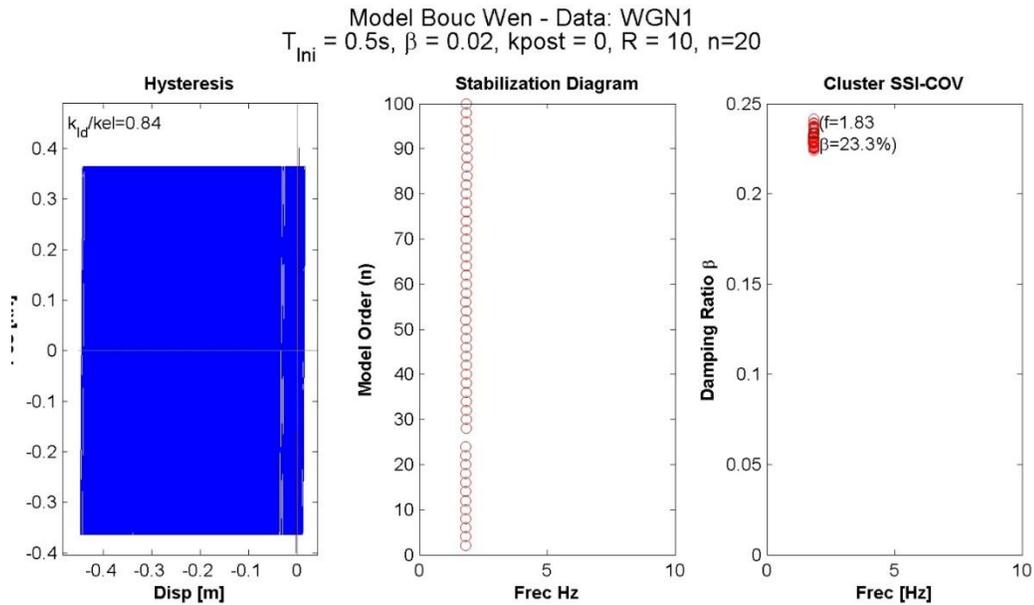


FIGURA 43: IDENTIFICACIÓN SOBRE SISTEMA ELASTOPLÁSTICO CON ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL. HISTÉRESIS, DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER CORRESPONDIENTE A CASO $R = 10$.

CASO 2: AUMENTO DE LA RIGIDEZ POST-FLUENCIA.

Para los casos en que el sistema permanece bilineal ($R > 1, n = 20$), y la rigidez post-fluencia aumenta progresivamente, ($K_{post} = 0, 2\%, 20\%$ y 50%), se identificó una frecuencia principal luego del proceso de selección automática, la cual se relaciona con su rigidez identificada a través de (97).

Esta cantidad se muestra para las variaciones de un sistema que mantiene una baja no linealidad ($R = 2$), y otro para un sistema que mantiene una alta no linealidad ($R = 8$). Los resultados del primer sistema se muestran en la Tabla 11, mostrando rigidez y amortiguamiento identificado. La Figura 44 y Figura 45 muestran esta cantidad representada una figura.

	T_{ini}	Kpost 0	Kpost 2%	Kpost 20%	Kpost 50%
K_{ID}/K_{EL}	0.2	0.99	0.99	0.99	0.99
	0.5	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.5	1.00	1.00	1.00	1.00
β_{ID}	0.2	2.4%	2.3%	2.3%	2.3%
	0.5	2.8%	2.7%	2.7%	2.7%
	1.5	2.7%	2.7%	2.7%	2.6%

TABLA 11: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UN BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA, Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

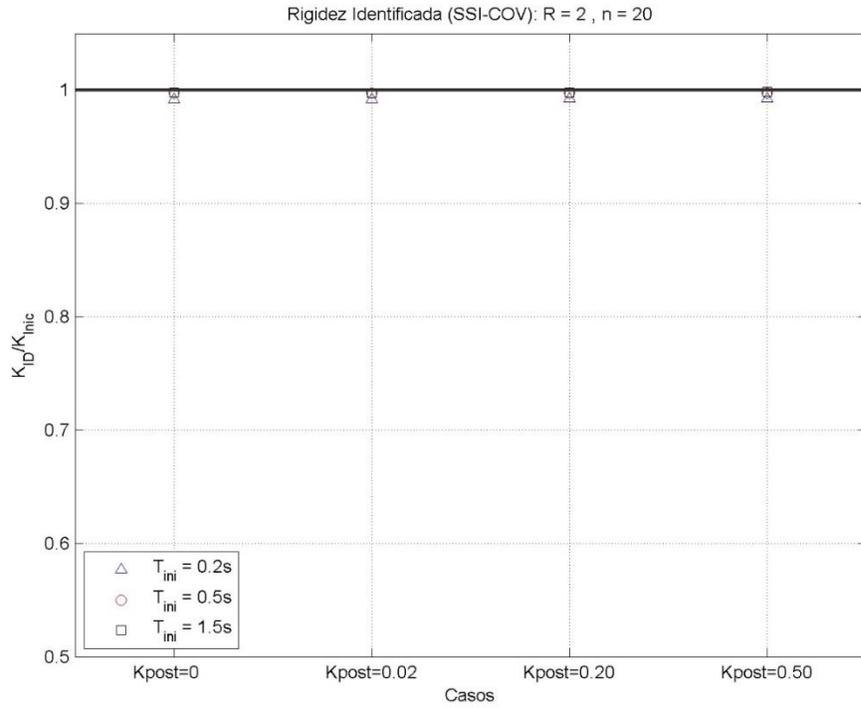


FIGURA 44: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UN BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

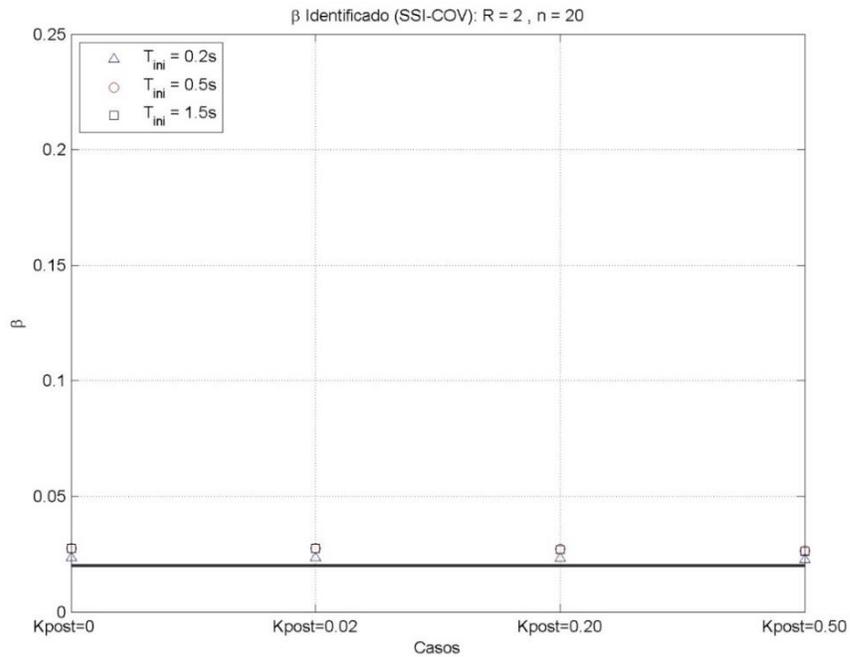


FIGURA 45: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UN BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 2$): AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Los resultados del segundo caso, esto es, el sistema en que se aumenta la rigidez post fluencia manteniendo una alta no linealidad ($R = 8$), se muestran en la Tabla 12, mostrando rigidez y amortiguamiento identificado. A su vez, la Figura 46 y Figura 47 Figura 45 muestran estas cantidades representadas gráficamente.

	T_{ini}	Kpost 0	Kpost 2%	Kpost 20%	Kpost 50%
K_{ID}/K_{EL}	0.2	0.89	0.89	0.88	0.88
	0.5	0.88	0.88	0.87	0.85
	1.5	0.84	0.84	0.83	0.84
β_{ID}	0.2	14.5%	14.5%	13.6%	11.5%
	0.5	16.4%	16.4%	15.6%	11.8%
	1.5	18.0%	17.9%	16.3%	11.6%

TABLA 12: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UNA ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 8$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA, Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

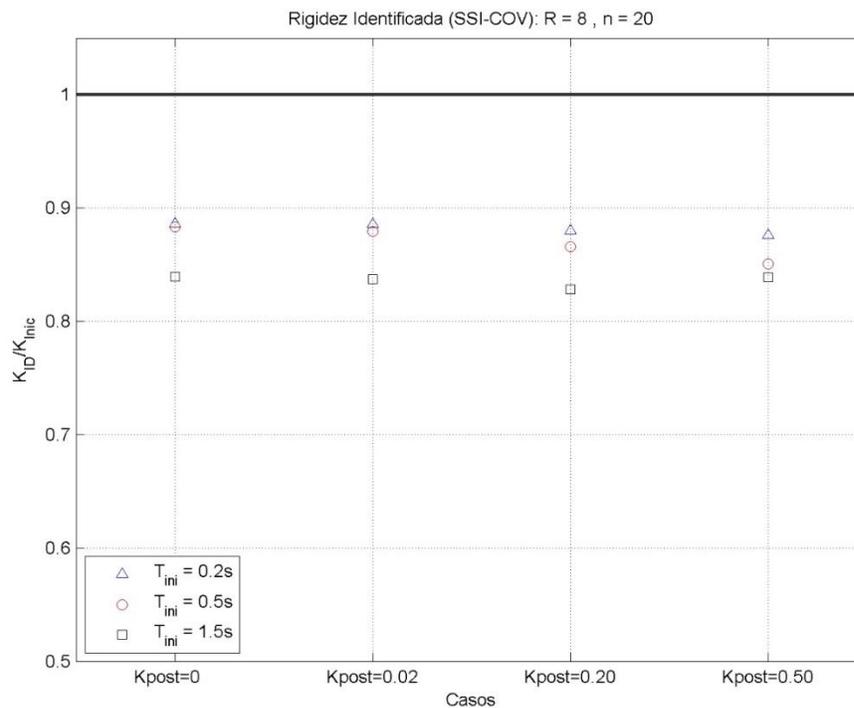


FIGURA 46: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UNA ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 8$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

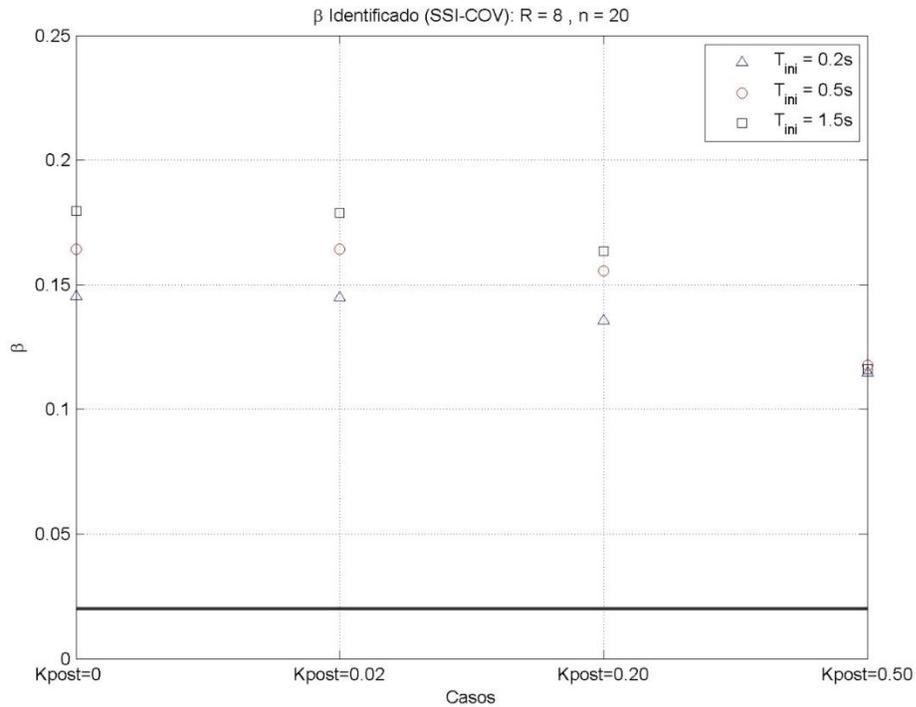


FIGURA 47: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UN ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 8$): AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Adicionalmente, para el caso de baja no linealidad y parámetro K_{post} alto, igual a 50%, se muestra la histéresis, rigidez identificada, y los resultados específicos de la identificación en la Figura 48.

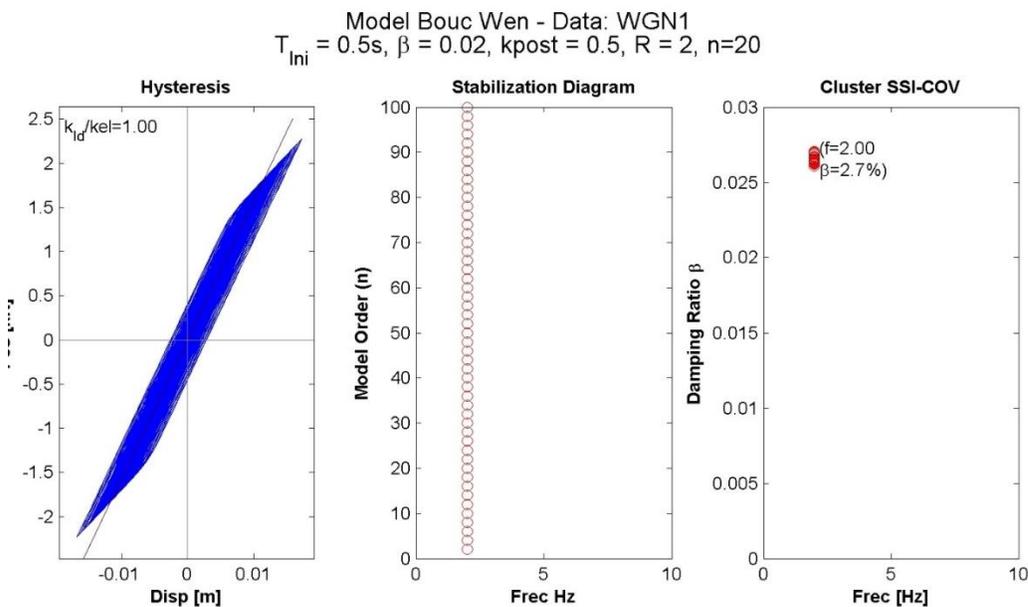


FIGURA 48: IDENTIFICACIÓN SOBRE SISTEMA BILINEAL CON ALTA RIGIDEZ POST FLUENCIA ($K_{POST} = 50\%$) Y BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL. DE IZQUIERDA A DERECHA: HISTÉRESIS, DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DEL PROCESO.

CASO 3: SUAVIZACIÓN EN TRANSICIÓN A LA FLUENCIA.

El caso 3 presenta las variaciones de los parámetros identificados cuando se suaviza la caída de rigidez en la transición hacia la fluencia, es decir, cuando el parámetro n disminuye. Todo esto se hace para distintos niveles de no linealidad (valores de R), y de rigidez post fluencia (valores de K_{post}).

Para el caso de baja no linealidad y rigidez post fluencia nula, se muestran los resultados en la Tabla 13. La Figura 49 muestra gráficamente los resultados de la rigidez identificada, mientras que la Figura 50 lo hace con el amortiguamiento.

	T_{ini}	$n = 20$	$n = 5$	$n = 2$	$n = 0.8$
K_{ID}/K_{EL}	0.2	0.99	0.98	0.96	0.86
	0.5	1.00	0.99	0.96	0.87
	1.5	1.00	0.99	0.96	0.87
β_{ID}	0.2	2.4%	3.0%	4.7%	8.9%
	0.5	2.8%	3.4%	5.3%	9.6%
	1.5	2.7%	3.3%	5.1%	9.2%

TABLA 13: IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$); RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

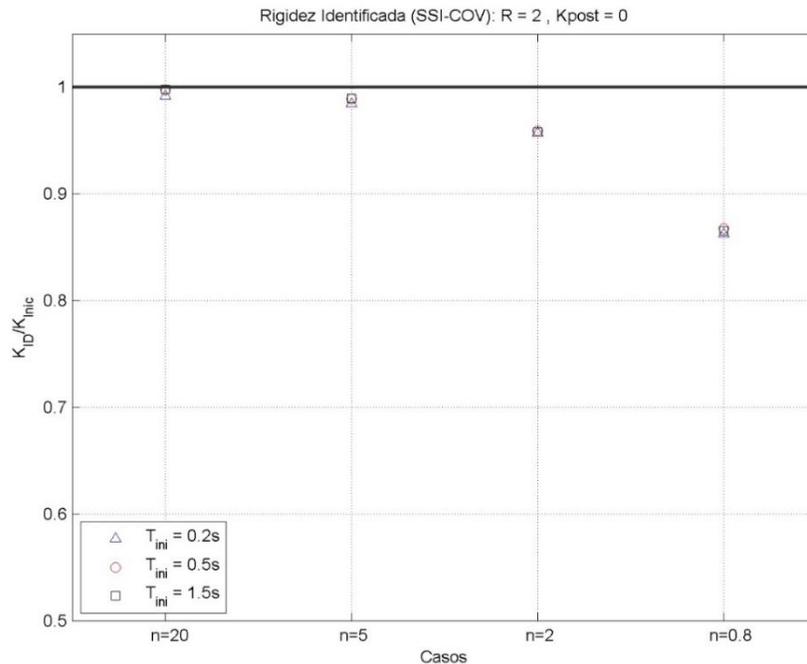


FIGURA 49: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$); RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL.

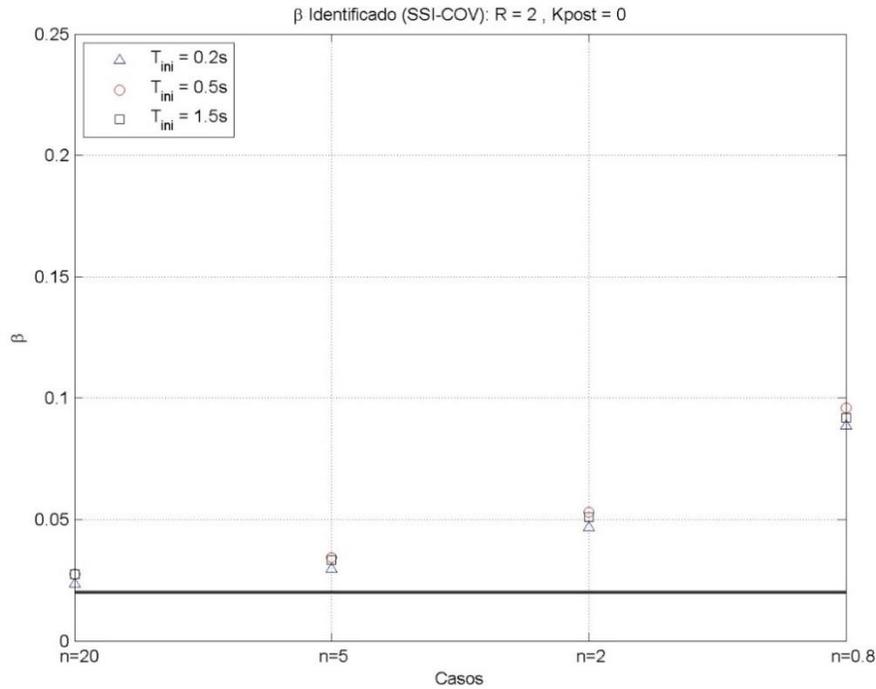


FIGURA 50: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$); AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Para el caso de baja no linealidad y rigidez post fluencia 20%, se muestran los resultados en la Tabla 14. La Figura 51 muestra gráficamente los resultados de la rigidez identificada, mientras que la Figura 51 lo hace con el amortiguamiento.

	T_{ini}	n = 20	n = 5	n = 2	n = 0.8
K_{ID}/K_{EL}	0.2	0.99	0.99	0.96	0.88
	0.5	1.00	0.99	0.96	0.88
	1.5	1.00	0.99	0.96	0.88
β_{ID}	0.2	2.3%	2.8%	4.3%	7.6%
	0.5	2.7%	3.3%	4.9%	8.3%
	1.5	2.7%	3.2%	4.7%	7.8%

TABLA 14: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$); RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

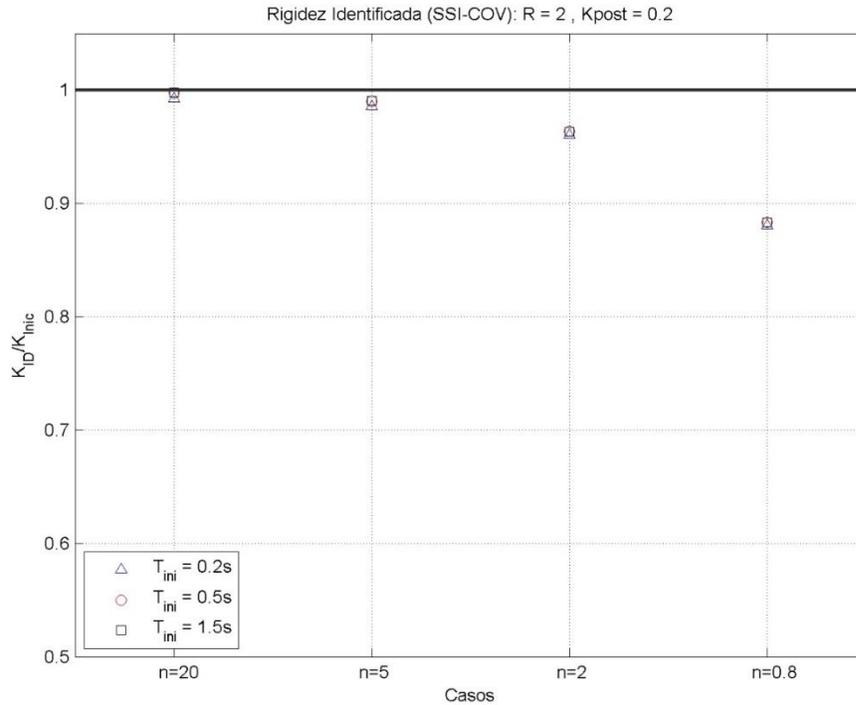


FIGURA 51: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL.

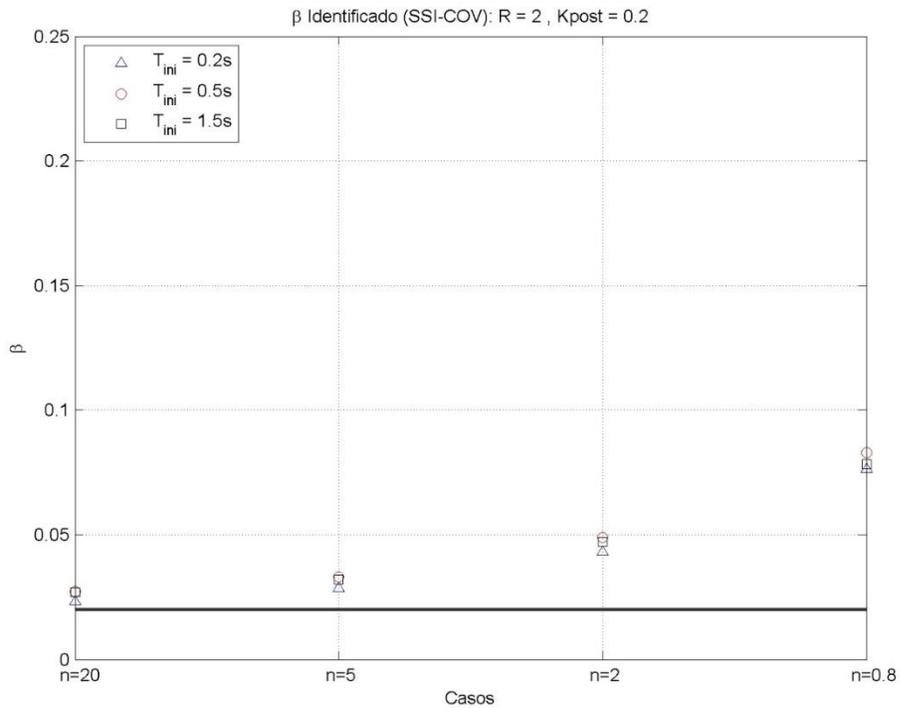


FIGURA 52: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Para el caso de alta no linealidad y rigidez post fluencia nula, se muestran los resultados en la Tabla 15. La Figura 53 muestra gráficamente los resultados de la rigidez identificada, mientras que la Figura 54 muestra el amortiguamiento.

	T_{ini}	$n = 20$	$n = 5$	$n = 2$	$n = 0.8$
K_{ID}/K_{EL}	0.2	0.89	0.86	0.80	0.67
	0.5	0.88	0.86	0.80	0.68
	1.5	0.84	0.82	0.78	0.67
β_{ID}	0.2	14.5%	15.4%	17.9%	22.8%
	0.5	16.4%	17.5%	19.7%	24.7%
	1.5	18.0%	18.5%	20.3%	24.9%

TABLA 15: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

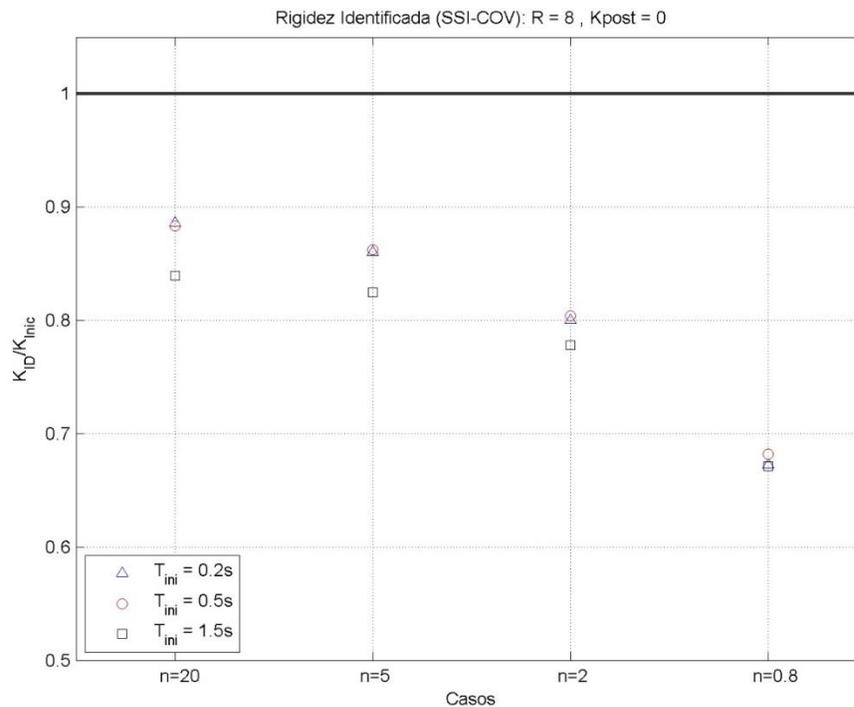


FIGURA 53: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL.

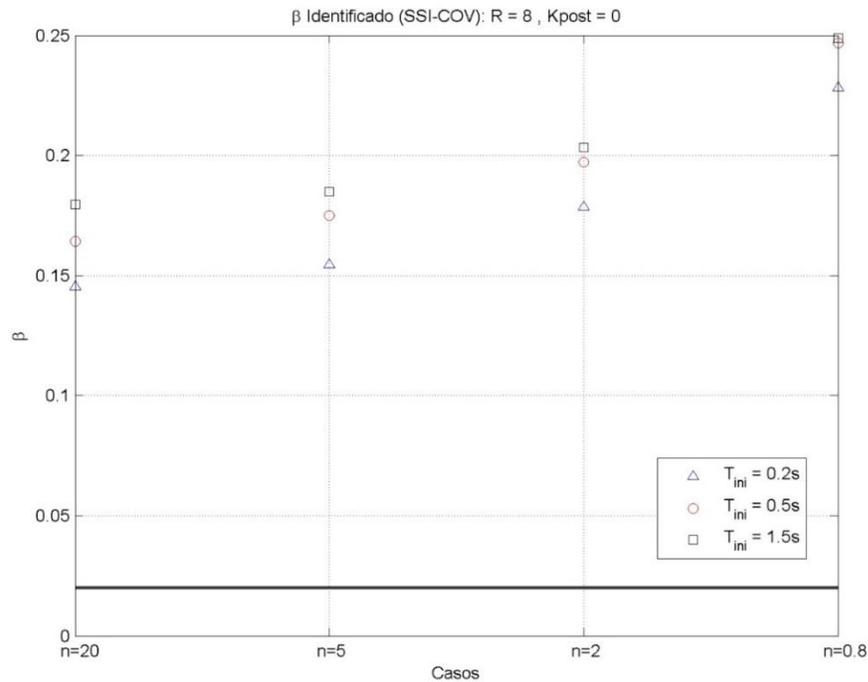


FIGURA 54: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$): RAZON DE AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Para el caso de alta no linealidad y rigidez post fluencia de 20%, se muestran los resultados en la Tabla 16: . La Figura 55 muestra gráficamente los resultados de la rigidez identificada, mientras que la Figura 56 muestra el amortiguamiento.

	T _{ini}	n = 20	n = 5	n = 2	n = 0.8
K _{ID} /K _{EL}	0.2	0.88	0.86	0.80	0.70
	0.5	0.87	0.85	0.80	0.70
	1.5	0.83	0.82	0.78	0.68
β _{ID}	0.2	13.6%	14.2%	15.6%	18.3%
	0.5	15.6%	16.0%	17.2%	19.6%
	1.5	16.3%	16.7%	17.8%	20.7%

TABLA 16: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

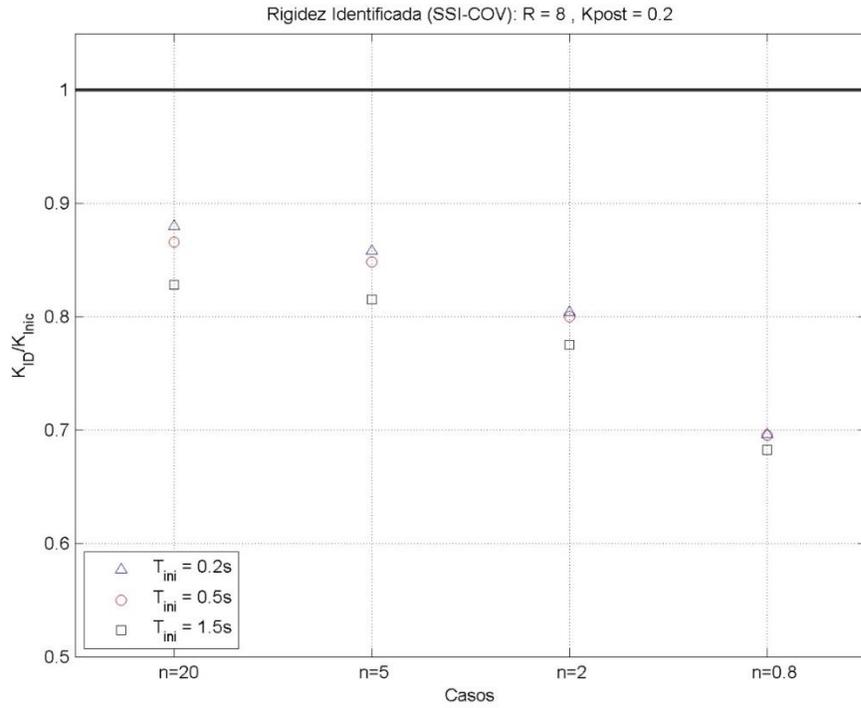


FIGURA 55: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL.

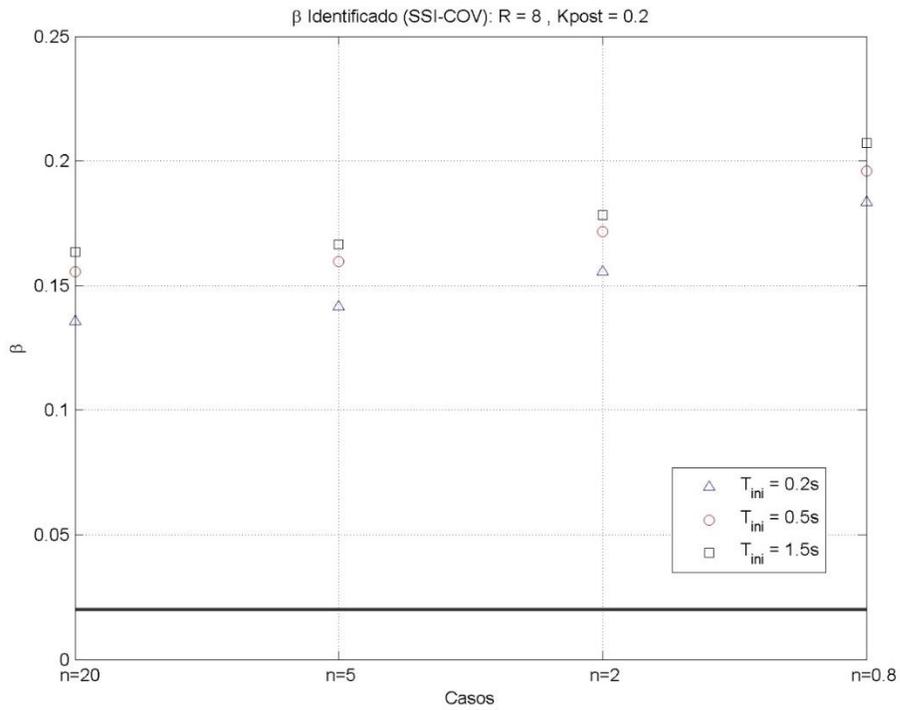


FIGURA 56: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

4.4 IDENTIFICACIÓN CON MOESP

Se presentarán a continuación los resultados del análisis con identificación paramétrica “Multivariable Output Error State Space”: MOESP. Se hicieron para el terremoto de Melipilla descrito en el capítulo 4, y se presentan los resultados a continuación. Se prefieren, tal como para los casos anteriores, gráficos que muestren los resultados por sub-casos, en los cuales se varía un parámetro manteniendo los otros constantes, y mostrar gráficos representativos de algunas identificaciones particular, detallando histéresis, diagrama de estabilización, filtrado y Cluster.

CASO 1: SISTEMA ELASTOPLÁSTICO INCURSIONANDO EN EL RANGO NO-LINEAL.

Para los casos del sistema Elastoplástico ($K_{post} = 0, n = 20$), en que la incursión en el rango no lineal va aumentando progresivamente, ($R = 0.8, 2, 5$ y 10), se identificó una frecuencia principal luego del proceso de selección automática, la cual se relaciona con su rigidez identificada a través de (97). Esta cantidad se encuentra normalizada por la rigidez inicial en la para cada caso de R . Para todos ellos, se muestra esta cantidad relativa al primer modo en la Tabla 17 y representada en las Figura 57y Figura 58, en las que se muestra la rigidez y amortiguamiento identificado, respectivamente.

	Tini	R = 0.8	R = 2	R = 5	R = 10
KID/KEL	0.2	1.00	0.98	0.95	0.95
	0.5	1.00	0.98	0.93	0.88
	1.5	1.00	0.97	0.95	0.91
β_{ID}	0.2	2.0%	3.0%	4.4%	4.3%
	0.5	2.0%	3.8%	7.2%	7.3%
	1.5	2.0%	5.2%	10.3%	12.0%

TABLA 17: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA ELASTOPLÁSTICO A DISTINTOS RANGOS DE INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL

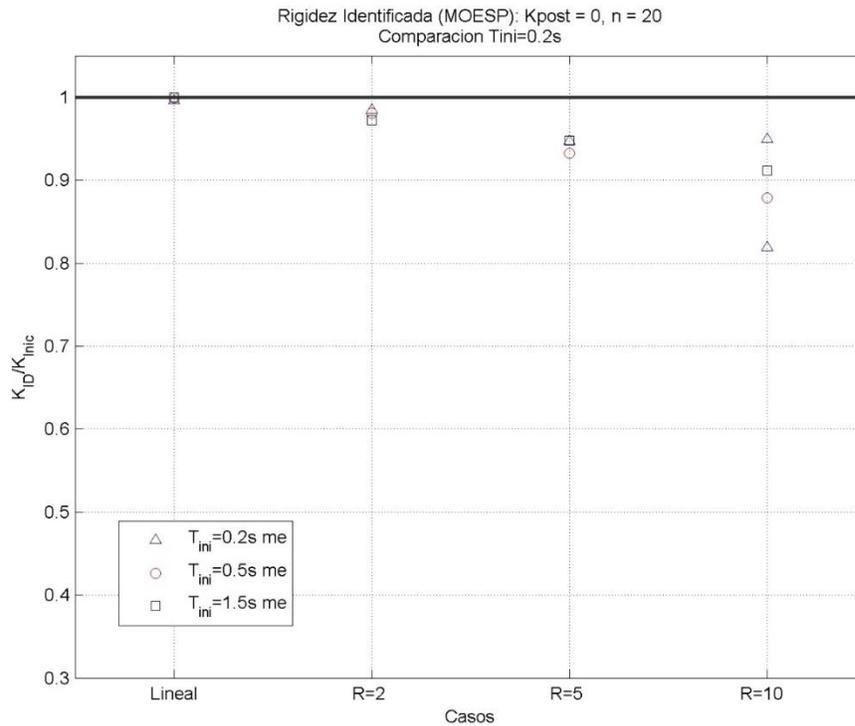


FIGURA 57: IDENTIFICACIÓN SOBRE SISTEMA ELASTOPLÁSTICO. RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL.

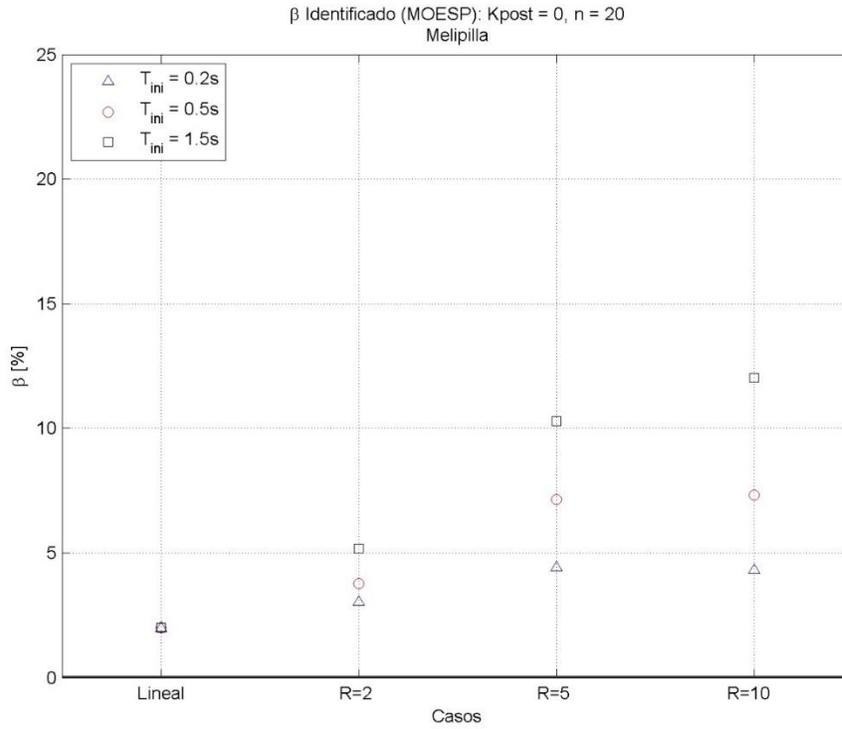


FIGURA 58: AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO PARA SISTEMA ELATOPLÁSTICO SOMETIDO A DISTINTOS NIVELES DE NO LINEALIDAD.

Adicionalmente se muestra el resultado de la identificación para $R = 10$, en la Figura 59.

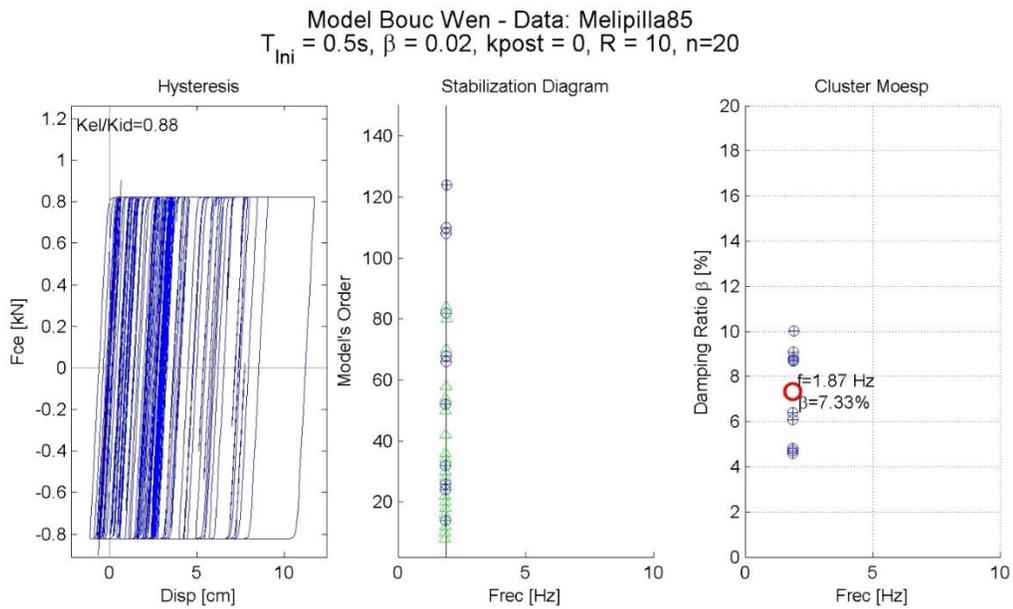


FIGURA 59: IDENTIFICACIÓN SOBRE SISTEMA ELASTOPLÁSTICO CON ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL. HISTÉRESIS, DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER CORRESPONDIENTE A CASO $R = 10$.

CASO 2: AUMENTO DE LA RIGIDEZ POST-FLUENCIA.

Para los casos en que el sistema permanece bilineal ($R > 1, n = 20$), y la rigidez post-fluencia aumenta progresivamente, ($K_{post} = 0, 2\%, 20\%$ y 50%), se identificó una frecuencia principal luego del proceso de selección automática, la cual se relaciona con su rigidez identificada a través de (97).

Esta cantidad se muestra para las variaciones de un sistema que mantiene una baja no linealidad ($R = 2$), y otro para un sistema que mantiene una alta no linealidad ($R = 8$). Los resultados del primer sistema se muestran en la Tabla 18, mostrando rigidez y amortiguamiento identificado. La Figura 62 y Figura 63 muestran esta cantidad representada una figura.

	Tini	Kpost 0	Kpost 2%	Kpost 20%	Kpost 50%
KID/KEL	0.2	0.98	0.98	0.98	0.98
	0.5	0.98	0.98	0.98	0.98
	1.5	0.97	0.97	0.96	0.96
β ID	0.2	3.0%	3.0%	3.1%	3.1%
	0.5	3.8%	3.8%	3.7%	3.4%
	1.5	5.2%	5.2%	5.2%	4.3%

TABLA 18: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UN BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA, Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

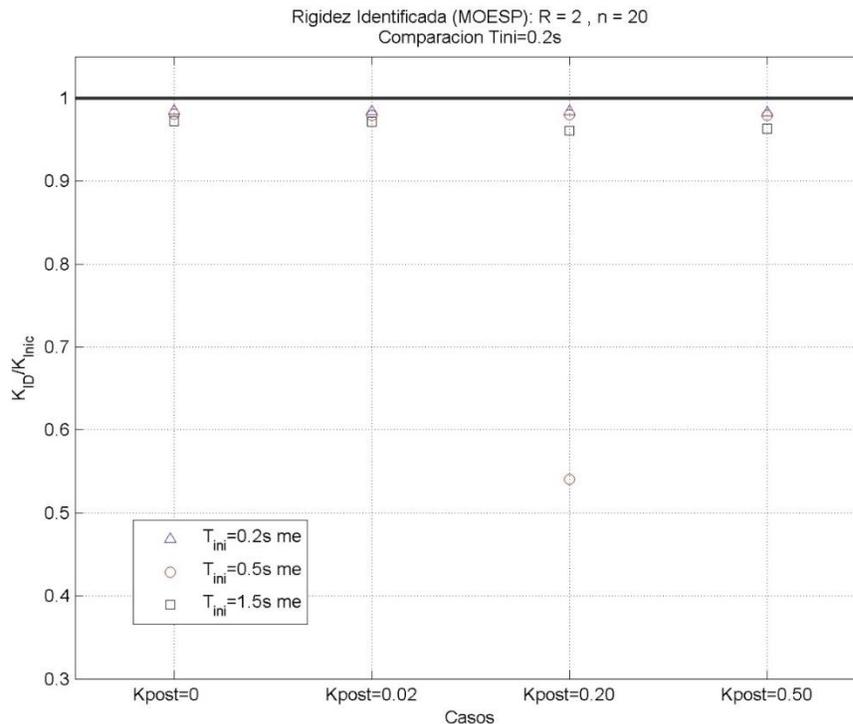


FIGURA 60: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UN BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

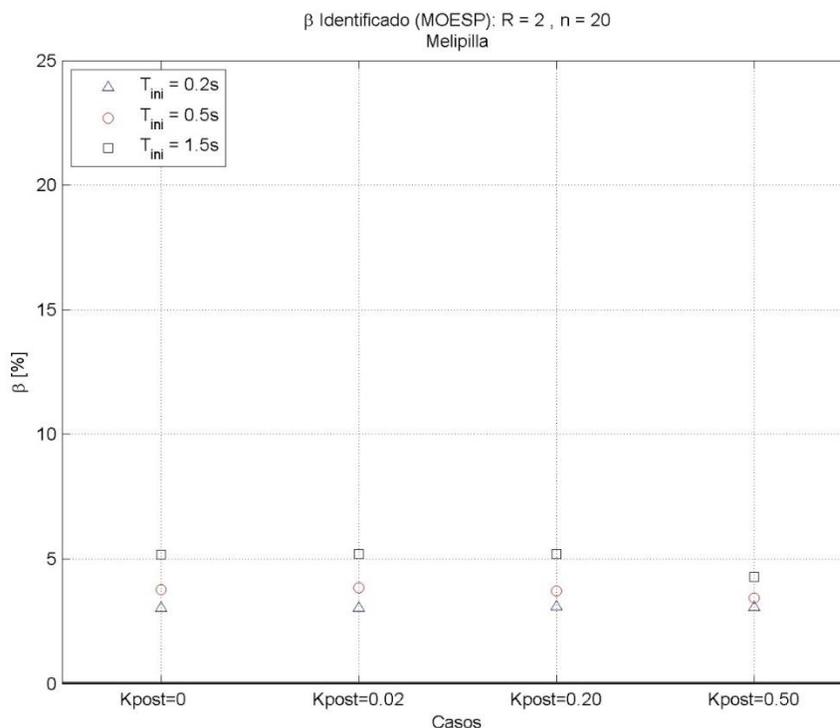


FIGURA 61: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UN BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 2$): AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Los resultados del segundo caso, esto es, el sistema en que se aumenta la rigidez post fluencia manteniendo una alta no linealidad ($R = 8$), se muestran en la Tabla 19, mostrando rigidez y amortiguamiento identificado. A su vez, la Figura 62 y Figura 63 muestran estas cantidades representadas gráficamente.

En el caso del sistema de $T_{ini} = 0.5s$ y $K_{post} = 2\%$, como en algunos otros procesados con MOESP, no se encontró modo alguno significativo, únicamente un modo de una enorme rigidez (37 veces la inicial) que se lee como modo espurio no filtrado, y ningún modo detectado significado. Está marcado en gris en la tabla así como su amortiguamiento.

	T_{ini}	$K_{post} 0$	$K_{post} 2\%$	$K_{post} 20\%$	$K_{post} 50\%$
K_{id}/K_{el}	0.2	0.61	0.86	0.62	0.62
	0.5	0.88	37.33	0.31	0.54
	1.5	0.92	0.92	0.91	0.77
β_{id}	0.2	6.6%	8.8%	7.0%	6.5%
	0.5	6.2%	2.2%	16.8%	7.9%
	1.5	11.0%	11.0%	12.9%	12.1%

TABLA 19: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UNA ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 8$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA, Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

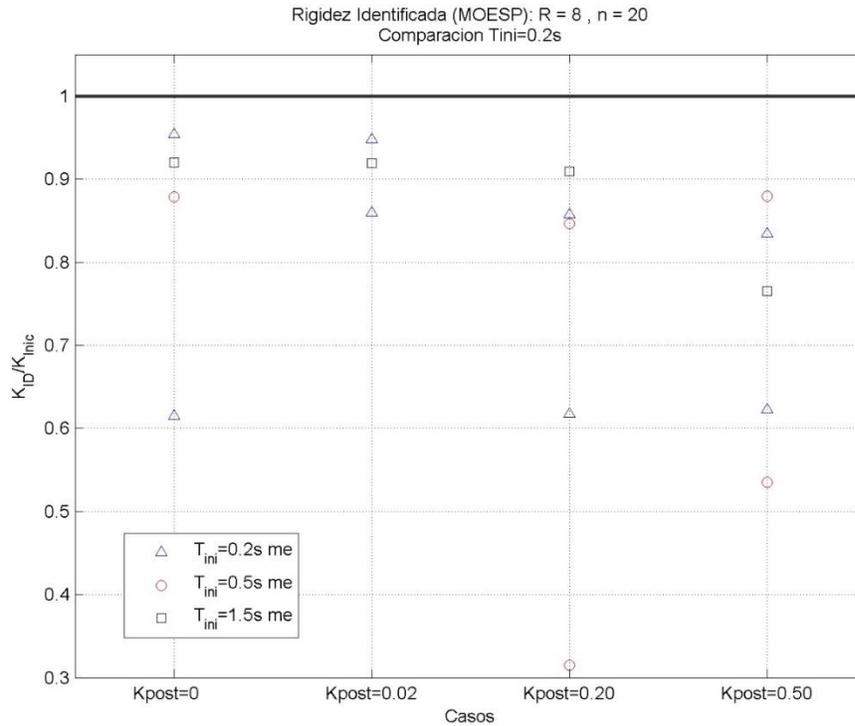


FIGURA 62: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UNA ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 8$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA RIGIDEZ INICIAL DEL SISTEMA.

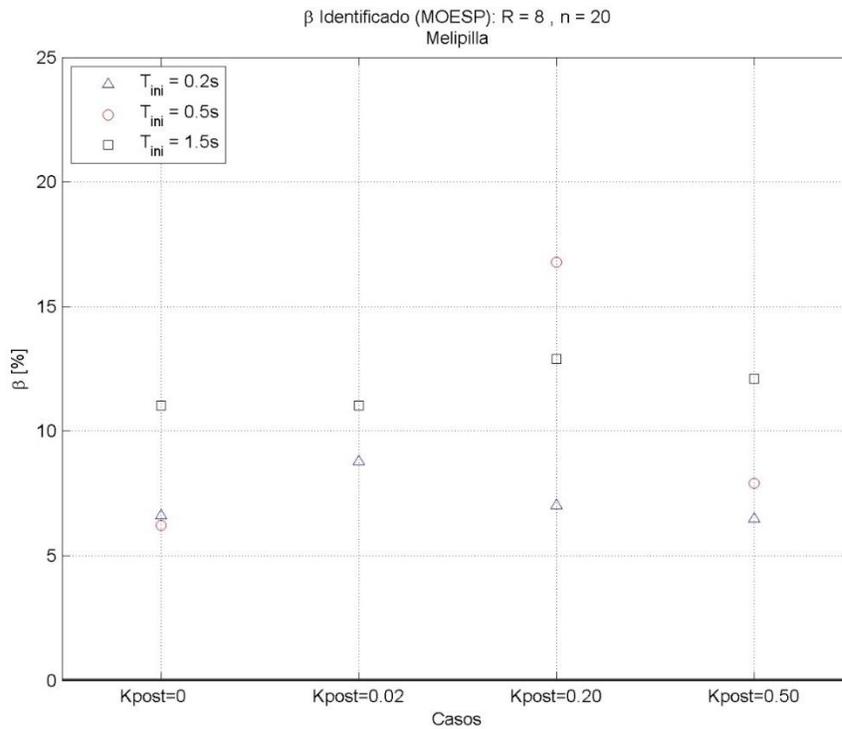


FIGURA 63: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA BILINEAL ($n=20$) A MEDIDA QUE AUMENTA RIGIDEZ POST FLUENCIA Y SE CONSERVA UN ALTA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL ($R = 8$): AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Adicionalmente, para el caso de alta no linealidad y parámetro K_{post} alto, igual a 20%, se muestra la histéresis, rigidez identificada, y los resultados específicos de la identificación en la Figura 64. En este caso, aparece un modo estable en $f = 1.12$ Hz, equivalente al 31% de la rigidez inicial, y asimilable a la rigidez equivalente del sistema. En segundo lugar aparece el modo parecido a la frecuencia natural inicial, que es el que se encuentra en la mayoría de los sistemas analizados.

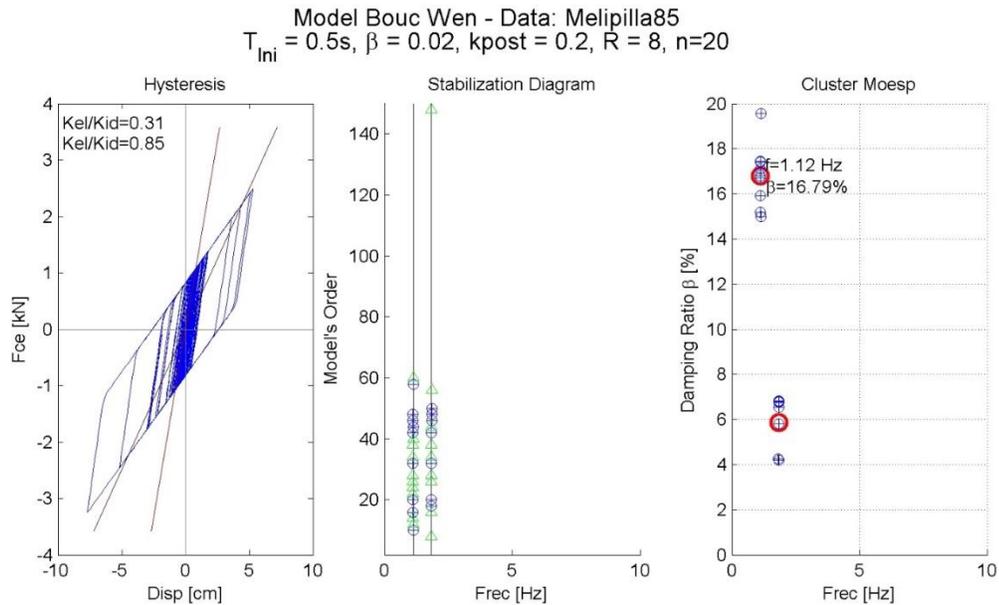


FIGURA 64: IDENTIFICACIÓN MOESP SOBRE SISTEMA BILINEAL CON ALTA RIGIDEZ POST FLUENCIA ($K_{POST} = 50\%$) Y BAJA INCURSIÓN EN EL RANGO NO LINEAL. DE IZQUIERDA A DERECHA: HISTÉRESIS, DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DEL PROCESO.

CASO 3: SUAVIZACIÓN EN TRANSICIÓN A LA FLUENCIA.

El caso 3 presenta las variaciones de los parámetros identificados cuando se suaviza la caída de rigidez en la transición hacia la fluencia, es decir, cuando el parámetro n disminuye. Todo esto se hace para distintos niveles de no linealidad (valores de R), y de rigidez post fluencia (valores de K_{post}).

Para el caso de baja no linealidad y rigidez post fluencia nula, se muestran los resultados en la Tabla 20. La Figura 65 muestra gráficamente los resultados de la rigidez identificada, mientras que la Figura 66 lo hace con el amortiguamiento.

	Tini	n = 20	n = 5	n = 2	n = 0.8
KID/KEL	0.2	0.98	0.97	0.94	0.84
	0.5	0.98	0.97	0.92	0.84
	1.5	0.97	0.96	0.92	0.83
β_{ID}	0.2	3.0%	3.6%	5.3%	8.8%
	0.5	3.8%	4.1%	6.3%	10.4%
	1.5	5.2%	5.9%	7.8%	12.7%

TABLA 20: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

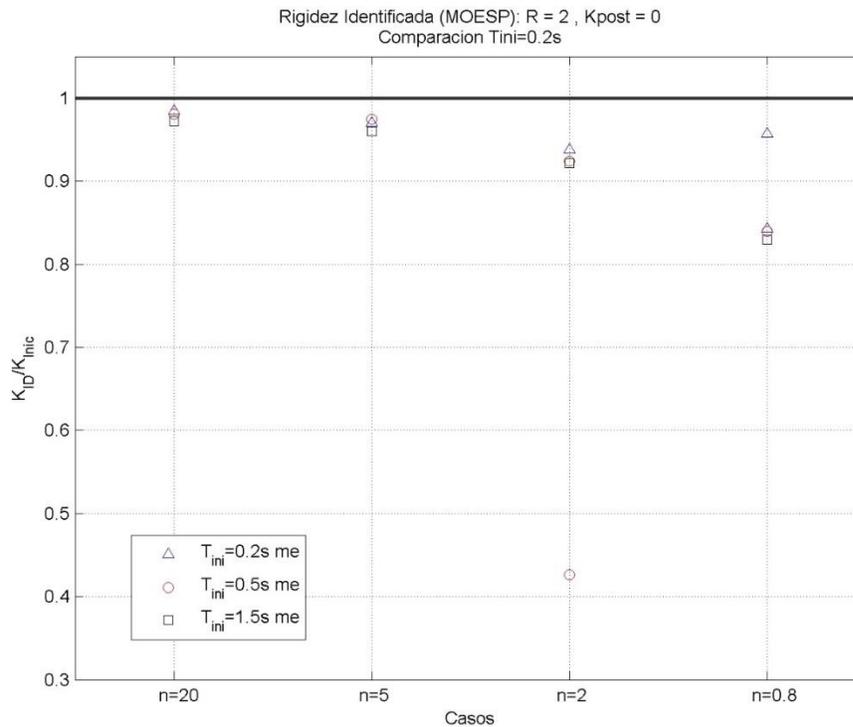


FIGURA 65: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL.

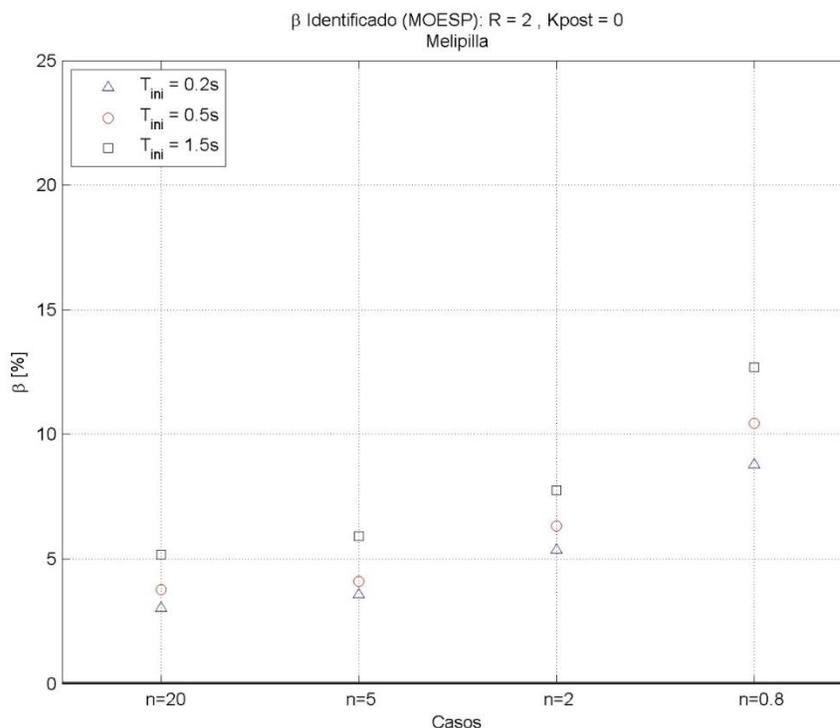


FIGURA 66: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$): AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Para el caso de baja no linealidad y rigidez post fluencia 20%, se muestran los resultados en la Tabla 21. La Figura 67 muestra gráficamente los resultados de la rigidez identificada, mientras que la Figura 68 lo hace con el amortiguamiento.

	T_{ini}	$n = 20$	$n = 5$	$n = 2$	$n = 0.8$
KID/KEL	0.2	0.98	0.97	0.94	0.86
	0.5	0.98	0.97	0.93	0.85
	1.5	0.96	0.95	0.92	0.84
β_{ID}	0.2	3.1%	3.5%	4.8%	7.8%
	0.5	3.7%	4.1%	6.0%	9.6%
	1.5	5.2%	5.7%	7.1%	10.8%

TABLA 21: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

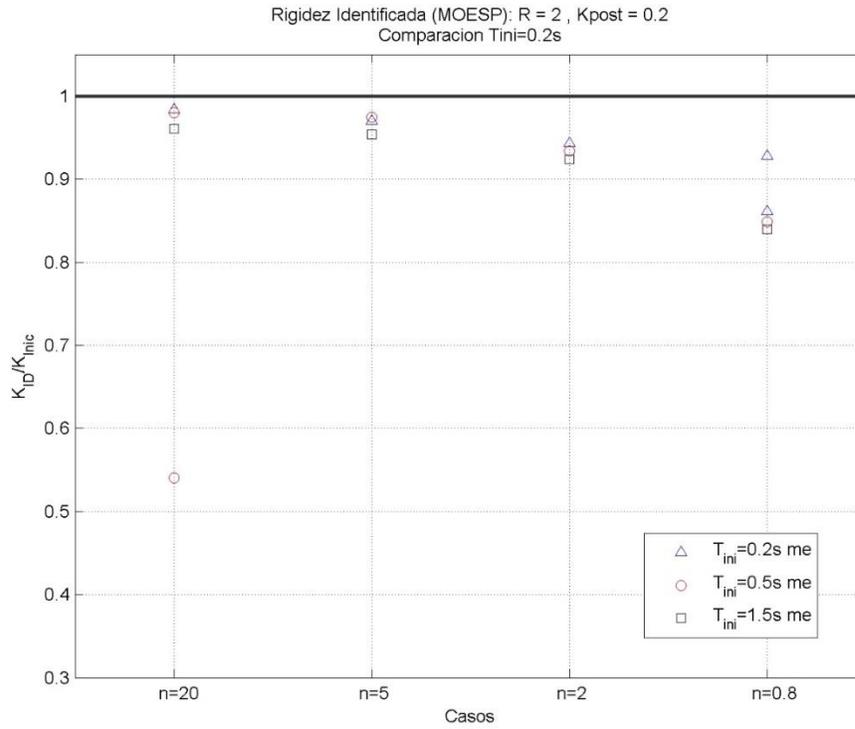


FIGURA 67: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL.

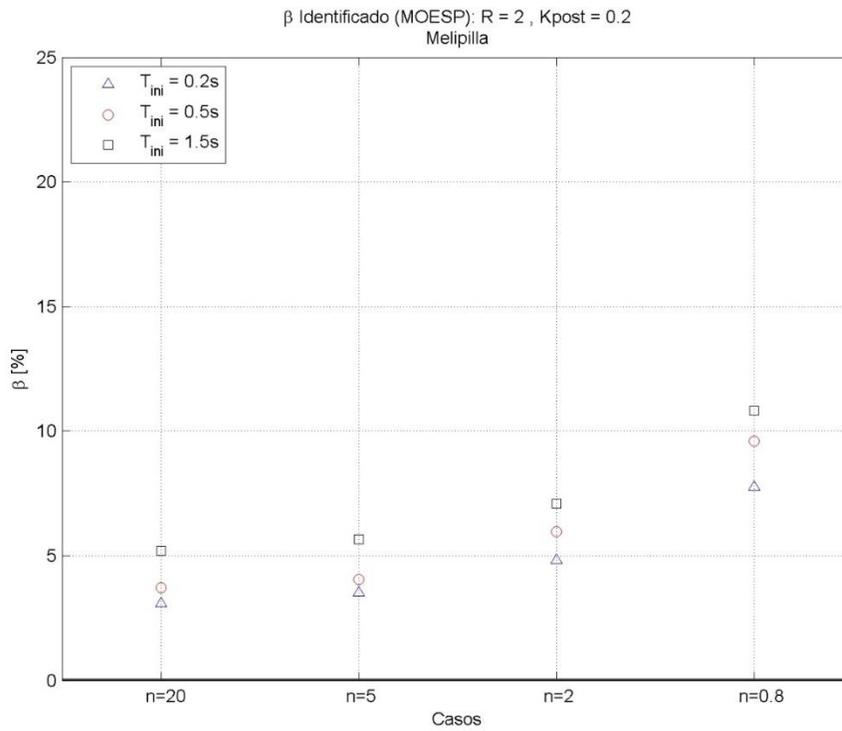


FIGURA 68: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Para el caso de alta no linealidad y rigidez post fluencia nula, se muestran los resultados en la Tabla 22. La Figura 69 muestra gráficamente los resultados de la rigidez identificada, mientras que la Figura 70 muestra el amortiguamiento.

	Tini	n = 20	n = 5	n = 2	n = 0.8
KID/KEL	0.2	0.61	0.62	0.62	0.57
	0.5	0.88	0.85	0.79	0.69
	1.5	0.92	0.93	0.86	35.36
β ID	0.2	6.6%	7.1%	7.7%	13.5%
	0.5	6.2%	7.4%	10.2%	11.9%
	1.5	11.0%	13.4%	18.5%	6.0%

TABLA 22: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

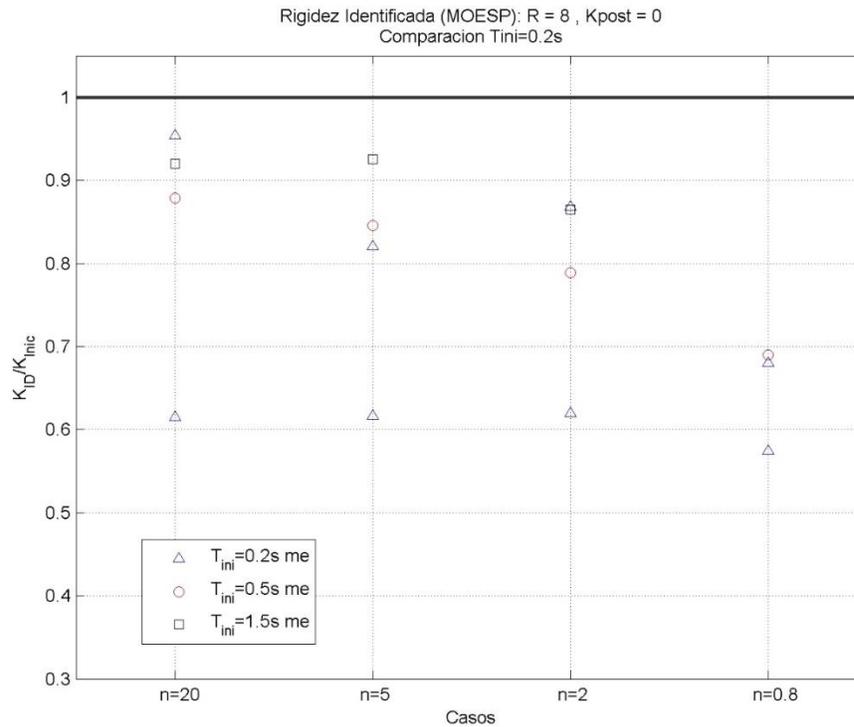


FIGURA 69: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL.

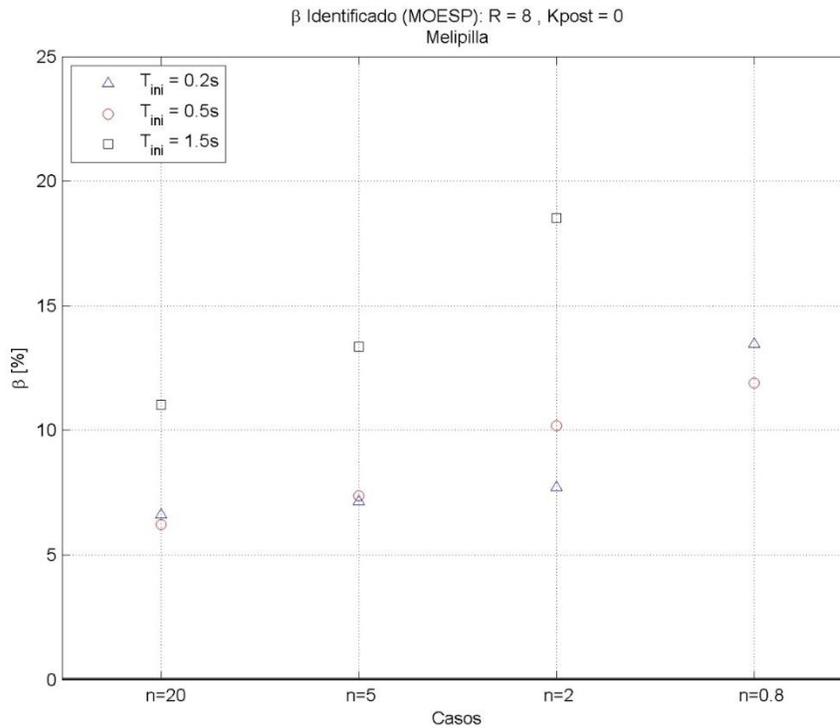


FIGURA 70: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA NULA ($K_{POST} = 0$): RAZON DE AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

Para el caso de alta no linealidad y rigidez post fluencia de 20%, se muestran los resultados en la Tabla 23. La Figura 71 muestra gráficamente los resultados de la rigidez identificada, mientras que la Figura 72 muestra el amortiguamiento.

	T_{ini}	n = 20	n = 5	n = 2	n = 0.8
KID/KEL	0.2	0.62	0.82	0.62	0.57
	0.5	0.31	0.31	0.32	0.32
	1.5	0.91	0.85	0.77	-
β_{ID}	0.2	7.0%	8.6%	8.4%	11.5%
	0.5	16.8%	18.0%	16.6%	17.1%
	1.5	12.9%	15.2%	18.5%	-

TABLA 23: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

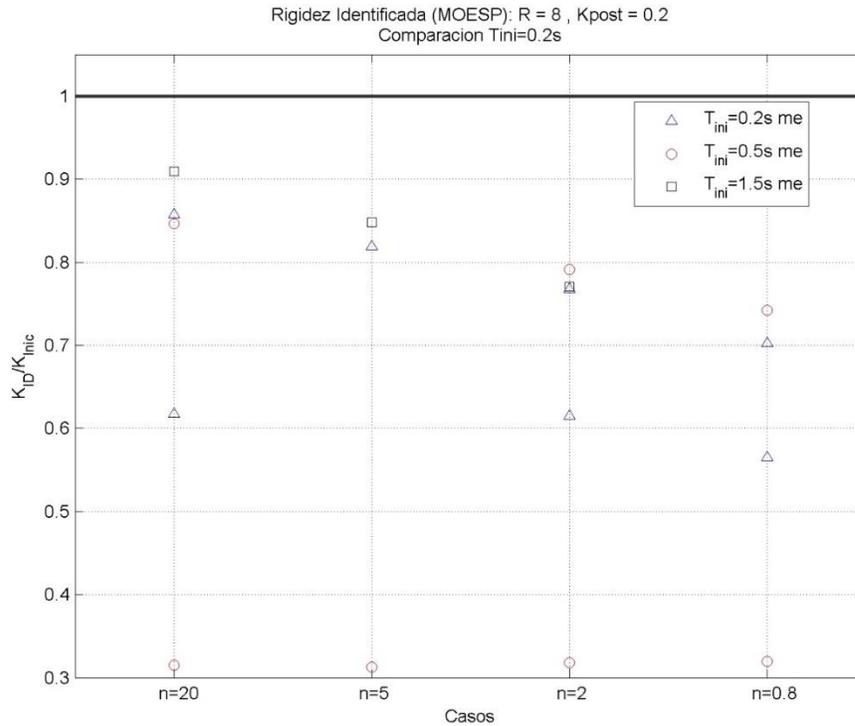


FIGURA 71: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): RIGIDEZ IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA INICIAL.

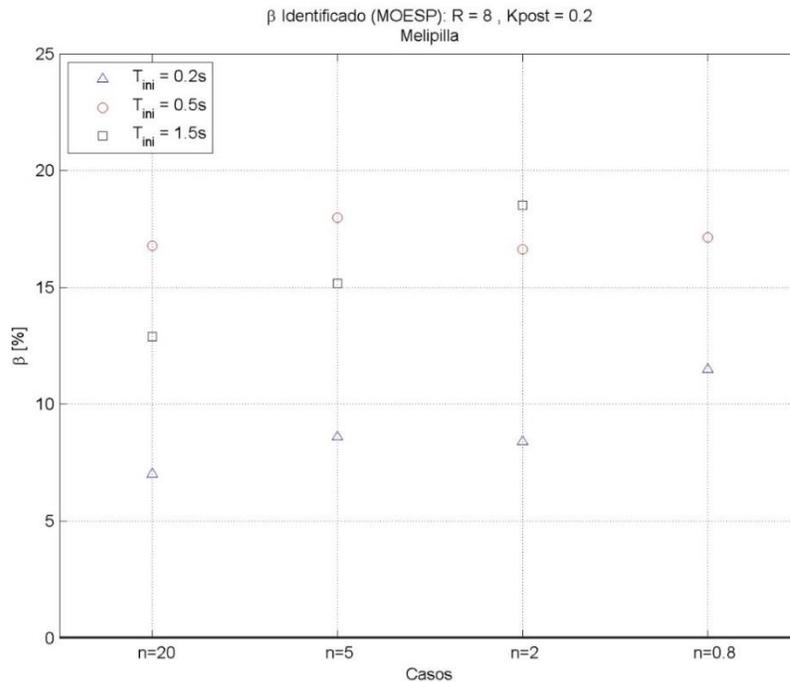


FIGURA 72: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN CON MOESP PARA SISTEMA EN QUE SE SUAVIZA PROGRESIVAMENTE LA HISTÉRESIS EN LA TRANSICIÓN A LA FLUENCIA. SE CONSERVA ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) Y UNA RIGIDEZ POST FLUENCIA DE 20% ($K_{POST} = 0.2$): AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO.

La Figura 71 muestra para $T_{ini} = 0.5s$, la rigidez equivalente en todas las identificaciones, equivalente a algo más del 30% de la inicial. Se muestra la Figura 79, con el caso $n = 2$, para el periodo inicial mencionado

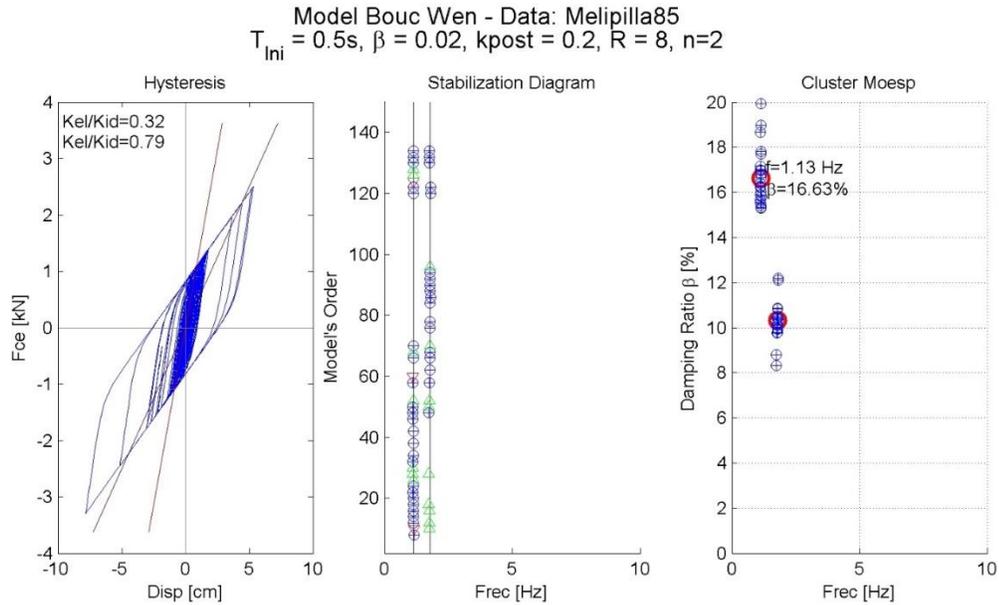


FIGURA 73: IDENTIFICACION PARA SISTEMA CON PERIODO INICIAL 0.5S, CASO R = 8, KPOST = 20% Y N = 2.

CASO 4: ANÁLISIS POR VENTANA DE CASO

Se reanaliza un sismo particular, en el rango de mayor intensidad, en tres ventanas de tiempo, y en cada una de ellas se hace el análisis de frecuencia amortiguamiento identificados. El caso elegido es el de Periodo inicial 0.5, $R = 2$, $K_{post} = 0$, y $n = 2$. Los resultados de este caso cuando se usa todo el registro se encuentran expresados en la Tabla 20 ($K_{id} = 0.92 K_{el}$, $\beta_{id} = 6.3\%$).

Para elegir el rango de mayor intensidad del sismo se busca la ventana de tiempo en la cual se concentre el 96% de la intensidad de Arias [19] del sismo. La Figura 74 representa gráficamente la ventana de análisis.

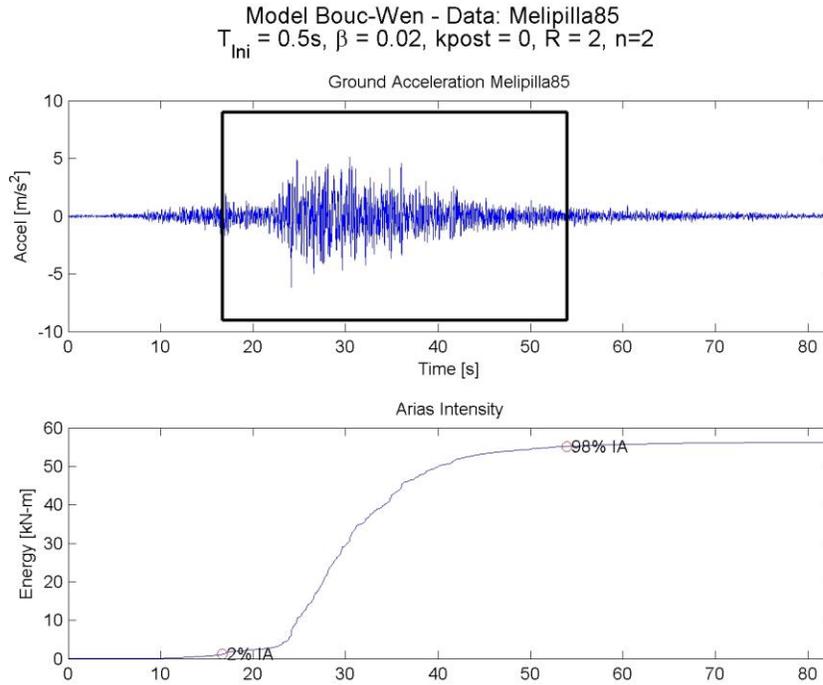


FIGURA 74: VENTANA DE TIEMPO ANALIZADA EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD DE ARIAS.

El resultado del análisis de presenta en la Figura 75, en donde se destacan las tres ventanas utilizadas (*window 1, 2 y 3* en orden cronológico) y los resultados de la identificación. *Kid all data* y β *all data* representan los resultados de la identificación utilizando todo el registro. *Window 1,2 y 3* muestran las histeresis de cada parte del registro y su rigidez identificada. La Tabla 24 expone estos resultados.

	Window 1	Window 2	Window 3	All Data
KID/KEL	0.90	0.87	0.97	0.92
β ID	7.2%	9.8%	4.3%	6.3%

TABLA 24: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN MOESP POR VENTANAS

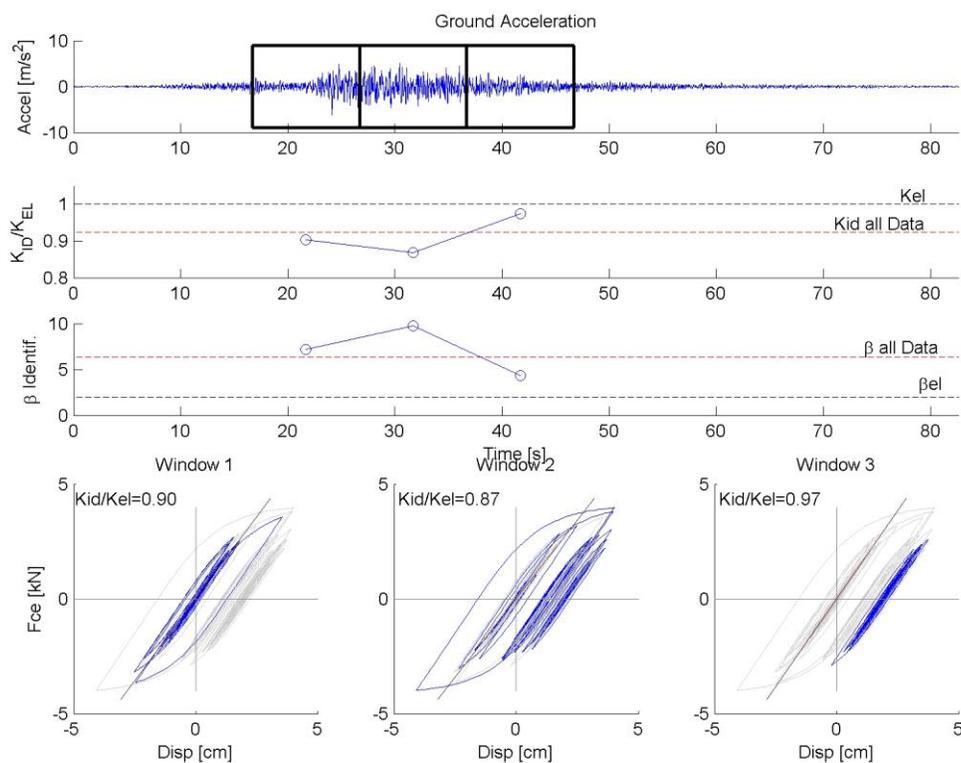


FIGURA 75: RESULTADOS DE LA IDENTIFICACIÓN POR VENTANAS: VENTANAS EN REGISTRO, RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADOS. HISTÉRESIS CORRESPONDIENTES A CADA VENTANA. LAS LÍNEAS "ALL DATA" REPRESENTAN LOS DATOS IDENTIFICADO USANDO TODO EL REGISTRO

CASO 5: SEGUNDA FRECUENCIA IDENTIFICADA.

En la mayoría de los subcasos identificados, se identifica un único polo, una única frecuencia. En otros no se identifica nada, y en algunos, se identifican 2 frecuencias. En estas últimas identificaciones mencionadas, es interesante verificar la similitud entre la frecuencia más baja de ambas, con el llamado sistema equivalente, explicado en 3.1.3.

La Tabla 25 muestra esta segunda rigidez identificada, $(K_{id})_{eq}$, y su amortiguamiento $(\beta_{id})_{eq}$, comparadas con la rigidez y amortiguamiento equivalente calculados según 3.1.3: $(K_{cal})_{eq}$ y $(\beta_{cal})_{eq}$. Se muestra una columna con los errores relativos entre lo calculado y lo identificado.

Tini seg	SubCaso	R	Kpost	n	$(K_{id})_{eq}$ kN/m	$(K_{cal})_{eq}$ kN/m	Error k	$(\beta_{id})_{eq}$ %	$(\beta_{cal})_{eq}$ %	Error β
0.2	12	8	0.5	20	612	600	-2%	6.5%	6.9%	6%
0.5	7	2	0.2	20	85.3	111	23%	13.4%	15.4%	13%
0.5	11	8	0.2	20	49.0	44	-11%	16.8%	12.2%	-38%
0.5	12	8	0.5	20	85.3	86	1%	8.0%	4.2%	-90%
0.5	15	2	0	2	67.9	98	31%	11.5%	22.1%	48%
0.5	26	8	0.2	5	49.0	44	-11%	18.0%	12.0%	-50%
0.5	27	8	0.2	2	50.6	44	-15%	16.6%	11.8%	-41%
0.5	28	8	0.2	0.8	50.6	43	-17%	17.2%	11.5%	-50%

TABLA 25: RIGIDEZ EQUIVALENTE IDENTIFICADA ($K_{ID}EQ$) Y CALCULADA ($K_{CAL}EQ$); AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE IDENTIFICADO ($B_{ID}EQ$) Y CALCULADO ($B_{CAL}EQ$)

Se muestra los resultados gráficos del subCaso 12 con $T_{ini} = 0.2s$; subCaso 11 $T_{ini} 0.5s$; subCaso 28 $T_{ini} = 0.5s$, los cuales incluyen el par $(K_{cal})_{eq}$ y $(\beta_{cal})_{eq}$ plotado a manera de estrella de seis puntas en el cluster.

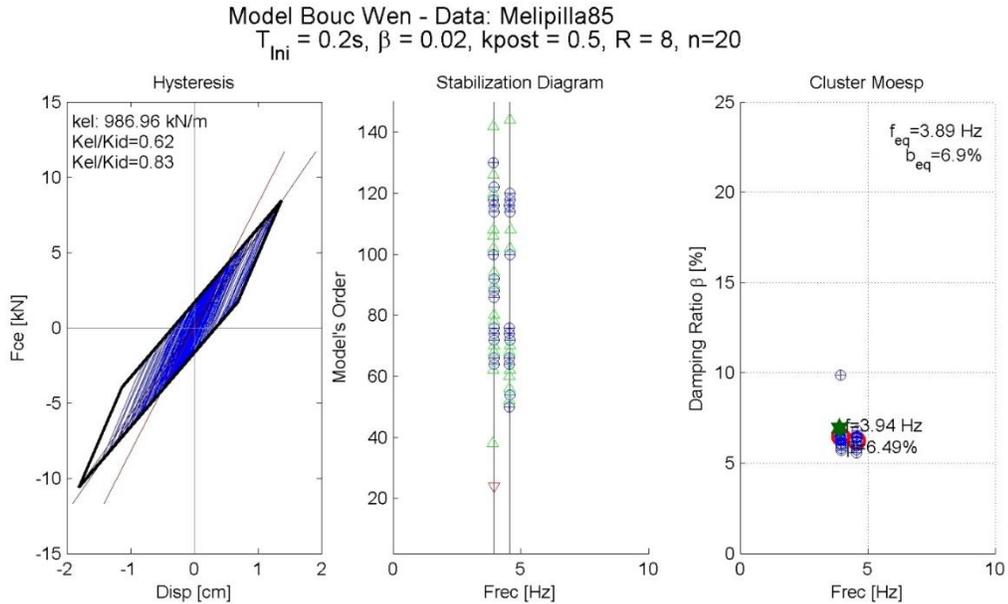


FIGURA 76: IDENTIFICACIÓN CON SEGUNDA FRECUENCIA ASIMILABLE AL SISTEMA EQUIVALENTE. PERIODO INICIAL 0.2S, SUBCASO 12.

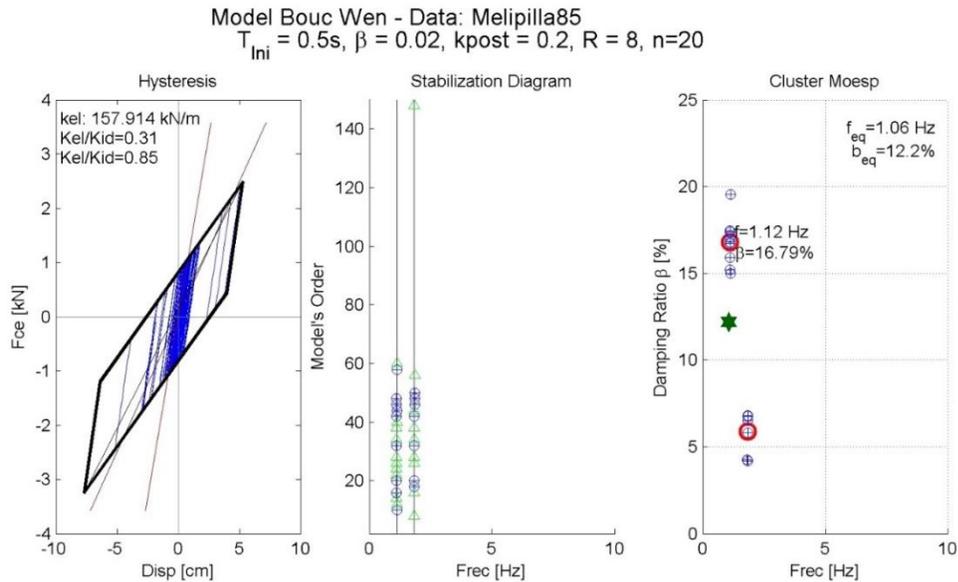


FIGURA 77: IDENTIFICACIÓN CON SEGUNDA FRECUENCIA ASIMILABLE AL SISTEMA EQUIVALENTE. PERIODO INICIAL 0.5S, SUBCASO 11.

Model Bouc Wen - Data: Melipilla85
 $T_{ini} = 0.5s, \beta = 0.02, k_{post} = 0.2, R = 8, n=0.8$

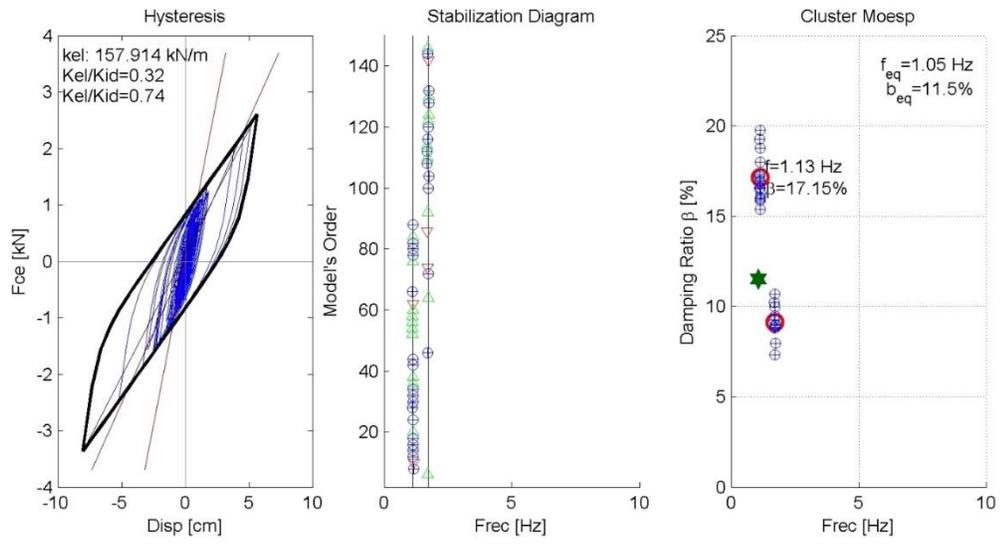


FIGURA 78: IDENTIFICACIÓN CON SEGUNDA FRECUENCIA ASIMILABLE AL SISTEMA EQUIVALENTE. PERIODO INICIAL 0.5S, SUBCASO 28.

5. ANÁLISIS SOBRE MARCO ARRIOSTRADO CON DIAGONALES DE PANDEO RESTRINGIDO

Se toma una estructura existente, y se rediseña uno de sus marcos planos reemplazando sus diagonales pandeables por Diagonales de Pandeo Restringido, de manera de tener un **BRBF**, *Buckling Restrained Braced Frame*”, Marco arriostrado con Diagonales de Pandeo Restringido. Se presenta en el punto 5.1 la estructura terminada y sus características sísmicas principales. El marco original, con diagonales pandeables, así como el diseño que justifica que el marco nuevo se encuentra en norma, quedará detallado en el **Anexo 1**.

5.1 MODELO DEL MARCO ARRIOSTRADO CON DIAGONALES DE PANDEO RESTRINGIDO (BRBF)

La estructura es original está destinada a almacenamiento minero y se encuentra en la segunda región, en el norte de Chile. Consta de 4 marcos paralelos. Los exteriores son sísmicos, provistos de diagonales, e iguales uno respecto al otro. Los intermedios son únicamente estáticos. El análisis se hará solamente considerando el primero.

La Tabla 26 muestra las características generales del marco, las propiedades sísmicas del suelo y las características sísmicas generales de la misma.

Tipificación	Caracterización	Comentario.
Zona Sísmica	2	
Suelo	II	
R	3	Estructura de péndulo invertido
ξ	0.03	Estructura de Acero soldada.
n	1.33	1.33 Factor de suelo
T' [s]	0.35	0.35 Periodo suelo
I	1.0	Factor de importancia

TABLA 26: PROPIEDADES SÍSMICAS DEL MARCO

El material usado para vigas y columnas es Acero **A270ES**, $F_y = 270$ MPa. El acero utilizado para los BRB es **A36** $F_y = 36$ ksi = 253 MPa.

5.1.1 GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA

La Figura 79 muestra la geometría del Marco a Analizar. En ella se visualizan sus 6 niveles y 4 vanos. Las cotas se encuentran en la Tabla 27, y los vanos miden 6m cada uno. En los niveles 4 y 6, contados desde abajo hacia arriba, se apoyan los silos con el material minero, específicamente en la intersección de diagonales. Sobre los niveles 1 y 2, está distribuida uniformemente las correas transportadoras de material. Sobre la Figura en cuestión también están impresos los nombres de los perfiles de vigas y columnas, cuyas propiedades se detallan en la Tabla 28. También se encuentran los perfiles de BRB, cuyas características se encuentran en la Tabla 29.

La imagen está tomada del programa SAP2000, y tal como acostumbra este programa muestra las rótulas de los elementos como pequeños círculos en los extremos de los mismos. En este caso todas

Nombre de Sección	Material	t3	t2	tf	tw	Area	I33	I22
		cm	cm	cm	cm	cm2	cm4	cm4
HN25x68.9	A270ES	25	25	1.4	0.8	87.8	10488	3647
HN30x159	A270ES	30	30	2.8	1.4	202.2	32878	12606
HN30x79.9	A270ES	30	30	1.2	0.8	94.1	16340	5401
HN35x186	A270ES	35	35	2.8	1.4	237.2	53898	20015
IN70x159	A270ES	70	30	2.5	0.8	202.0	189246	11253

TABLA 28: PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS PERFILES DOBRE T DE VIGAS Y COLUMNAS. T3 ALTURA TOTAL DEL PERFIL; T2 ANCHO DE LAS ALAS, TF ESPESOR DE ALAS Y TW ESPESOR DE ALMAS. I33 INERCIA DEL EJE FUERTE, I22 INERCIA EJE DÉBIL.

Cabe destacar que el área mostrada en la Tabla 29 corresponde al área de la sección transversal del núcleo de los BRB. Se incluye también la rigidez elástica del elemento debido a que es un elemento no prismático. Esta, se aproximó como 1.8 veces la rigidez de una biela prismática de área transversal igual a la del núcleo del elemento³. Las propiedades no lineales del elemento se mostrarán en tablas posteriores con mayor detalle.

Nivel	Seccion	Asc [cm2]	Py [ton]	Largo [m]	k _{BRB} [ton/m]
6	BRB10	6.45	16.3	4.79	4848
5	BRB10	6.45	16.3	4.27	5443
4	BRB125	8.06	20.4	5.10	5695
3	BRB10	6.45	16.3	4.69	7436
2	BRB10	6.45	16.3	3.74	9327
1	BRB125	8.06	20.4	5.19	5592

TABLA 29: PROPIEDADES DE LOS BRB POR NIVEL. LA RIGIDEZ KBRB ES LA ELÁSTICA.

5.1.2 CARGAS SOBRE ESTRUCTURA

La Tabla 30 muestra las cargas estáticas sobre la estructura. Estas se dividen carga muerta adicional (CM), y Sobre Carga (SC). La primera contempla el peso muerto de la correa transportadora, y la segunda la sobrecarga de los silos.

	CM [ton]	SC [ton]
Nivel 6		294
Nivel 5		
Nivel 4		520
Nivel 3		
Nivel 2	16.8	
Nivel 1	31.2	

TABLA 30: CARGAS GRAVITACIONALES ESTATICAS SOBRE ESTRUCTURA POR NIVEL

³ El valor 1.8 fue tomado como el valor promedio que se obtiene al dividir la rigidez final del BRB con la rigidez que se obtendría si elemento fuera prismático con área igual a la del núcleo, para varios BRB. Dicha información se encuentran la tabla del ANEXO 1, y fue proporcionada por el Ing. Rodrigo Retamales.

La Tabla 31 por su parte muestra las cargas dinámicas de la estructura, obtenidas con la totalidad de las cargas muertas, y el 80% de las cargas vivas, es decir:

$$P_{sis} = PP + CM + 0.8SC \quad (98)$$

Siendo PP, el peso propio de la estructura, CM la carga muerta adicional, SC la sobrecarga de los silos, y P_{sis} el peso sísmico de la estructura. El factor 0.8 está considerado por la indicación de la norma de silos ACI 313.

Cabe destacar que las cargas CM y SC están duplicadas respecto al caso estático debido a que el marco intermedio no es sísmico y tributa dinámicamente su carga sobre el marco analizado.

El peso sísmico Total de la estructura es **P_{sis} = 1438 Ton.**

	PP [ton]	CM [ton]	0.8 SC [ton]	Peso sísmico
Nivel 6	5.2		470.4	475.6
Nivel 5	6.1			6.1
Nivel 4	8.0		832	840
Nivel 3	7.5			7.5
Nivel 2	6.4	33.6		40
Nivel 1	6.8	62.4		69.2

TABLA 31: CARGAS DINÁMICAS SOBRE EL MARCO

5.1.3 CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS DE LA ESTRUCTURA

La estructura tiene un Periodo Principal de oscilación de **T = 1.17s**. Se analiza con el espectro reducido de la norma Nch2369. El corte Basal, Corte Máximo y mínimo se muestra en la Tabla 32.

Factor		Valor
Cmin	Coeficiente corte mínimo	0.075
Cmax	Coeficiente Corte máximo	0.34
Qmin [ton]	Corte Minimo	108
Qmax [ton]	Corte Maximo	489
Qbo [ton]	Corte Basal antes de Qmin	94
Qb [ton]	Corte Basal	108

TABLA 32: PROPIEDADES SÍSMICAS DE LA ESTRUCTURA

5.1.4 PROPIEDADES MODALES

Se considerarán dentro del análisis los modos cuya frecuencia sea menor a 15 Hz, correspondiente a un periodo de 0.067 seg. Dentro de este rango se encuentran 16 modos. La Tabla 33 contiene la lista con las propiedades modales de los 16 primeros modos.

	Periodos [s]	Frecuencias [Hz]	Masa Modal Horizontal	Masa Modal Vertical	Masa Modal Acumulada Horizontal	Masa Modal Acumulada Vertical
Modo 1	1.17	0.86	0.96	0.0	0.96	0

Modo 2	0.37	2.73	0.014	0.0	0.97	0
Modo 3	0.21	4.66	0.0	0.81	0.97	0.81
Modo 4	0.20	5.09	0.0	0.0	0.97	0.81
Modo 5	0.16	6.09	0.0	0.01	0.97	0.81
Modo 6	0.15	6.76	0.005	0.0	0.97	0.81
Modo 7	0.14	7.01	0.0	0.11	0.97	0.92
Modo 8	0.13	7.51	0.0	0.0	0.97	0.92
Modo 9	0.13	7.55	0.025	0.0	1	0.92
Modo 10	0.11	9.49	0.0	0.0	1	0.92
Modo 11	0.092	10.8	0.0	0.03	1	0.95
Modo 12	0.092	10.9	0.0	0.0	1	0.95
Modo 13	0.088	11.3	0.0	0.0	1	0.95
Modo 14	0.077	12.9	0.0	0.0	1	0.95
Modo 15	0.067	14.8	0.0	0.0	1	0.95
Modo 16	0.067	14.9	0.0	0.0	1	0.95

TABLA 33: PROPIEDADES MODALES DEL MARCO.

En la Tabla 33 se muestra que se logra más del 95% de la masa modal con los modos considerados para el análisis. Como se puede apreciar, los modos 1, 2, 6 y 9, constituyen los modos que movilizan la masa en la dirección horizontal, mientras que los modos 3, y 5, 7 y 11 lo hacen en la dirección vertical. Los primeros modos de cada dirección son especialmente importantes. Los modos 4, 8, 10, 12, 13, 14, 15 y 16, son modos de extensión de vigas y columnas, simétricos o antimétricos, que no movilizan masa neta.

De la Figura 80 a la Figura 83, muestran los principales modos horizontales del sistema, las Figura 84 y Figura 85 por su parte muestran los modos verticales, La Figura 86 muestra el modo 8 como visualización de los modos simétricos que no movilizan masa neta en ninguna dirección.

Modos Horizontales

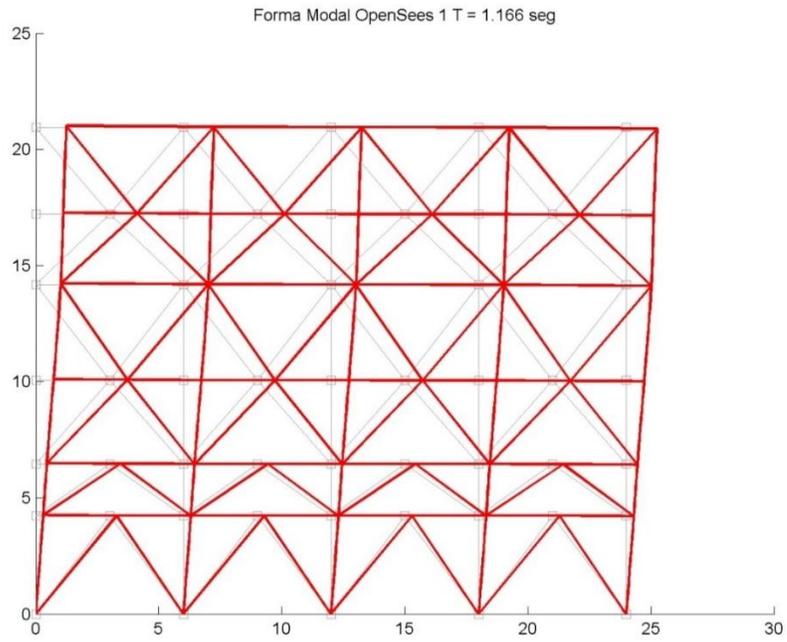


FIGURA 80: MODO 1

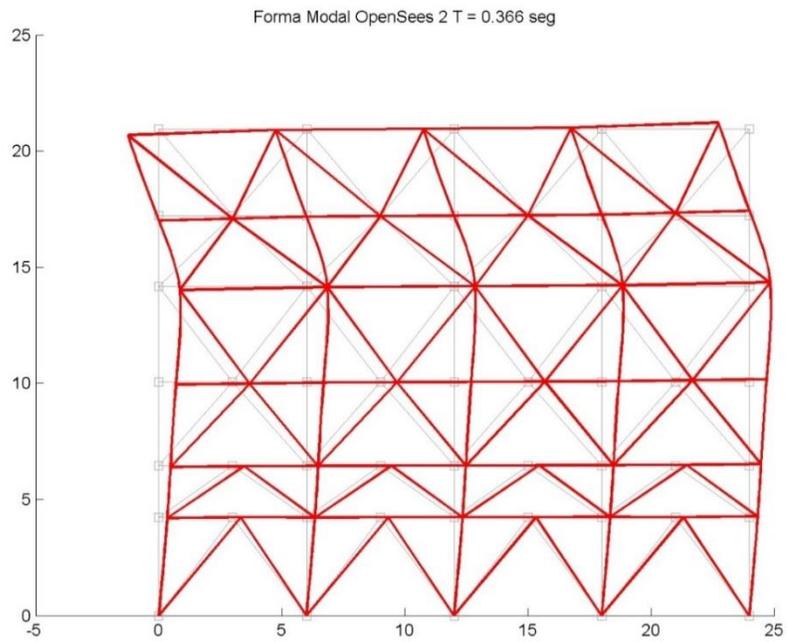


FIGURA 81: MODO 2

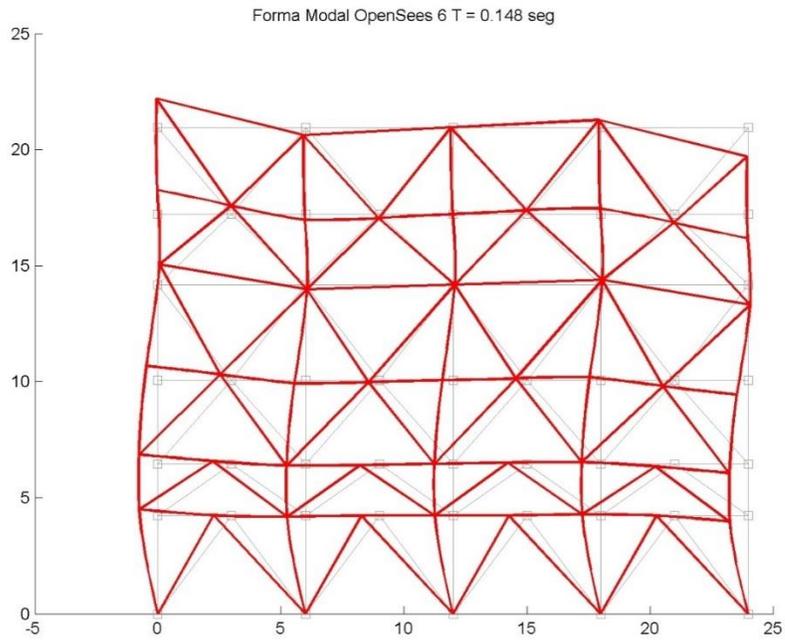


FIGURA 82: MODO 6

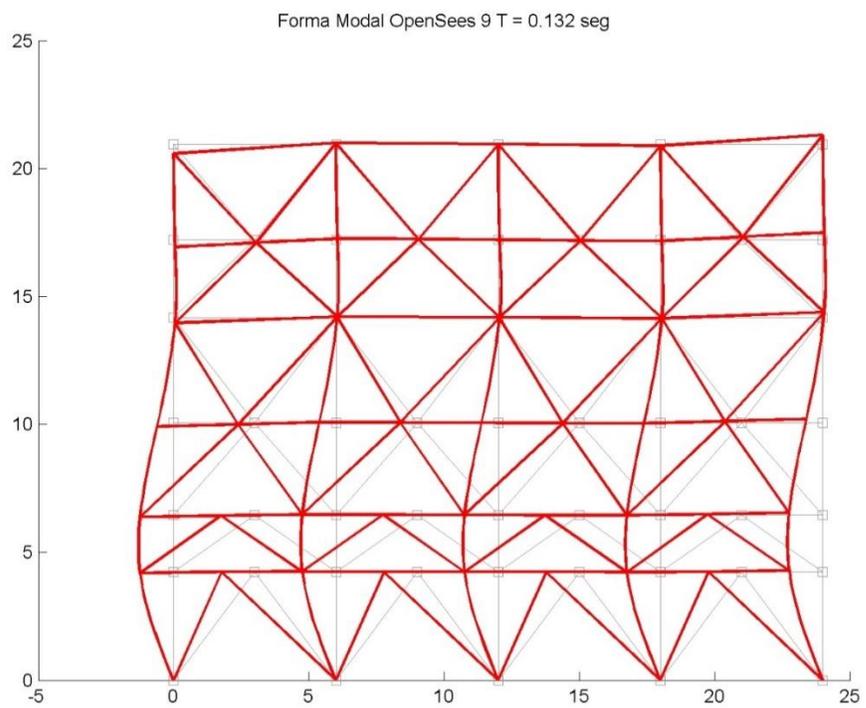


FIGURA 83: MODO 9

Modos Verticales

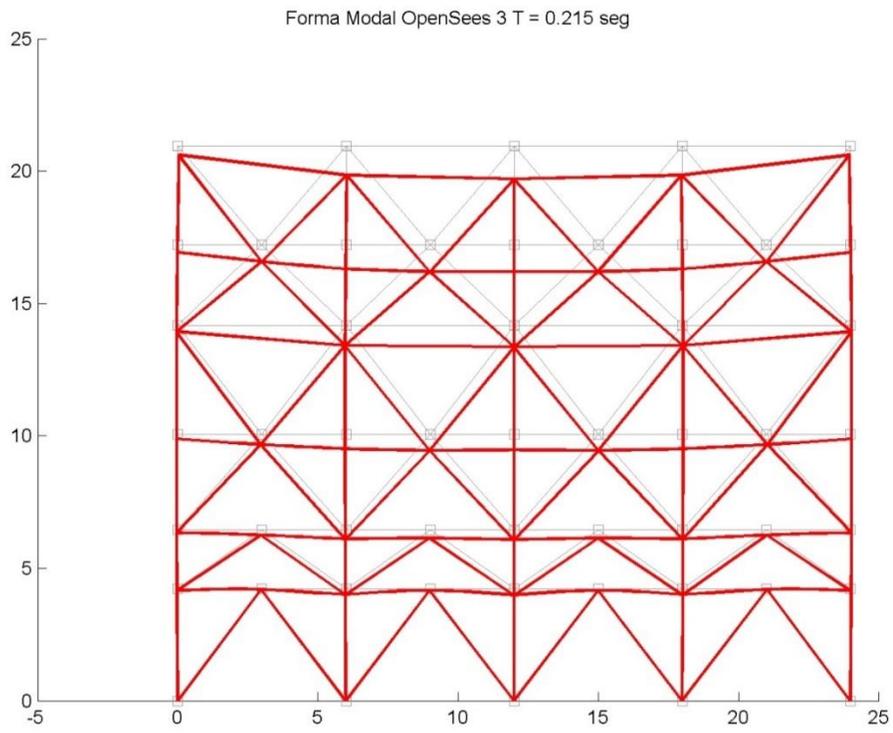


FIGURA 84: MODO 3

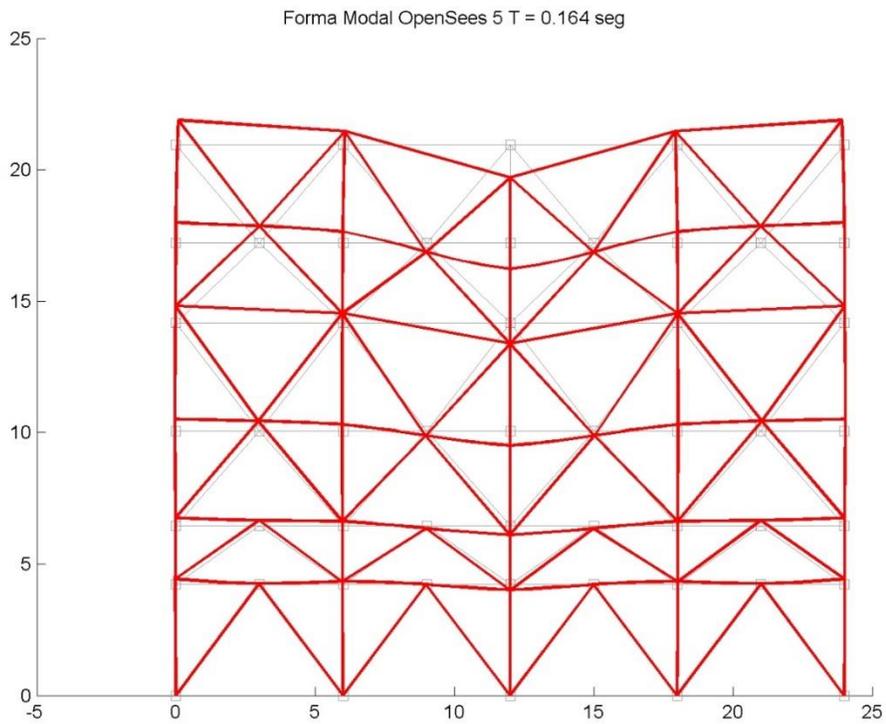


FIGURA 85: MODO 5

Modo que no moviliza masa neta

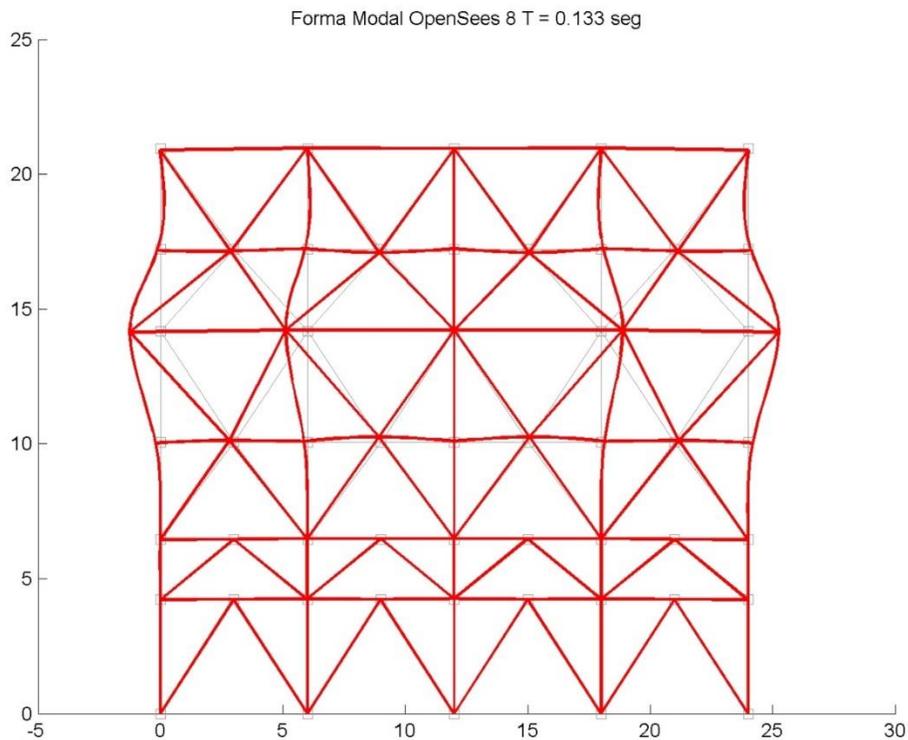


FIGURA 86: MODO 8. MODO DE EXTENSIÓN DE VIGAS SIN MOVILIZACIÓN DE MASA HORIZONTAL NI VERTICAL

5.1.5 AMORTIGUAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

El amortiguamiento considerado será el propuesto por modelo de Rayleigh (50), con coeficientes proporcionales a la Matriz de Masa y Rigidez del sistema, de manera que los dos primeros modos tengan una razón de amortiguamiento igual a ξ de la Tabla 26, o sea 3%.

$$[C] = \alpha_M[M] + \beta_K[K] \quad (99)$$

Siendo $[C]$ la matriz de Amortiguamiento, $[M]$ la de masa y $[K]$ de rigidez, consistentes con (2). Cabe destacar que $[K]$ es la matriz de rigidez con las propiedades lineales y elásticas de las diagonales.

Los Coeficientes de Rayleigh que se ajustan a las condiciones expuestas, son $\alpha_M = 0.2448$ y $\beta_K = 0.0027$. Con ello, la razón de amortiguamiento por modo queda establecida y se muestra en la Tabla 33Tabla 34.

	Periodos [s]	Frecuencias [Hz]	Amortiguamiento [%]
Modo 1	1.17	0.86	3.0
Modo 2	0.37	2.73	3.0
Modo 3	0.21	4.66	4.3

Modo 4	0.20	5.09	4.7
Modo 5	0.16	6.09	5.5
Modo 6	0.15	6.76	6.0
Modo 7	0.14	7.01	6.2
Modo 8	0.13	7.51	6.6
Modo 9	0.13	7.55	6.6
Modo 10	0.11	9.49	8.2
Modo 11	0.092	10.83	9.3
Modo 12	0.092	10.92	9.4
Modo 13	0.088	11.36	9.7
Modo 14	0.077	12.99	11.1
Modo 15	0.067	14.86	12.7

TABLA 34: RAZON DE AMORTIGUAMIENTO POR MODO.

5.1.6 ORTOGONALIDAD DE MODOS.

Para evaluar la ortogonalidad de las formas modales calculadas, se realiza el criterio MAC entre las 16 primeras formas modales, expuestas en 5.1.4. El valor de MAC entre los distintos vectores que componen las formas modales se muestra en el gráfico de barras de la Figura 87.

TABLA 35: MATRIZ CON VALOR MAC DE LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS DEL SISTEMA.

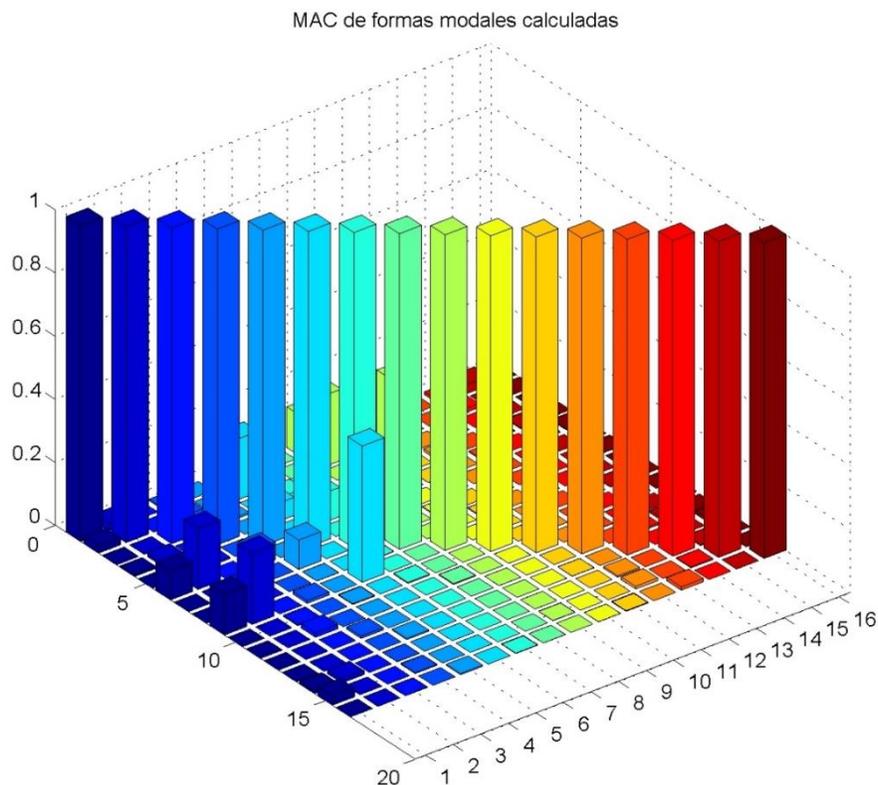


FIGURA 87: MAC DE LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS, CALCULADAS POR OPENSEES

5.1.7 RESPUESTA HISTERÉTICA DEL MARCO

Se muestra la Figura 88 con la respuesta histerética de las diagonales al ser solicitado el marco por el terremoto registrado en Curicó el año 2010, como visualización de su comportamiento no lineal. El orden en que están dispuestas las histéresis es congruente con el que se puede visualizar en la Figura 79, por ejemplo, la histéresis de la esquina inferior izquierda corresponde a la diagonal del primer nivel junto a la columna izquierda.

Las histéresis de los otros registros utilizados se muestran en el Anexo 1.

Tiempo historia Curico2010 - Histeresis - Pga = 0.48

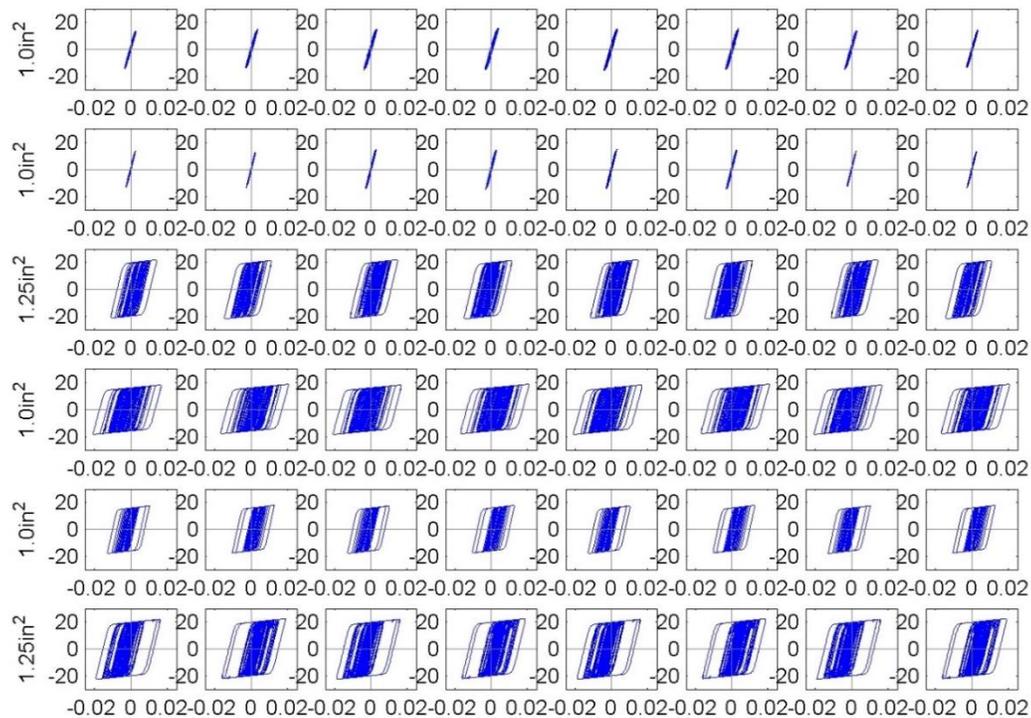


FIGURA 88: HISTÉRESIS DE CADA DIAGONAL AL RESISTIR EL TERREMOTO REGISTRADO EN CURICÓ. EL ORDEN EN QUE ESTÁN DISPUESTAS LAS HISTÉRESIS ES CONGRUNTE CON EL QUE SE PUEDE VISUALIZAR EN LA FIGURA 79: UNIDADES EN TON (EJE VERTICAL) Y METROS (EJE HORIZONTAL)

5.2 IDENTIFICACIÓN SOBRE MARCO ARRIOSTRADO CON DIAGONALES DE PANDEO RESTRINGIDO.

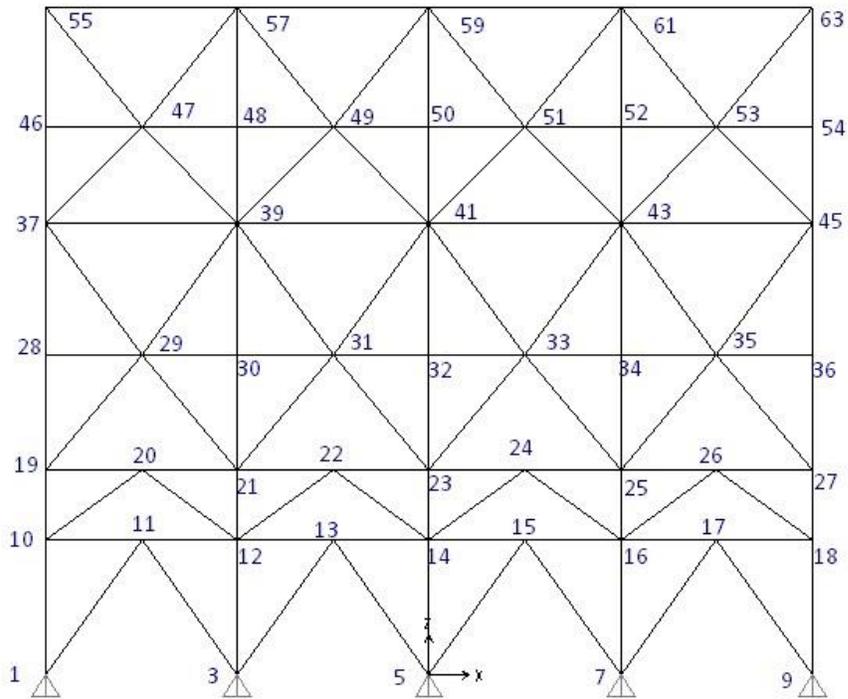


FIGURA 89: ESQUEMA DEL MARCO A ANALIZAR, CON ETIQUETAS DE LOS NODOS.

Sobre la estructura descrita en 5.1, se aplicarán seis solicitaciones basales provenientes de registros sísmicos consistentes con el suelo de la estructura original, además de un registro de ruido blanco de 10 minutos, solicitando horizontal y verticalmente a la estructura. Los registros sísmicos se obtienen de datos que proporciona la Universidad de Chile, [20]. Se selecciona como aceleración horizontal aquella que tenga un mayor P.G.A entre las dos direcciones registradas, además de la dirección vertical. Se toman los registros con datos ya corregidos. Se detallan los nombres y características principales de cada uno de ellos en la Tabla 36: Detalle de registros utilizados para identificación y su P.G.A.

Código	Nombre Registro	Fecha	Magnitud Sismo	PGA hor [g]	PGA ver [g]
Ah	Alto Hospicio 2006	09-04-2006	5.6 Mw	0.07	0.04
Cu	Curicó 2010	27-02-2010	8.8 Mw	0.48	0.20
Hu	Hualañé 2010	27-02-2010	8.8 Mw	0.38	0.38
Me	Mejillones 2007	14-11-2007	7.7 Mw	0.42	0.34
Mi	Mirador 2010 ⁴	27-02-2010	8.8 Mw	0.19	0.10
Ta	Talca 2010	27-02-2010	8.8 Mw	0.47	0.22

TABLA 36: DETALLE DE REGISTROS UTILIZADOS PARA IDENTIFICACIÓN Y SU P.G.A. [20]

⁴ En la página Web este registro se denomina “Santiago La Florida”.

Cada uno de estos registros se aplican ponderados por un factor de manera que cuando la estructura oscile en el régimen lineal y elástico, la ductilidad máxima alcanzada en las diagonales sea 1, es decir, se escala el sismo para obtener la respuesta lineal más grande posible. Sobre estos registros ponderados, se amplifican 2, 5 y 8 veces, de manera de hacer entrar a la estructura en distintos grados de incursión no lineal. Para denominar estas ampliificaciones se usa la nomenclatura $\mathbf{R} = 2$, $\mathbf{R} = 5$ y $\mathbf{R} = 8$, en analogía a lo hecho en el Capítulo 4, con 1 G.D.L.

Los registros descritos en el párrafo anterior se aplican en dos casos de respuesta no-lineal, diferenciados por el modelo de histéresis de las diagonales. En el primero se utiliza una histéresis similar a la bilineal, con el parámetro de n del modelo de Wen descrito en 3.1.2 calibrado en $n = 5$, el segundo con un parámetro $n = 0.8$, que intenta simular la suavidad de las curvas de histéresis observadas en los BRB. El valor se toma dentro de rango observado [21]⁵. La histéresis tipo de cada caso con la cual se modelan las diagonales se visualiza en la Figura 90.

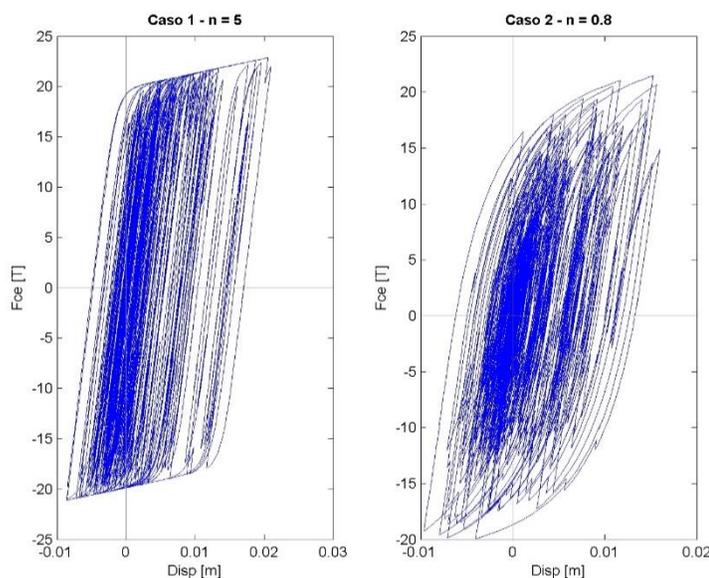


FIGURA 90: HISTERESIS TIPO PARA CASOS DE HISTERESIS. CASO 1 SIMIL BILINEAL, CON $n = 5$ (IZQ), Y CASO 2, CON SUAVIDAD DE BRB, (DER)

La respuesta obtenida se captura como aceleración total, vertical y horizontal, en todos sus grados de libertad. A continuación, se seleccionan algunos grados de libertad, con los cuales procesan las identificaciones con las mismas técnicas descritas en el capítulo 4, es decir MOESP, PSD, y SSI-COV. Los nodos sobre los cuales se obtiene la respuesta para realizar cada identificación, y sobre qué técnicas se aplica se detalla en la tabla. La numeración corresponde a la mostrada en la Figura 89.

Nombre Instrumentación	Nodos identificados	Dirección sensores	Uso en MOESP	Uso en SSI-COV	Uso en PSD
------------------------	---------------------	--------------------	--------------	----------------	------------

⁵ El parámetro α del artículo es el que entrega la suavidad de la curva de histéresis.

Instrumentación A	Todos salvo apoyos	Ambas	Sí	No	No
Instrumentación B	12,13,19,23,28,31,33,41,43,53,61,63	Ambas	Sí	Sí	No
Instrumentación C	28,55	Ambas	Sí	Sí	No
Instrumentación D	28,55	Solo Horizontal	Sí	Sí	No
Instrumentación E	16, 23, 31, 39, 55	Ambas	No	No	Sí

TABLA 37: CASOS DE IDENTIFICACIÓN Y TÉCNICAS SOBRE LAS CUALES SE APLICA.

El caso A y B de la Tabla 37 corresponden a casos razonables de instrumentación, en que se instrumentan algunos niveles de la estructura. Los casos A y B en la práctica no se ejecutarían por la gran cantidad de sensores, pero se aprovecha la instancia virtual para verificar la potencialidad máxima de la técnica, ya que no hay costo involucrado. El caso A no se implementa para SSI-COV.

5.3 RESULTADOS IDENTIFICACIÓN.

5.3.1 RESULTADOS P.S.D.

Se presentarán a continuación los resultados del análisis con Identificación de máximos en el espectro de potencia. Se mostrarán primero los resultados del Caso 1, es decir aquellos con histéresis simil bilineal, y luego los del Caso 2, con histéresis suavizada.

Los resultados se presentan en forma de tablas con las frecuencias principales identificadas, y figuras con el espectro de potencia destacado. Estos últimos se encuentran con la amplitud normalizada, de manera que el máximo del espectro sea siempre 1. Se recurre a esto debido a que los espectros presentan amplitudes muy distintas a medida que entran en el rango no lineal, y algunos desaparecen visualmente.

Se presentarán los resultados identificados como frecuencias normalizadas por la frecuencia elástica: “**fid/fel**”. La frecuencia elástica está descrita en la Tabla 33.

Se identifican los nodos de los niveles 1,2,3,4 y 6, aquellos destacados en la Tabla 37. Para todas las identificaciones, se usan ventanas de tiempo de 5 seg.

Se presentan los resultados de la identificación mostrando las frecuencias asociadas a los máximos locales de cada espectro. En los espectros estas cantidades se visualizan con el símbolo ‘o’. En las tablas se presentan estas frecuencias, absolutas (fid), y normalizadas (fid/fel). La frecuencia por la cual se normaliza está asociada a un modo, el cual se presenta también en la tabla.

Cabe destacar que no siempre los máximos locales detectados en el espectro corresponden a modos de interés. A veces aparecen puntos que no tienen que ver con el problema y se desechan. Además,

estos puntos pueden dejar de evidenciar otros modos que sí son de interés. En ese caso se incluyen igualmente en las tablas, y se dejan en color gris.

CASO 1: SIMIL BILINEAL

Las frecuencias absolutas (fid), y normalizadas (fid/fel) en la Tabla 38, Tabla 40 y Tabla 39.

Gdl	R	Identificación Horizontal 1			Identificación Horizontal 2		
		Modo	fid [Hz]	fid/fel	Modo	fid [Hz]	fid/fel
16	1	9	7.62	1.01	1	0.82	0.96
16	2	9	7.59	1.01	1	0.79	0.92
16	5	9	7.16	0.95	1	0.67	0.78
16	8	9	7.21	0.96	-	-	-
23	1	9	7.63	1.01	1	0.83	0.97
23	2	9	7.61	1.01	1	0.81	0.94
23	5	9	7.17	0.95	1	0.7	0.82
23	8	9	7.23	0.96	1	0.43	0.50
31	1	1	0.85	0.99	9	7.63	1.01
31	2	1	0.83	0.97	9	7.61	1.01
31	5	1	0.76	0.89	9	7.19	0.95
31	8	1	0.62	0.72	9	7.26	0.96
39	1	1	0.85	0.99	2	2.74	1.00
39	2	1	0.84	0.98	2	2.73	1.00
39	5	1	0.79	0.92	2	2.73	1.00
39	8	1	0.7	0.82	2	2.71	0.99
55	1	1	0.85	0.99	2	2.71	0.99
55	2	1	0.85	0.99	2	2.7	0.99
55	5	1	0.81	0.94	2	2.68	0.98
55	8	1	0.75	0.87	2	2.63	0.96

TABLA 38: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS Y MODOS A LOS CUALES SE RELACIONA. RESULTADOS PARA SENSORES HORIZONTALES

Gdl	R	Identificación Vertical 1			Identificación Vertical 2		
		Modo	fid [Hz]	fid/fel	Modo	fid [Hz]	fid/fel
16	1	3	4.61	0.99	2.46	-	
16	2	3	4.61	0.99	2.46	-	
16	5	3	4.6	0.99	2.46	-	
16	8	3	4.6	0.99	2.46	-	
23	1	3	4.63	0.99	2.46	-	
23	2	3	4.63	0.99	2.46	-	
23	5	3	4.63	0.99	2.46	-	
23	8	3	4.62	0.99	2.46	-	
31	1	3	4.64	1.00	2.47	-	
31	2	3	4.64	1.00	2.48	-	

31	5	3	4.64	1.00	2.48	-	
31	8	3	4.63	0.99	2.48	-	
39	1	3	4.64	1.00	5	6.21	1.02
39	2	3	4.64	1.00	5	6.21	1.02
39	5	3	4.64	1.00	5	6.19	1.02
39	8	3	4.64	1.00	5	6.18	1.01
55	1	3	4.61	0.99	7	7.05	1.01
55	2	3	4.61	0.99	7	7.04	1.00
55	5	3	4.61	0.99	7	7.01	1.00
55	8	3	4.6	0.99	7	6.97	0.99

TABLA 39: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS Y MODOS A LOS CUALES SE RELACIONA. RESULTADOS PARA SENSORES VERTICALES

De la Figura 91 a la Figura 95 se presentan los espectros de potencia. Se incluye una leyenda gráfica con la posición del sensor, y líneas verticales ubicadas en las frecuencias elásticas calculadas, junto a el número de su modo.

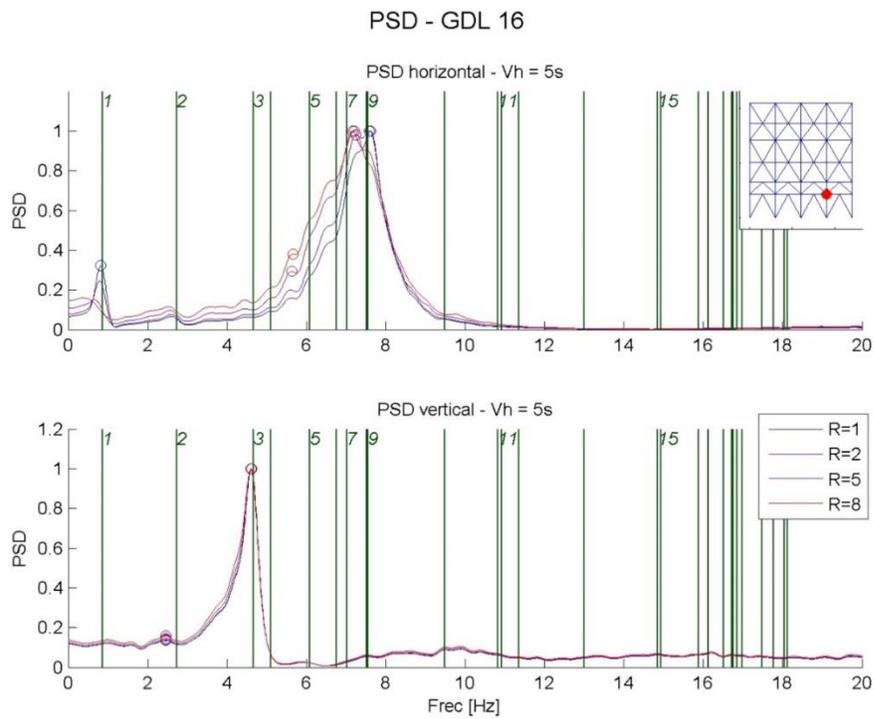


FIGURA 91: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 16 PARA CASO 1, HISTÉRESIS SIMIL BILINEAL

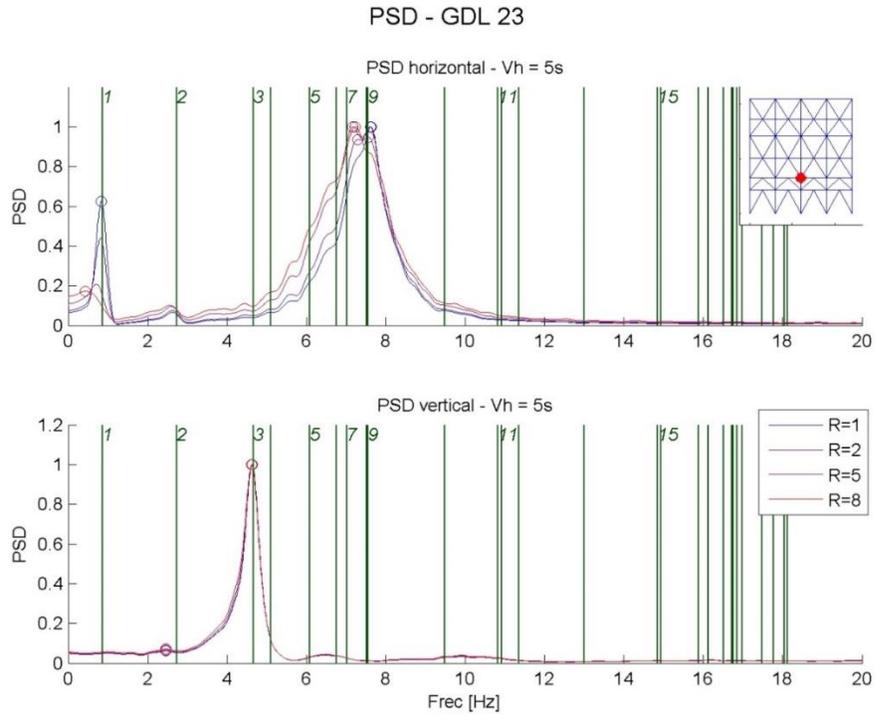


FIGURA 92: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 23 PARA CASO 1, HISTÉRESIS SIMIL BILINEAL

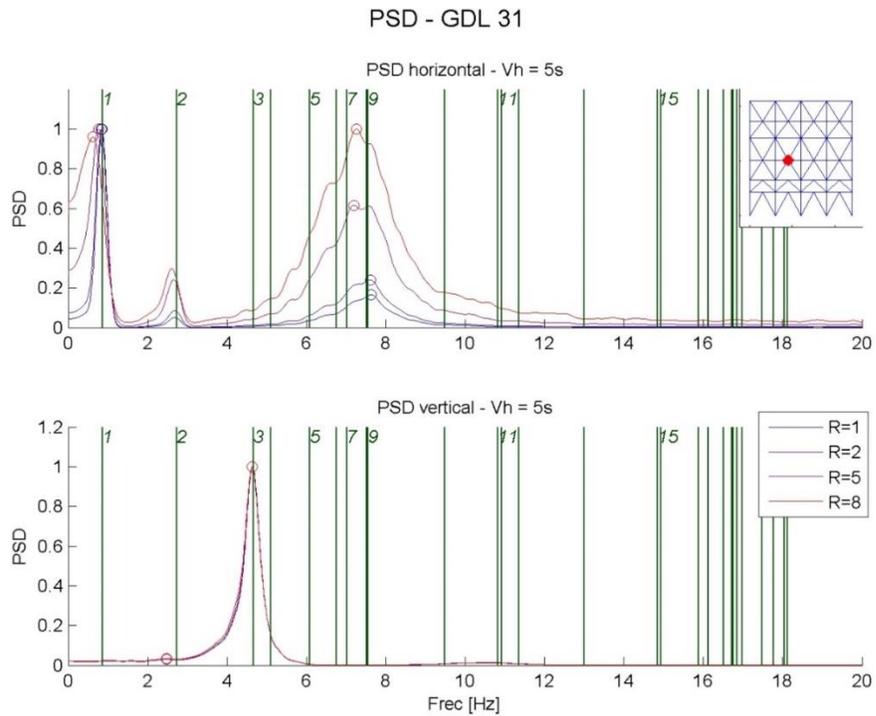


FIGURA 93: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 31 PARA CASO 1, HISTÉRESIS SIMIL BILINEAL

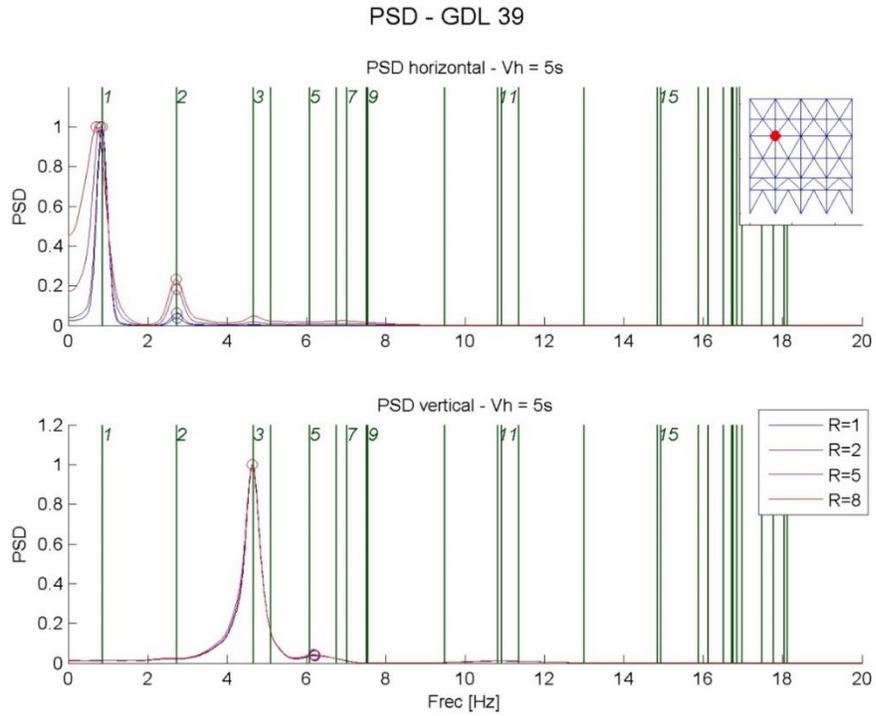


FIGURA 94: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 39 PARA CASO 1, HISTÉRESIS SIMIL BILINEAL

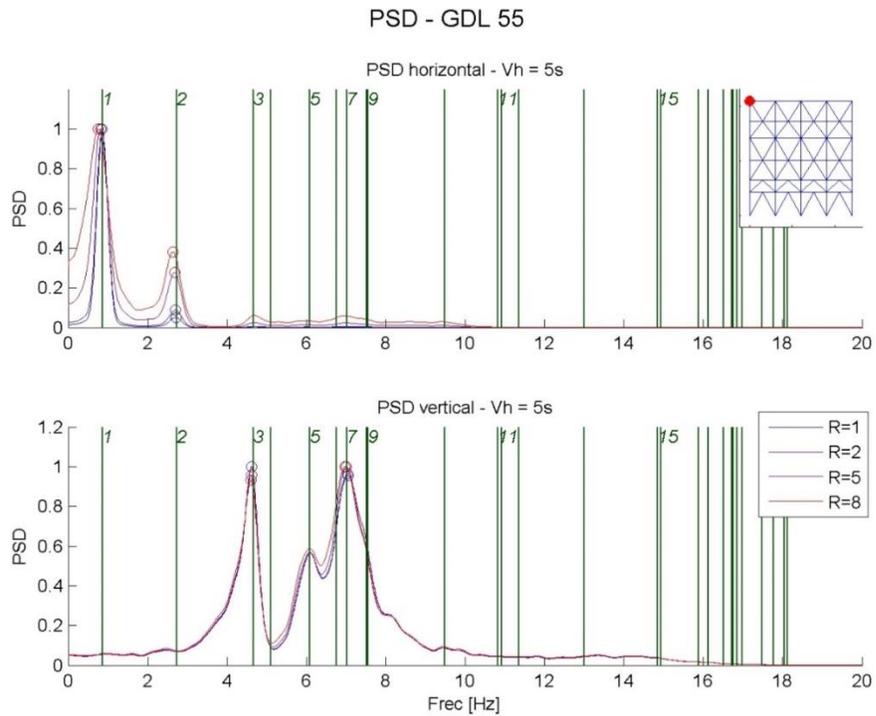


FIGURA 95: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 55 PARA CASO 1, HISTÉRESIS SIMIL BILINEAL

CASO 2: HISTÉRESIS SUAVIZADA

Al igual que en el caso anterior, se presentan las frecuencias absolutas (fid), y normalizadas (fid/fel) en las Tabla 40 y Tabla 41. Estos mismos resultados se encuentran en manera gráfica de la Figura 96 a la Figura 100.

Gdl	R	Identificación Horizontal 1			Identificación Horizontal 2		
		Modo	fid [Hz]	fid/fel	Modo	fid [Hz]	fid/fel
16	1	9	7.62	1.01	1	0.82	0.96
16	2	9	7.07	0.94	1	0.65	0.76
16	5	9	6.21	0.82	-	-	-
16	8	9	6.13	0.81	-	-	-
23	1	9	7.63	1.01	1	0.83	0.97
23	2	9	7.09	0.94	1	0.7	0.82
23	5	9	6.25	0.83	1	-	0.00
23	8	9	6.23	0.83	1	-	0.00
31	1	1	0.85	0.99	9	7.63	1.01
31	2	1	0.74	0.86	9	7.09	0.94
31	5	1	0.6	0.70	9	6.3	0.83
31	8	1	-	--	9	6.25	0.83
39	1	1	0.85	0.99	2	2.74	1.00
39	2	1	0.77	0.90	2	2.65	0.97
39	5	1	0.66	0.77	2	2.58	0.95
39	8	1	0.47	0.55	2	2.53	0.93
55	1	1	0.85	0.99	2	2.71	0.99
55	2	1	0.78	0.91	2	2.57	0.94
55	5	1	0.69	0.80	2	2.47	0.91
55	8	1	0.55	0.64	2	-	-

TABLA 40: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS Y MODOS A LOS CUALES SE RELACIONA. RESULTADOS PARA SENSORES HORIZONTALES. CASO 2, HISTÉRESIS SUAVIZADA.

Gdl	R	Identificación Vertical 1			Identificación Vertical 2		
		Modo	fid [Hz]	fid/fel	Modo	fid [Hz]	fid/fel
16	1	3	4.61	0.99		2.46	-
16	2	3	4.6	0.99		2.46	-
16	5	3	4.59	0.99		2.46	-
16	8	3	4.58	0.98		2.46	-
23	1	3	4.63	0.99		2.46	-
23	2	3	4.62	0.99		2.46	-
23	5	3	4.61	0.99		2.46	-
23	8	3	4.6	0.99		2.46	-
31	1	3	4.64	1.00		2.47	-
31	2	3	4.63	0.99		2.48	-
31	5	3	4.62	0.99		2.48	-
31	8	3	4.62	0.99		2.48	-
39	1	3	4.64	1.00	5	6.21	1.02
39	2	3	4.63	0.99	5	6.16	1.01
39	5	3	4.63	0.99	5	6.14	1.01
39	8	3	4.62	0.99	5	6.12	1.00
55	1	3	4.61	0.99	7	7.05	1.01
55	2	3	4.6	0.99	7	6.93	0.99
55	5	3	4.59	0.99	7	6.88	0.98
55	8	3	4.58	0.98	7	6.86	0.98

TABLA 41: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS Y MODOS A LOS CUALES SE RELACIONA. RESULTADOS PARA SENSORES VERTICALES. CASO 2, HISTÉRESIS SUAVIZADA.

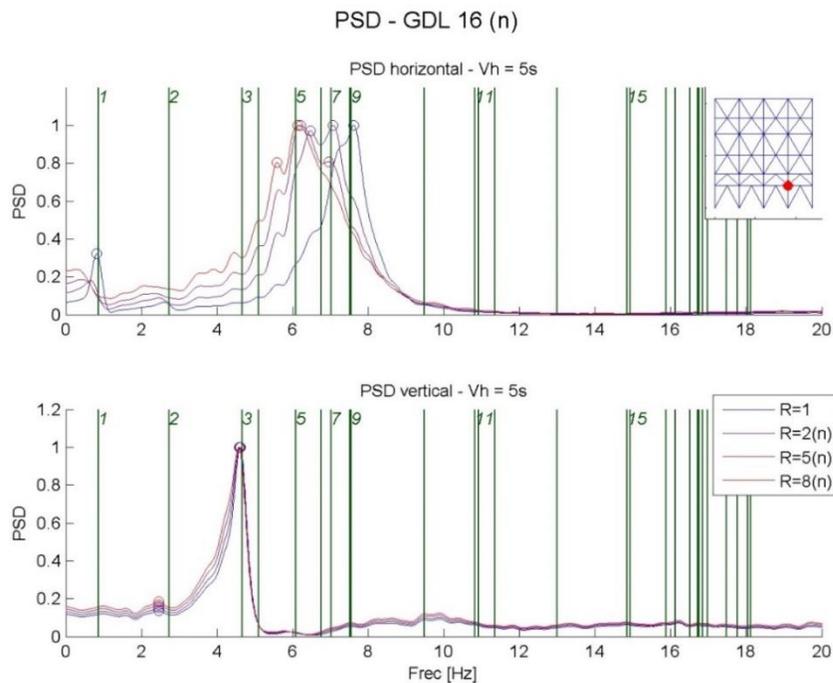


FIGURA 96: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 16 PARA CASO 2, HISTÉRESIS SUAVIZADA

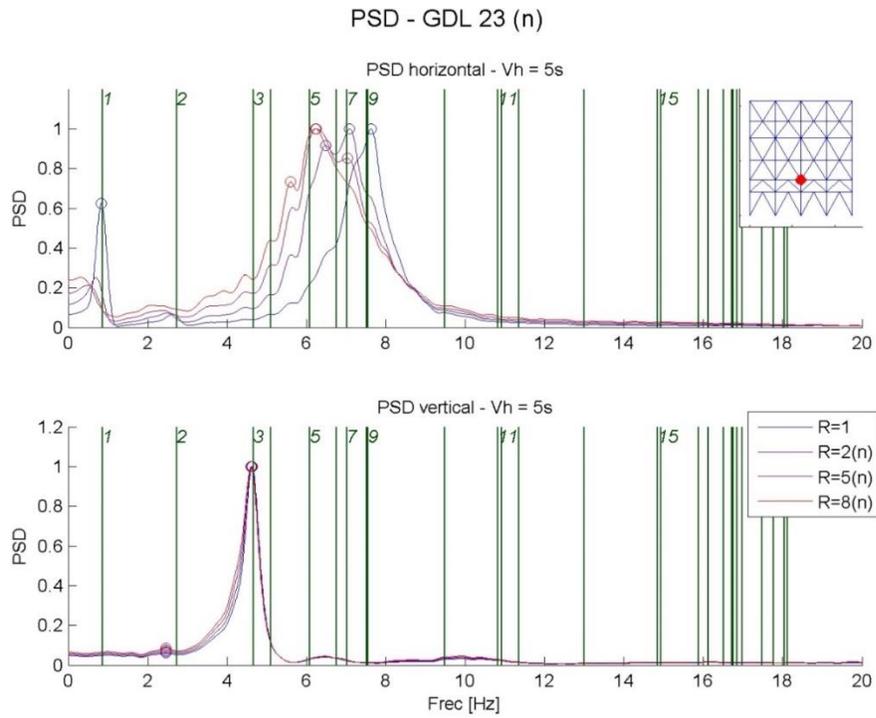


FIGURA 97: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 23 PARA CASO 2, HISTÉRESIS SUAVIZADA

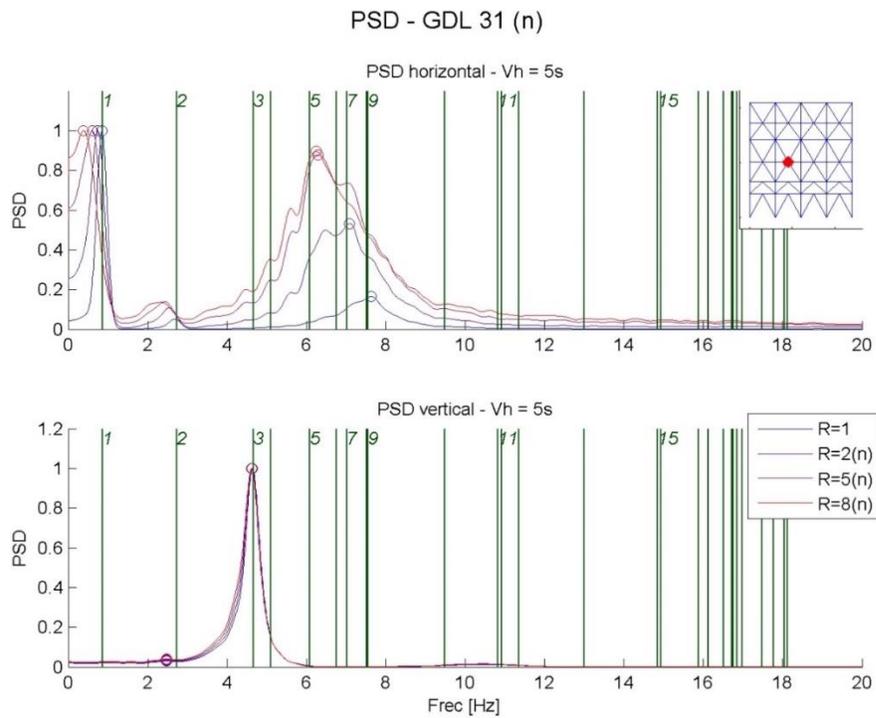


FIGURA 98: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 31 PARA CASO 2, HISTÉRESIS SUAVIZADA

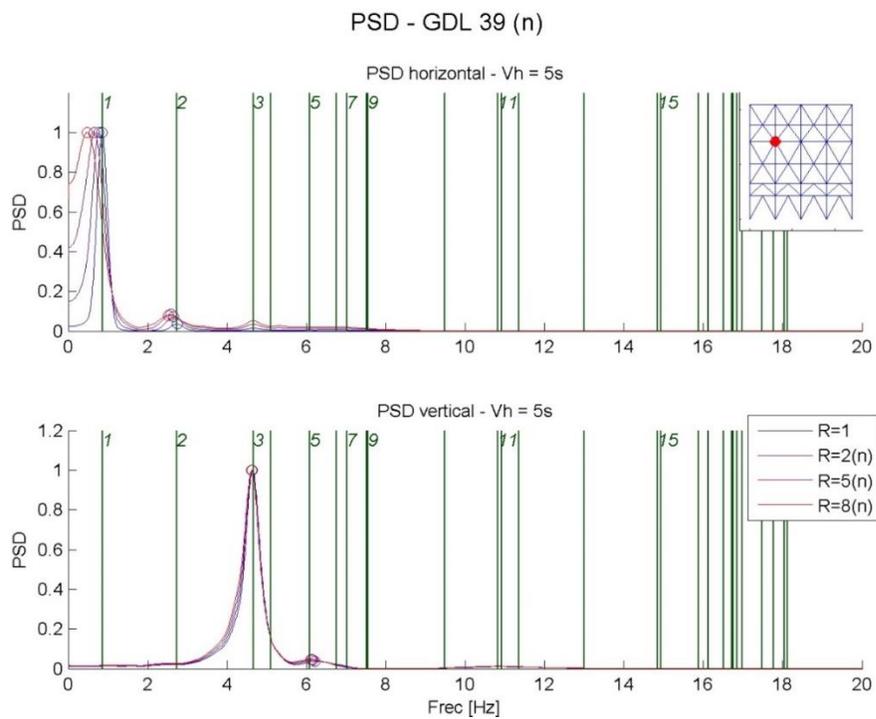


FIGURA 99: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 39 PARA CASO 2, HISTÉRESIS SUAVIZADA

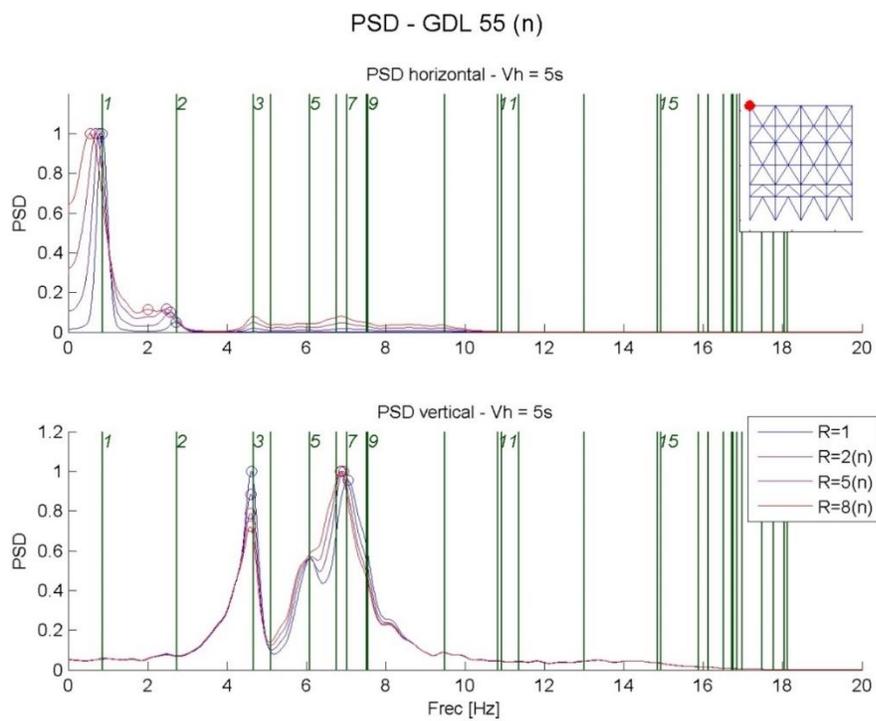


FIGURA 100: ESPECTRO DE POTENCIA DE SENSOR EN GDL 55 PARA CASO 2, HISTÉRESIS SUAVIZADA

RESUMEN PSD

Los mismos resultados de las tablas expuestas en esta unidad, pueden ser agrupados por modos. Para algunos de ellos, el 1 el 2 y el 9, se presentan los resultados resumidos en las Tabla 42, Tabla 43, y Tabla 44, respectivamente; mostrando solo el valor de la frecuencia normalizada (fid/fel)

		Modo 1	fid/fel				
		R	gdl 55	gdl 39	gdl31	gdl23	gdl16
Caso 1	1	0.99	0.99	0.99	0.97	0.96	
	2	0.99	0.98	0.97	0.94	0.92	
	5	0.94	0.92	0.89	0.82	0.78	
	8	0.87	0.82	0.72	0.50	-	
Caso 2	1	0.99	0.99	0.99	0.97	0.96	
	2	0.91	0.90	0.86	0.82	0.76	
	5	0.80	0.77	0.70	-	-	
	8	0.64	0.55	--	-	-	

TABLA 42: RESULTADOS RESUMIDOS DE IDENTIFICACIÓN PSD PARA MODO 1.

		Modo 2	fid/fel	
		R	gdl 39	gdl 55
Caso 1	1	1.00	0.99	
	2	1.00	0.99	
	5	1.00	0.98	
	8	0.99	0.96	
Caso 2	1	1.00	0.99	
	2	0.97	0.94	
	5	0.95	0.91	
	8	0.93		

TABLA 43: RESULTADOS RESUMIDOS DE IDENTIFICACIÓN PSD PARA MODO 2.

		Modo 9	fid/fel		
		R	gdl 31	gdl 23	gdl 16
Caso 1	1	1.01	1.01	1.01	1.01
	2	1.01	1.01	1.01	1.01
	5	0.95	0.95	0.95	0.95
	8	0.96	0.96	0.96	0.96
Caso 2	1	1.01	1.01	1.01	1.01
	2	0.94	0.94	0.94	0.94
	5	0.83	0.83	0.82	0.82
	8	0.83	0.83	0.81	0.81

TABLA 44: RESULTADOS RESUMIDOS DE IDENTIFICACIÓN PSD PARA MODO 9.

5.3.2 RESULTADOS SSI-COV

Los resultados para el análisis de SSI-COV se presentarán en frecuencia, amortiguamiento, y formas modales. Como se realizan varios análisis, cada uno con instrumentaciones en distintos nodos (Tabla 37), se presentan primero aquella más completa (Instrumentación B). Posteriormente, se presentan las diferencias que se obtienen cuando se reduce el número de sensores (Instrumentación C y D).

Se presentarán las Tablas con la frecuencia absoluta (fid), y normalizada (fid/fel), así como las tablas con el amortiguamiento identificado (β_{id}), y la razón de aumento de amortiguamiento respecto al elástico (β_{id}/β_{el}). Se podrán ver gráficamente estos resultados en los Diagramas de Estabilización y Clusters. En estos últimos, se incluye la curva de Rayleigh que define el amortiguamiento inicial, y líneas de fondo que representan las frecuencias elásticas del sistema.

Se presentan también en tablas la dispersión de los vectores que componen la forma modal, o dispersión de la forma modal (dispFM), que se cuantifica mediante el menor MAC obtenido entre los vectores que están asociados a una misma forma, sea en uno o varios bins. Este valor se mostrará en tablas para cada caso.

Las formas modales se presentan también de manera gráfica a modo de ejemplo, ploteando las formas modales identificadas sobre la elástica calculada. También se incluye el criterio MAC gráficamente: se plotea el valor que alcanza MAC del vector identificado vs cada vector de la forma modal calculada.

Cabe destacar que dados los resultados del capítulo 4, acerca de la identificación de sistemas de 1 grado de libertad, se optó por aumentar la tolerancia al amortiguamiento en el momento de hacer el filtrado automático de la identificación con Triple Acierto mencionada en el capítulo 3.2.5, así como la tolerancia al error en frecuencia. Dichos parámetros quedan reflejados en la Tabla 45. La Cantidad mínima de triple Aciertos a partir de la cual un bin pasa a ser un modo o parte de este, fue $minTA = 10$.

	Caso				
	NL	tolf	tol β	tolFM	Δf [Hz]
Caso 1	R = 1	0.01	0.05	0.02	0.03
	R = 2	0.10	0.90	0.10	0.3
	R = 5	0.10	0.90	0.10	0.3
	R = 8	0.10	0.90	0.10	0.3
Caso 2	R = 1	0.01	0.05	0.02	0.03
	R = 2	0.10	0.90	0.08	0.3
	R = 5	0.10	0.90	0.08	0.3
	R = 8	0.10	0.90	0.05	0.3

TABLA 45: PARÁMETROS PARA FILTRADO TRIPLE ACIERTO SEGUN CASO DE IDENTIFICACIÓN Y NIVEL DE NO LINEALIDAD

Finalmente, se comparan las formas modales identificadas a medida que se aumenta la incursión en el rango no lineal, es decir, el criterio MAC entre el vector forma modal promedio resultante de cada proceso, dentro de una misma instrumentación. Se presenta un cuadro de comparación MAC para cada modo, y se destaca su mínimo valor.

CASO 1: SIMIL BILINEAL

INSTRUMENTACIÓN B: 24 SENSORES.

Se presentan la Tabla 46 con las frecuencias identificadas. Cada fila contiene los datos de un caso. Cada columna representa a un modo. La ausencia de datos en varias celdas implica que para ese caso, no se identificaron datos asociables a ese modo. La Tabla 47, por su parte muestra los datos asociados a amortiguamiento.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
fid [Hz]	R = 1	0.86	2.71	4.65		6.11	6.70	7.03		7.52		10.84
	R = 2	0.85	2.70	4.66		6.10		6.99		7.50		10.73
	R = 5	0.82	2.63	4.65		6.08		6.95		7.42		10.69
	R = 8	0.76	2.60	4.63		6.06				7.38		
fid/fel	R = 1	1.00	0.99	1.00		1.00	0.99	1.00		1.00		1.00
	R = 2	0.99	0.99	1.00		1.00		1.00		0.99		0.99
	R = 5	0.96	0.96	1.00		1.00		0.99		0.98		0.99
	R = 8	0.89	0.95	0.99		0.99				0.98		

TABLA 46: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS PARA CASO 1 - INSTRUMENTACIÓN B

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
β_{id} [%]	R = 1	3.34	2.90	4.24		5.43	6.37	6.52		6.69		9.42
	R = 2	4.32	2.94	4.51		5.50		6.38		6.72		9.01
	R = 5	15.8	3.4	4.5		5.7		7.0		8.1		9.4
	R = 8	15.4	5.5	4.7		6.1				10.4		
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.12	0.96	0.97		0.99	1.06	1.05		1.01		1.01
	R = 2	1.45	0.98	1.04		1.01		1.03		1.01		0.97
	R = 5	5.29	1.12	1.03		1.04		1.13		1.22		1.01
	R = 8	5.15	1.84	1.07		1.12				1.57		

TABLA 47: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS PARA CASO 1 – INSTRUMENTACIÓN B

La dispersión de las formas modales se muestra en la Tabla 48. Notar que para esta identificación en el caso lineal y elástico, se logra baja dispersión en la identificación en los modos principales horizontal y vertical (1ero, 2do, 3ero y 9no), El modo n°5, n°6 y n°7, presentan un bajo ajuste en forma modal incluso para la identificación lineal.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
dispFM	R = 1	1.00	0.98	0.98		0.18	0.84	0.47		0.98		0.86

R = 2	1.00	0.99	0.31	0.25	0.85	0.90	0.66
R = 5	0.99	0.94	0.66	0.23	0.44	0.91	0.46
R = 8	1.00	0.92	0.97	0.16		0.92	

TABLA 48: DISPERSIÓN DE LA FORMA MODALES IDENTIFICADAS.

Entre la Figura 101 y la Figura 104 se representan gráficamente los datos de la identificación, mostrando Diagrama de Estabilización y Cluster. En ellos se aprecia el aumento del amortiguamiento a medida que aumenta la no linealidad, manteniéndose en la línea punteada que define la frecuencia elástica. También se puede ver la desaparición de algunos modos a medida que se entra en el rango no lineal.

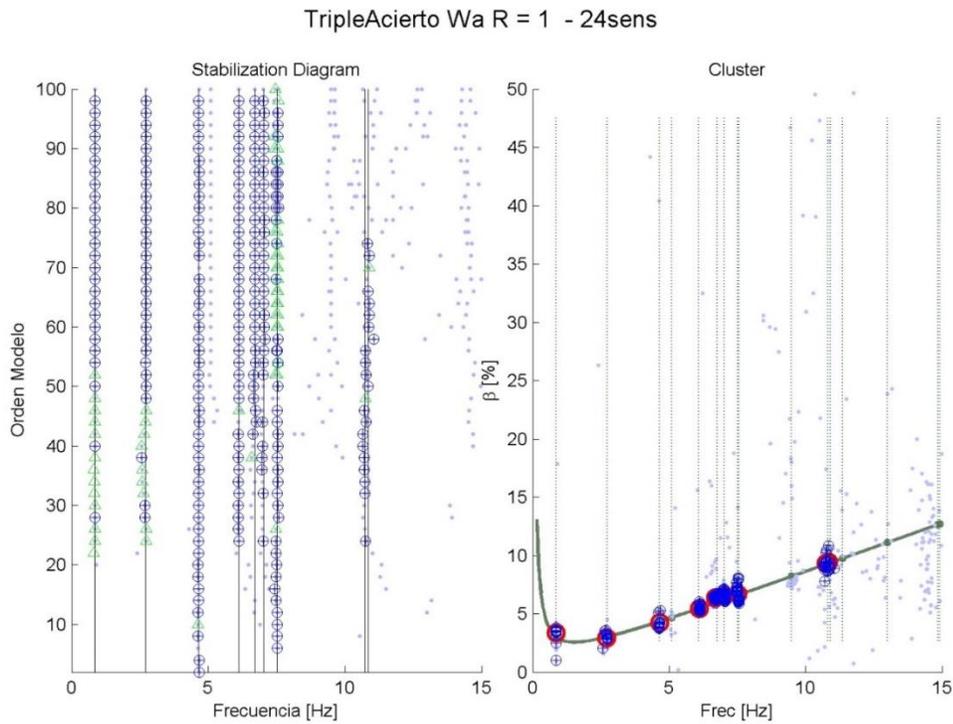


FIGURA 101: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DE IDENTIFICACIÓN CASO 1, SSI-COV. R = 1 (LINEAL Y ELASTICO)

TripleAcierto Wa R = 2 - 24sens

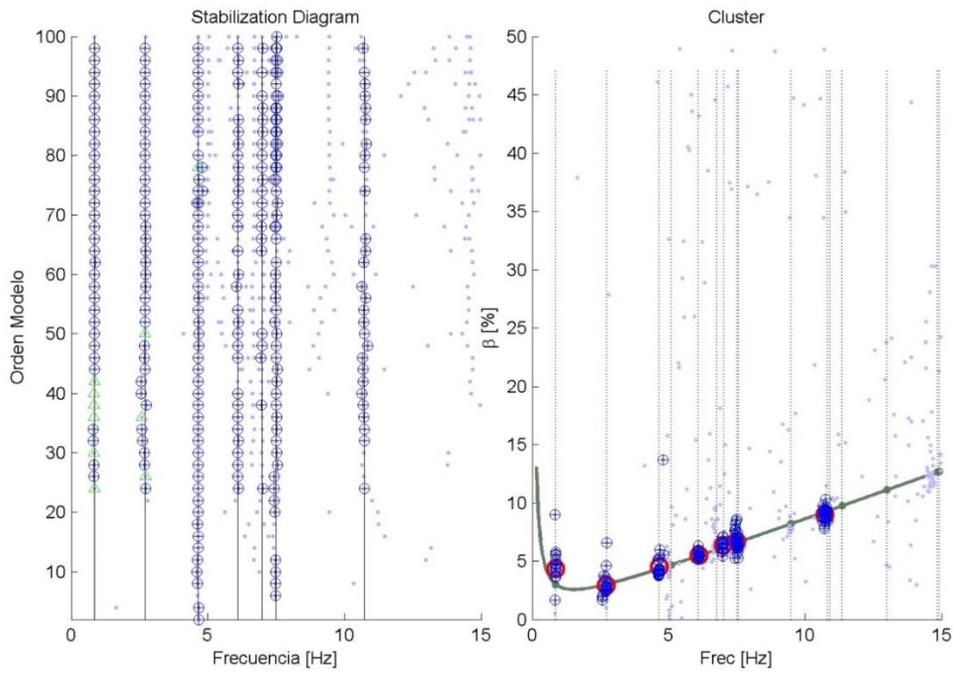


FIGURA 102: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DE IDENTIFICACIÓN CASO 1, SSI-COV. R = 2 (BAJA NO LINEALIDAD)

TripleAcierto Wa R = 5 - 24sens

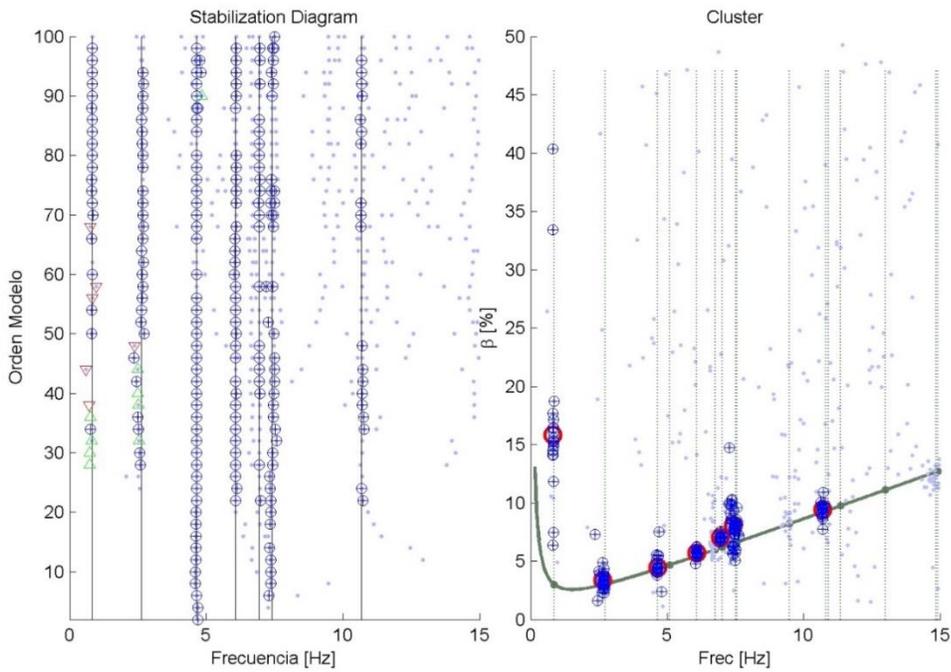


FIGURA 103: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DE IDENTIFICACIÓN CASO 1, SSI-COV. R = 5 (NO LINEALIDAD MEDIA)

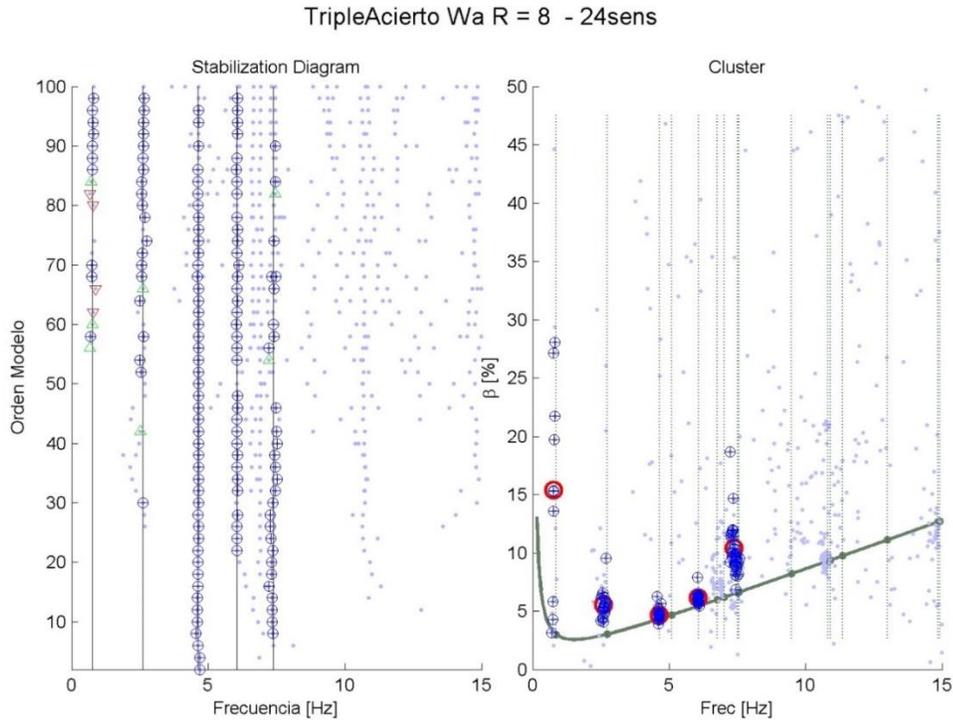


FIGURA 104: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DE IDENTIFICACIÓN CASO 1, SSI-COV. R=8 (NO LINEALIDAD ALTA).

Las formas modales, por su parte, se muestran en las figuras siguientes. La Figura 105 muestra la primera forma modal identificada en la respuesta lineal ($R = 1$) sobre la forma modal calculada. La forma modal identificada se plotea a manera de puntos sobre los nodos, y barras que unen a estos representando los elementos, para cada vector que compone la forma modal (uno por cada orden). Se plotea también el criterio MAC, específicamente el promedio del valor de MAC de cada vector de la forma modal, versus la forma modal elástica. En esta figura se puede ver que alcanza un alto valor MAC con la forma modal 1, lo cual se condice con el gráfico.

De la misma forma, se plotea la primera forma modal identificada en la Figura 106, pero esta vez en el proceso $R = 5$. En la Figura 107 se visualiza la identificación para alta no linealidad ($R=8$). Se aprecia que la forma modal se mantiene respecto a la inicial.

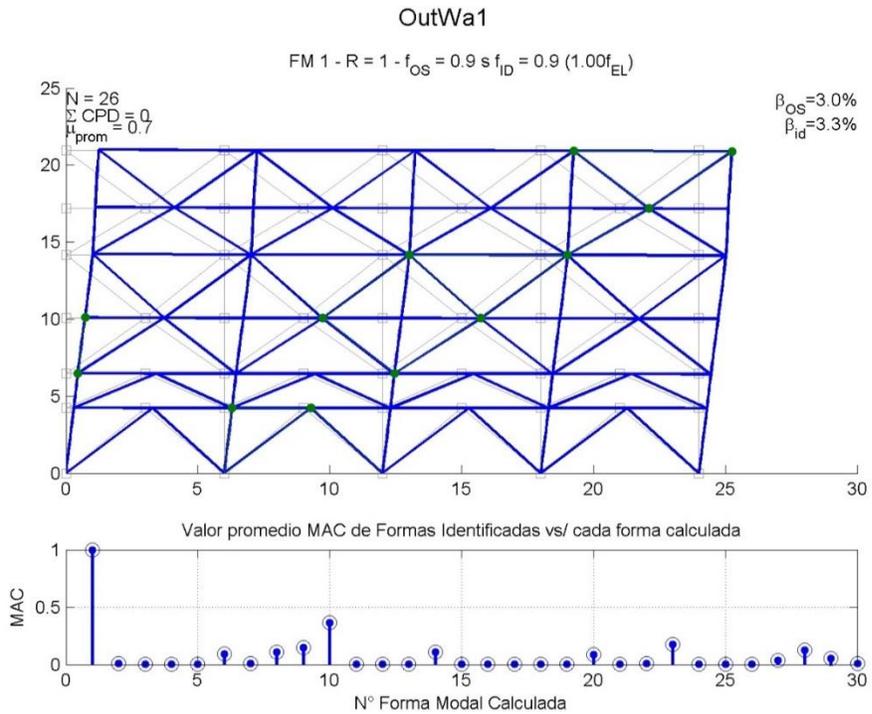


FIGURA 105: FORMA MODAL IDENTIFICADA EN PROCESO LINEAL Y ELÁSTICO ($R=1$), POR SOBRE LA PRIMERA FORMA MODAL ELÁSTICA. SE INCLUYE CRITERIO MAC DE LA FORMA MODAL VS LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS.

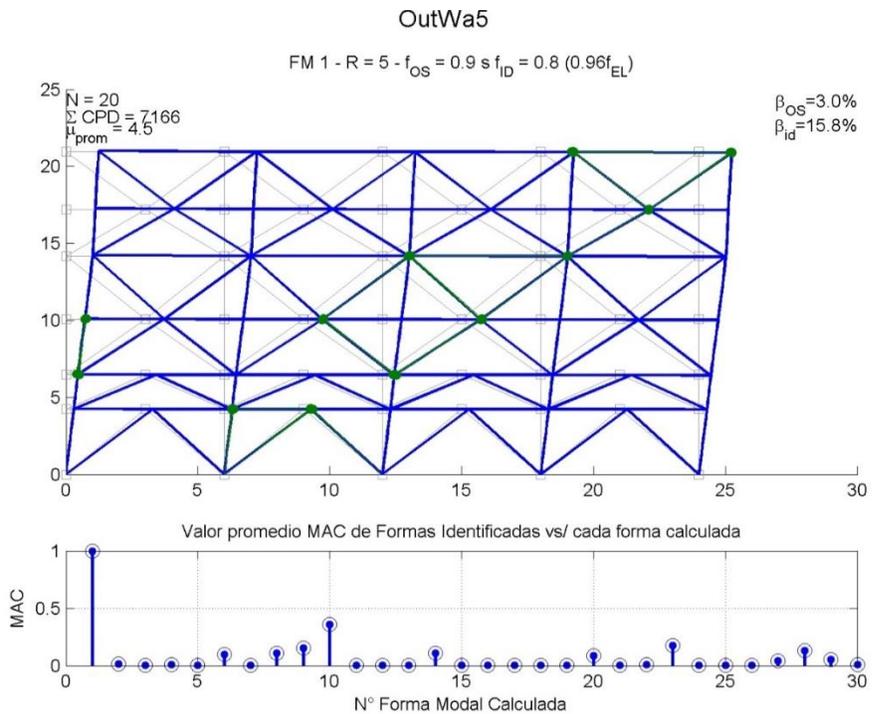


FIGURA 106: FORMA MODAL IDENTIFICADA EN PROCESO DE NO LINEALIDAD MEDIA ($R=5$), POR SOBRE LA PRIMERA FORMA MODAL ELÁSTICA. SE INCLUYE CRITERIO MAC DE LA FORMA MODAL VS LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS.

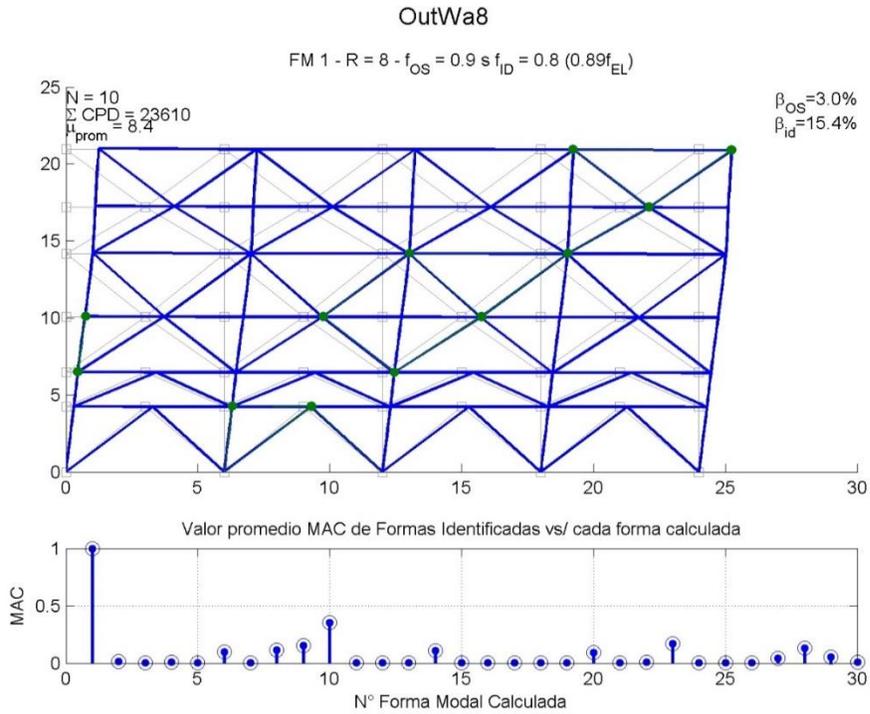


FIGURA 107: FORMA MODAL IDENTIFICADA EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD (R=8), POR SOBRE LA PRIMERA FORMA MODAL ELÁSTICA. SE INCLUYE CRITERIO MAC DE LA FORMA MODAL VS LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS.

La forma modal 2 por su parte, describe resultados similares a la forma modal 1. Se muestra en la Figura 108 la forma modal identificada para el proceso lineal (R=1) y en la Figura 109 la forma modal identificada para el proceso de alta no linealidad R = 8. Se puede ver en esta última una pequeña dispersión en la determinación de la forma, aunque de todas maneras se visualiza claramente la forma modal 2.

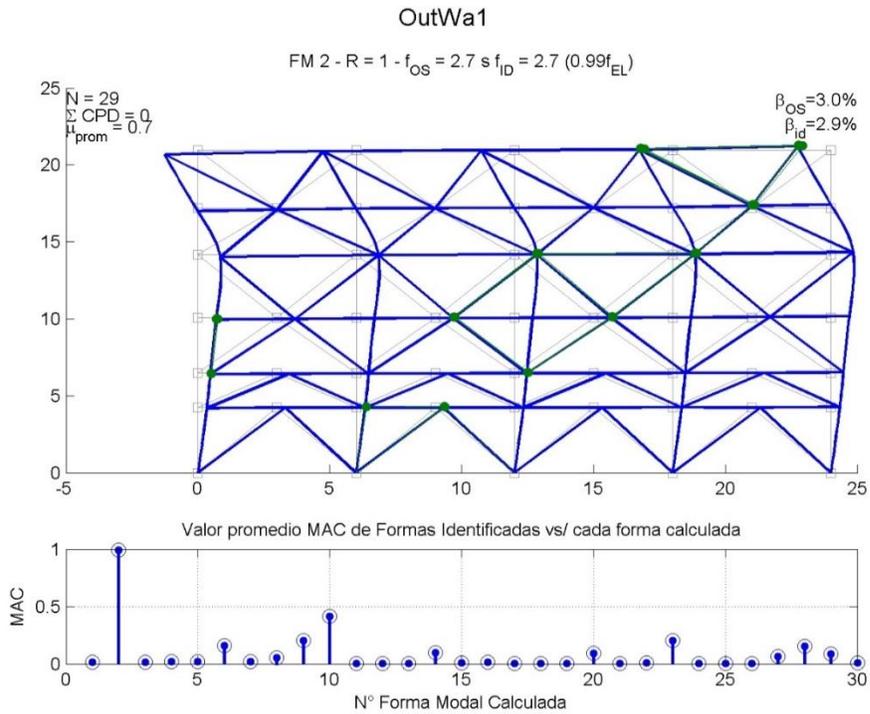


FIGURA 108: FORMA MODAL IDENTIFICADA EN PROCESO LINEAL Y ELÁSTICO ($R=1$), POR SOBRE LA FORMA MODAL ELÁSTICA 2. SE INCLUYE CRITERIO MAC DE LA FORMA MODAL VS LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS.

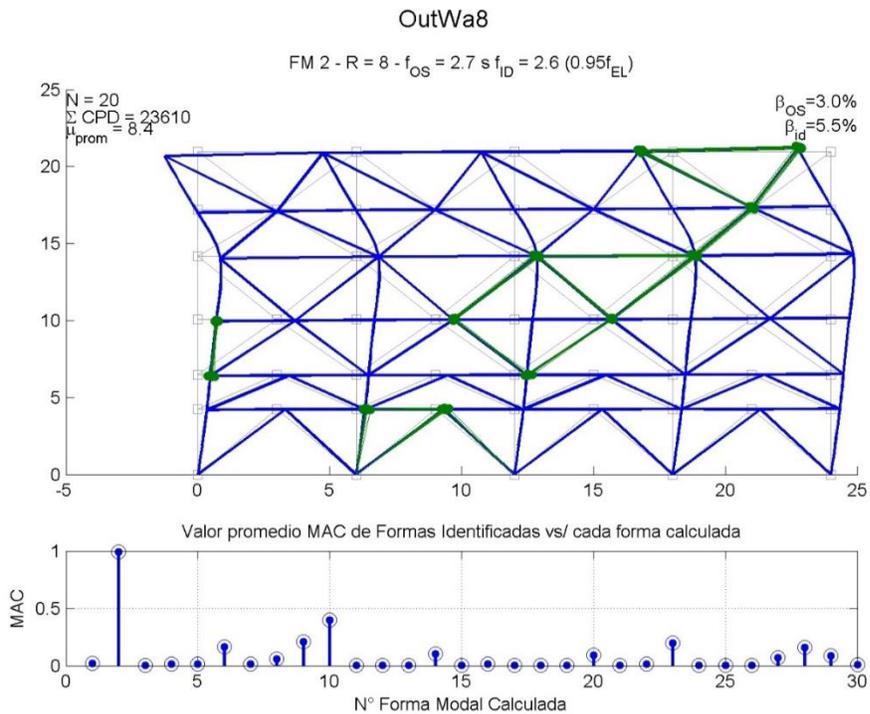


FIGURA 109: FORMA MODAL IDENTIFICADA EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD ($R=8$), POR SOBRE LA FORMA MODAL ELÁSTICA 2. SE INCLUYE CRITERIO MAC DE LA FORMA MODAL VS LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS.

Se incluye también la forma modal 9, que se puede reconocer como la tercera forma modal que moviliza masa horizontal. La Figura 110 muestra la identificación del proceso lineal ($R = 1$),

mientras que la Figura 111 el proceso de alta no linealidad ($R = 8$). Para esta forma modal, hay un aumento en la dispersión en la determinación de la forma.

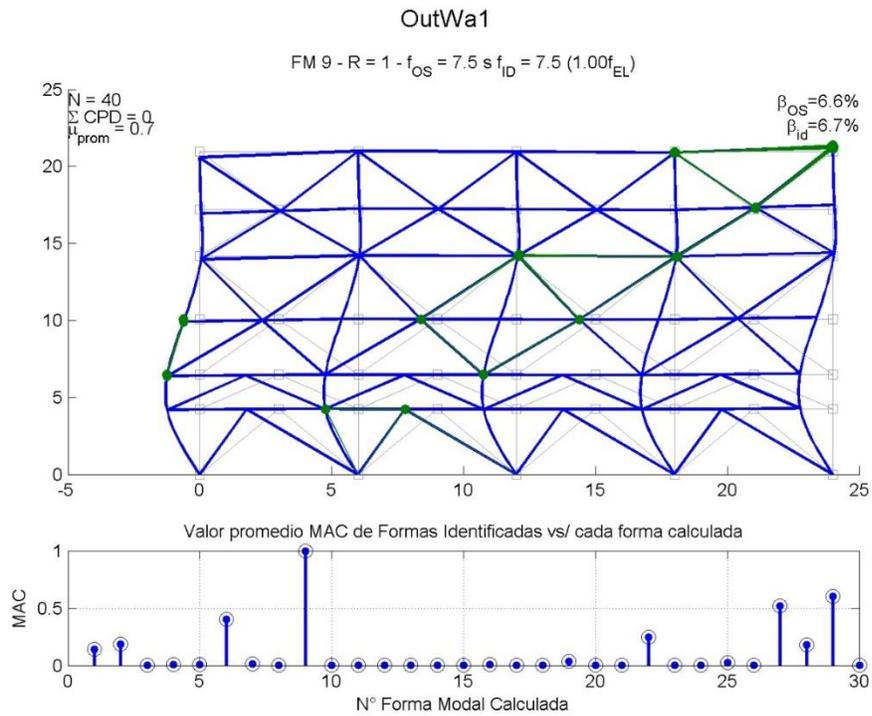


FIGURA 110: FORMA MODAL IDENTIFICADA EN PROCESO LINEAL Y ELÁSTICO ($R=1$), POR SOBRE LA FORMA MODAL ELÁSTICA 9. SE INCLUYE CRITERIO MAC DE LA FORMA MODAL VS LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS.

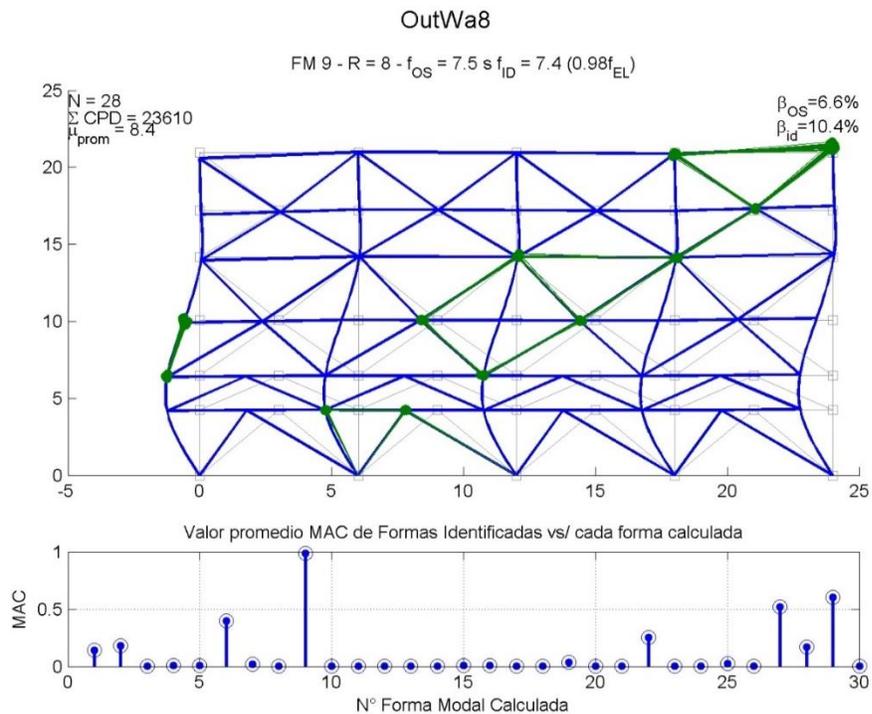


FIGURA 111: FORMA MODAL IDENTIFICADA EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD ($R=8$), POR SOBRE LA FORMA MODAL ELÁSTICA 9. SE INCLUYE CRITERIO MAC DE LA FORMA MODAL VS LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS.

La principal forma modal vertical, la número 3, también se identifica. Cabe descartar que esta no sufre grandes variaciones, debido a que la energía elástica implícita en esta forma está descrita en gran medida por la extensión y compresión de las columnas, que se mantienen lineales y elásticas en todos los procesos.

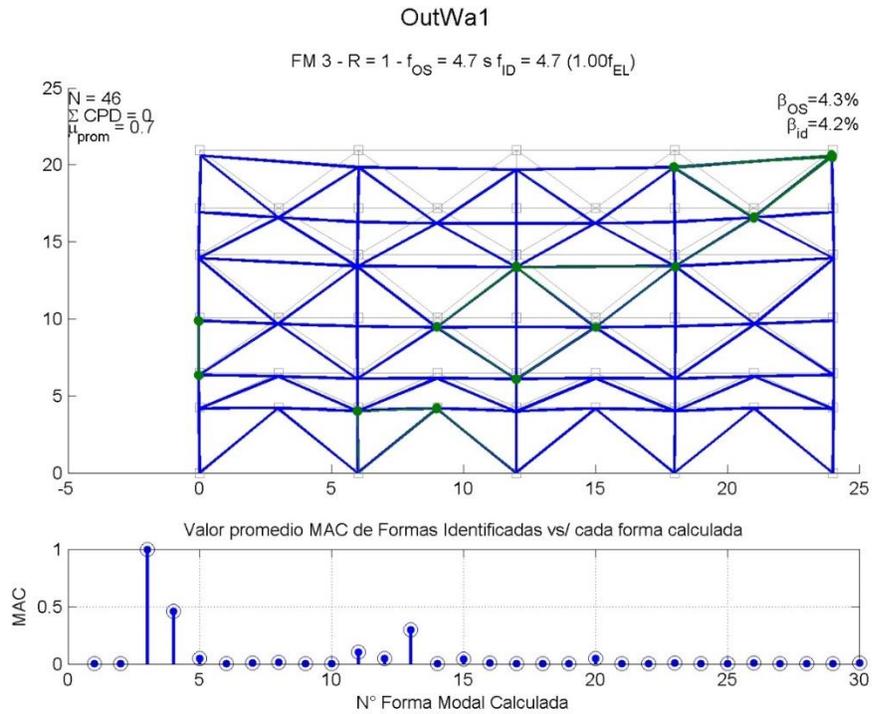


FIGURA 112: FORMA MODAL IDENTIFICADA EN PROCESO LINEAL Y ELÁSTICO (R=1), POR SOBRE LA FORMA MODAL ELÁSTICA 3. SE INCLUYE CRITERIO MAC DE LA FORMA MODAL VS LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS.

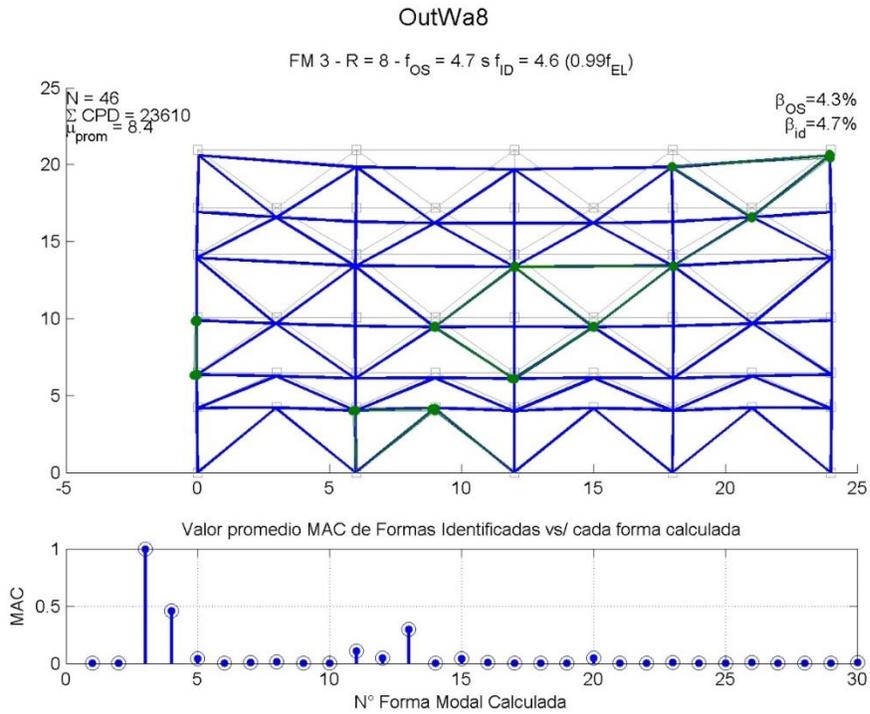


FIGURA 113: FORMA MODAL IDENTIFICADA EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD (R=8), POR SOBRE LA FORMA MODAL ELÁSTICA 3. SE INCLUYE CRITERIO MAC DE LA FORMA MODAL VS LAS FORMAS MODALES ELÁSTICAS.

Se presenta en la Figura 114 la comparación en ortogonalidad entre las formas modales identificadas en cada proceso. Para ello, se selecciona el conjunto de vectores que componen la forma modal de un modo y se promedian, y luego se hace MAC entre estas formas modales promediadas. Se incluye también el valor mínimo de todos los MAC obtenidos en este proceso, como una medida de la pérdida de ortogonalidad al incurrir en el rango no lineal.

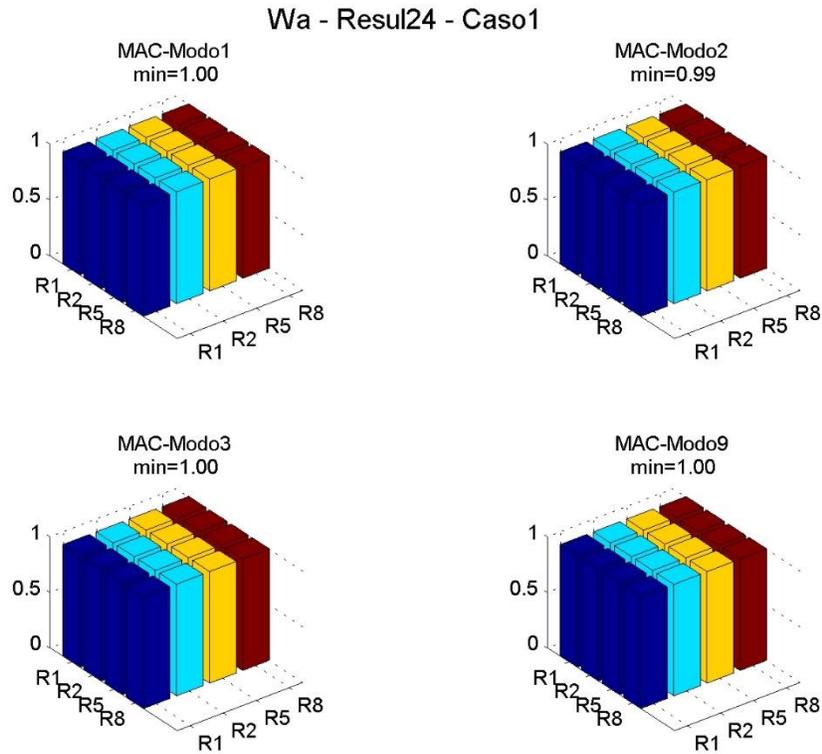


FIGURA 114: MAC ENTRE LA FORMA MODAL PROMEDIO IDENTIFICADA PARA CADA PROCESO DEL CASO 1 – INSTRUMENTACIÓN B.

INSTRUMENTACIÓN C: 4 SENSORES

La instrumentación de 4 sensores da resultados consistentes con la Instrumentación B, con 24 sensores. De cualquier forma, la información que se puede recabar es menor y aumentan los modos espurios, aún después del filtrado Triple Acierto. Debido a esto, se muestran solamente algunos gráficos para remarcar aquellas diferencias.

La Tabla 49 y la Tabla 50 muestran la frecuencia y amortiguamiento identificado con la instrumentación C. Se incluyen los valores absolutos y los normalizados por los parámetros modales expuestos en la Tabla 33 y Tabla 34. La Tabla 51 por su parte, compara esta identificación con la realizada con 24 sensores, es decir la Instrumentación B.

Modo:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	15	16
fid [Hz]	R = 1	0.87	2.71	4.63		6.11	6.85	6.98		7.50		14.78
	R = 2	0.85	2.69	4.61		6.10	6.83	6.97		7.54		14.74
	R = 5	0.81	2.66	4.61			6.54	6.83			14.23	14.77
	R = 8	0.76	2.63	4.79			0.00	6.85				
fid/fel	R = 1	1.01	0.99	1.00		1.00	1.01	1.00		0.99		0.99
	R = 2	0.99	0.98	0.99		1.00	1.01	0.99		1.00		0.99
	R = 5	0.95	0.97	0.99			0.97	0.97			0.96	0.99
	R = 8	0.88	0.96	1.03			0.00	0.98				

TABLA 49: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS PARA CASO 1 - INSTRUMENTACIÓN C

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15	16
$\beta_{id} [\%]$	R = 1	4.70	3.02	4.94		5.29	8.51	8.49		6.88		11.42
	R = 2	5.91	3.63	5.17		6.55	8.94	8.52		6.78		11.28
	R = 5	16.41	4.27	5.12			8.63	9.92			8.57	11.35
	R = 8	31.05	6.72	9.01				9.38				11.30
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.57	1.00	1.14		0.97	1.42	1.37		1.04		0.90
	R = 2	1.98	1.21	1.19		1.20	1.49	1.38		1.02		0.89
	R = 5	5.49	1.42	1.18			1.44	1.60			0.68	0.89
	R = 8	10.38	2.23	2.07				1.52				0.89

TABLA 50: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADAS PARA CASO 1 - INSTRUMENTACIÓN C

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fidC/fidB	R = 1	1.01	1.00	1.00		1.00	1.02	0.99		1.00
	R = 2	1.01	1.00	0.99		1.00		1.00		1.01
	R = 5	0.99	1.01	0.99				0.98		
	R = 8	0.99	1.01	1.03						
β_{idC}/β_{idB}	R = 1	1.41	1.04	1.17		0.98	1.34	1.30		1.03
	R = 2	1.37	1.24	1.15		1.19		1.34		1.01
	R = 5	1.04	1.26	1.15				1.42		
	R = 8	2.02	1.21	1.93						

TABLA 51: COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS Y AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS CON 24 SENSORES (INSTRUMENTACIÓN B) Y 4 SENSORES (INSTRUMENTACIÓN C). LOS VALORES CORRESPONDE A LA RAZÓN ENTRE “C” Y “B”.

La dispersión de las formas modales se muestra en la Tabla 52 Tabla 48.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
dispFM	R = 1	1.00	0.99	0.92		1.00	0.57	0.21		0.84	0.98
	R = 2	1.00	0.99	0.94		0.40	0.43	0.32		0.55	0.96
	R = 5	1.00	0.97	0.95		0.46	0.08	0.28			0.65
	R = 8	1.00	0.73	0.97		0.40		0.19			0.06

TABLA 52: DISPERSIÓN DE LA FORMA MODALES IDENTIFICADAS.

La Figura 115 muestra el diagrama de Estabilización y Cluster correspondiente a esta instrumentación, para el proceso lineal y elástico ($R = 1$), y la Figura 116 para el proceso de alta no linealidad ($R=8$). Los diagramas correspondientes a $R = 2$ y $R = 5$, siguen la misma tendencia observada en la instrumentación B, solamente que con mayor dispersión y también con la aparición de modos espurios aún después del filtrado.

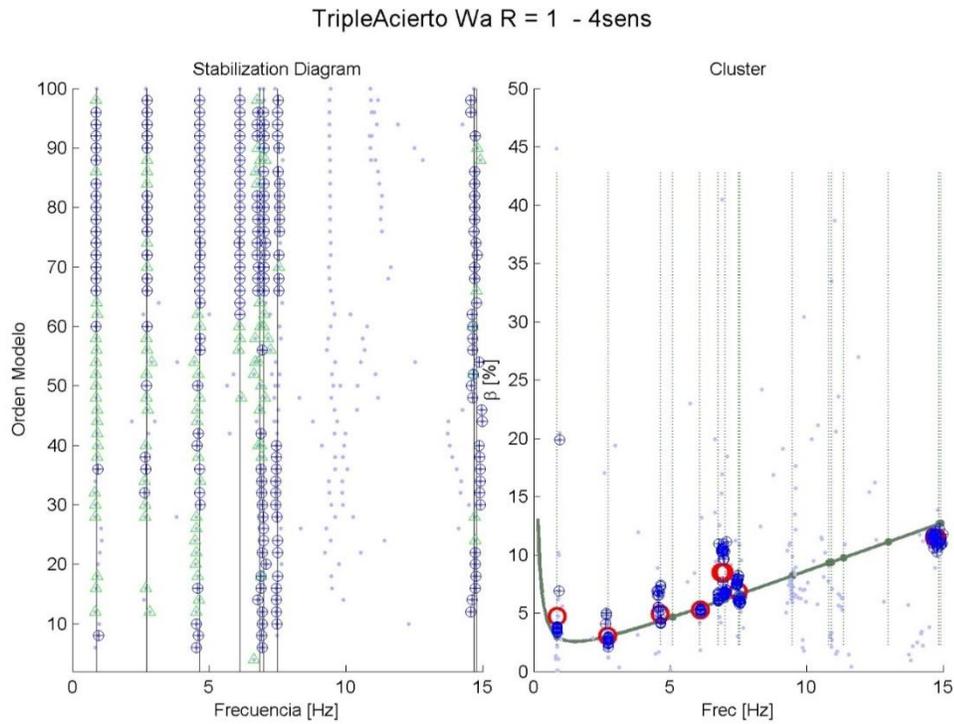


FIGURA 115: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER PARA PROCESO LINEAL Y ELASTICO – INSTRUMENTACIÓN C CON 4 SESORES.

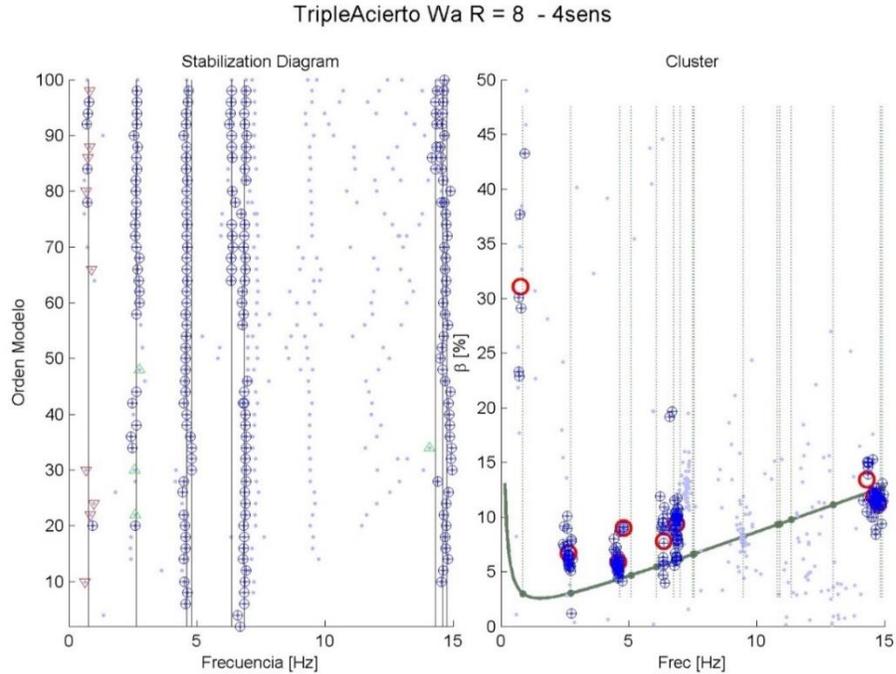


FIGURA 116: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER PARA PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD (R= 8) – INSTRUMENTACIÓN C CON 4 SESORES.

Para esta instrumentación, la primera forma modal que se identifica se visualiza claramente incluso para altas no linealidad (Figura 117). La forma modal 2, por su parte, deteriora su calidad de forma modal al entrar en el rango no lineal, visualizable por la dispersión de los puntos en la Figura 119.

En formas modales más altas, como la número 9, desaparecen de la identificación cuando se entra en no linealidad media ($R=5$). Para no linealidades bajas ($R=2$), esta forma modal ya muestra una mayor dispersión en la determinación de la forma modal al igual como ocurre con la forma modal 2.

El valor del MAC, ploteado bajo cada forma modal mostrada, muestra que existe buen ajuste entre la forma modal identificada y la calculada, con un valor cercano a 1 entre estas, sin embargo, la menor cantidad de sensores hace disminuir la ortogonalidad respecto a otras formas modales.

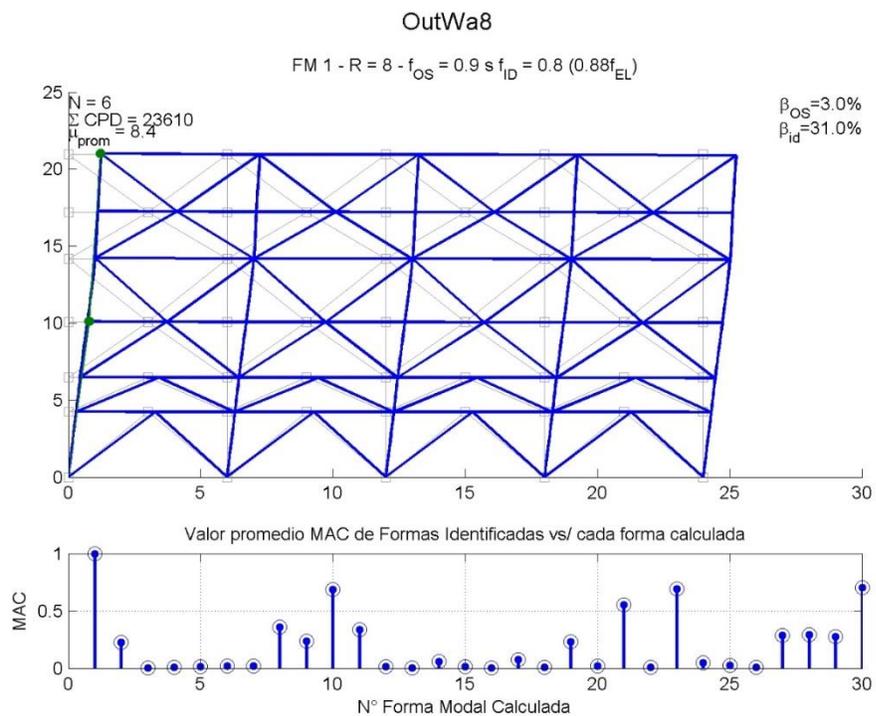


FIGURA 117: FORMA MODAL 1 IDENTIFICADA EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) – INSTRUMENTACIÓN C

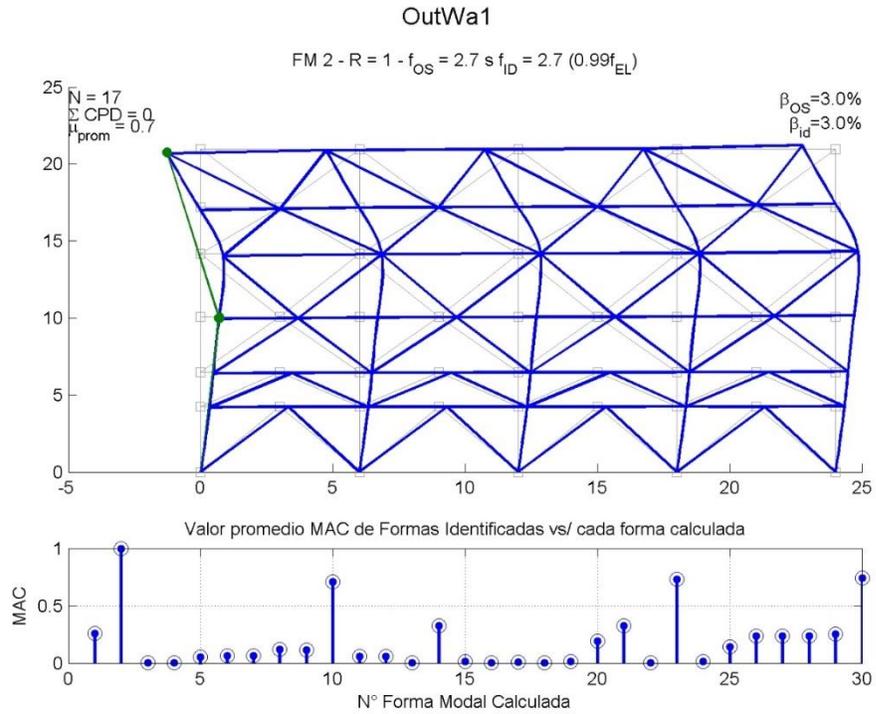


FIGURA 118: FORMA MODAL 2 IDENTIFICADA EN PROCESO SIN NO LINEALIDAD ($R = 1$)– INSTRUMENTACIÓN C

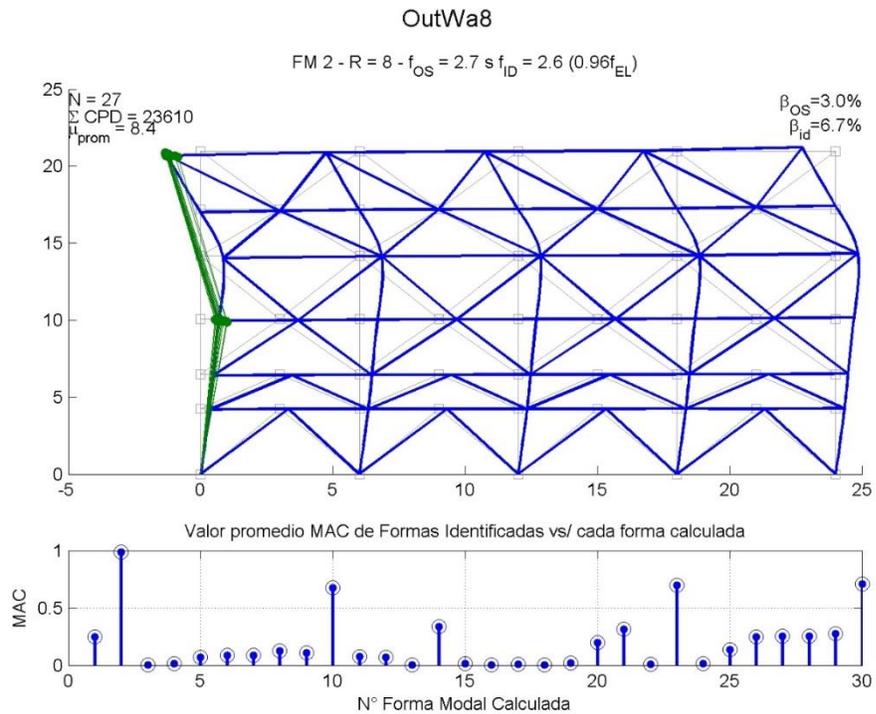


FIGURA 119: FORMA MODAL 2 IDENTIFICADA EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$)– INSTRUMENTACIÓN C

LA

Figura 120 muestra una forma modal alta detectada en el proceso de alta no linealidad. Esta, denota gran dispersión en la determinación de la forma modal, a nivel que no es clara si se trata efectivamente de la forma modal 16. Además, se pierde la ortogonalidad respecto a varias otras formas modales, lo que se refleja en que se obtiene un MAC cercano a 1 respecto a varias formas modales.

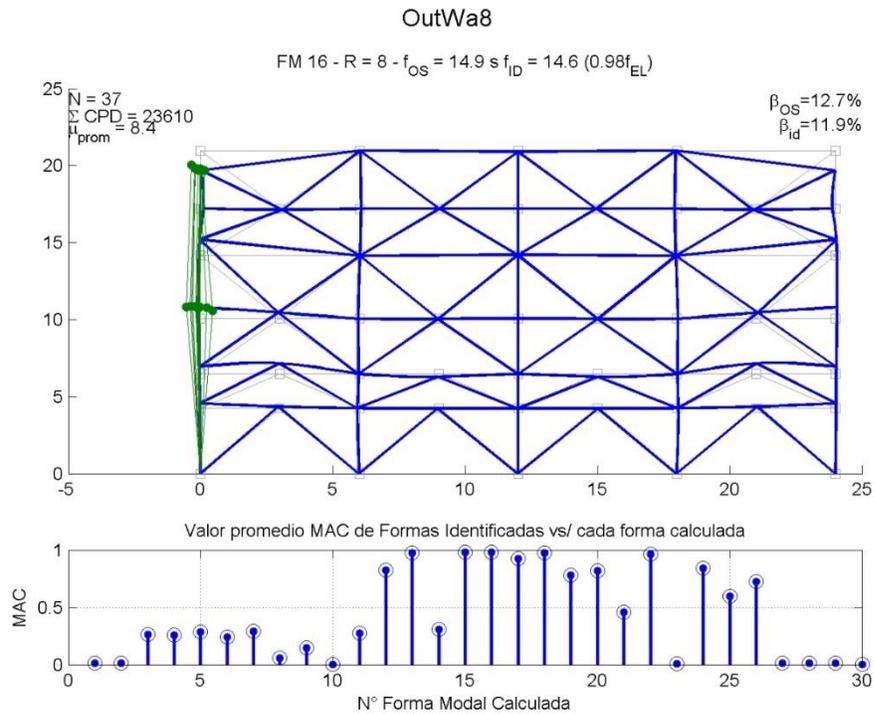


FIGURA 120: FORMA MODAL 16 IDENTIFICADA EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD (R=8) – INSTRUMENTACIÓN C

Se presenta en la Figura 114 la comparación en ortogonalidad entre las formas modales identificadas en cada proceso de esta instrumentación. Para ello, se selecciona el conjunto de vectores que componen la forma modal de un nodo y se promedian, para luego hacer MAC entre ellas, para cada modo. Se incluye también el valor mínimo de la los MAC para cada modo, como una medida de la pérdida de ortogonalidad al incurrir en el rango no lineal. El modo 9 no muestra valores en R = 5 y R = 8 porque no fueron identificadas formas modales.

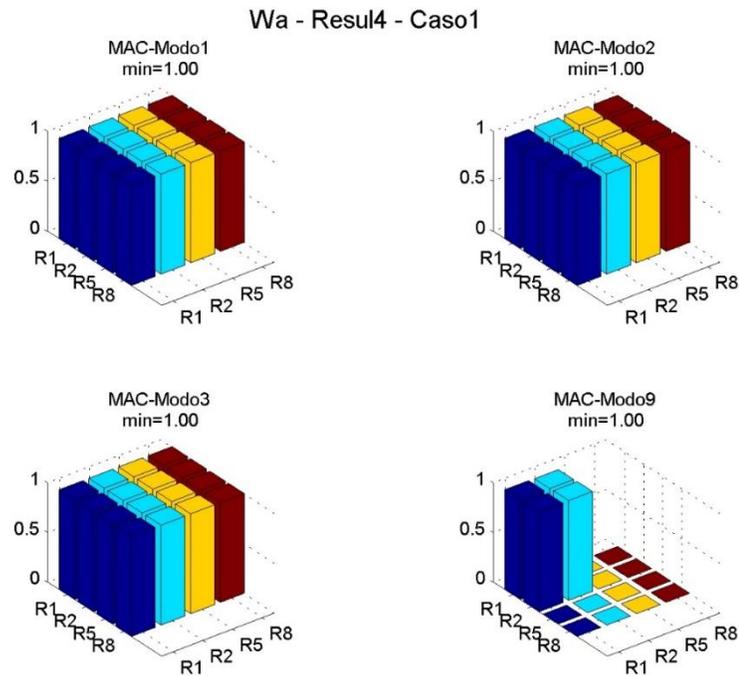


FIGURA 121: MAC ENTRE LA FORMA MODAL PROMEDIO IDENTIFICADA PARA CADA PROCESO DEL CASO 1 – INSTRUMENTACIÓN C.

INSTRUMENTACIÓN D: 2 SENSORES HORIZONTALES.

La instrumentación D consta solamente de dos sensores horizontales. La tendencia observada con las instrumentaciones más completas se mantiene, aunque se pueden identificar menos modos.

La Tabla 53 y la Tabla 54 muestran la frecuencia y amortiguamiento de los modos identificados. La Tabla 55 realiza la comparación de estos valores respecto a los obtenidos con la instrumentación más completa (B). Cabe destacar que en este caso hay varios modos espurios identificados aún después del filtrado, estos no se incluyen en las tablas, y sí se observarán en los Diagramas de Estabilización y Cluster.

Modo:		1	2	3	4	5	6	7	8	9
fid [Hz]	R = 1	0.85	2.73	5.06			6.57			7.48
	R = 2	0.85	2.69				6.43			
	R = 5	0.82	2.68							
	R = 8	0.75	2.68	4.70						
fid/fel	R = 1	0.99	1.00				0.97			0.99
	R = 2	0.99	0.99				0.95			
	R = 5	0.95	0.98							
	R = 8	0.87	0.98							

TABLA 53: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS PARA CASO 1 - INSTRUMENTACIÓN D

Modo:		1	2	3	4	5	6	7	8	9
β id [%]	R = 1	3.48	1.88	1.88			5.98			6.46

	R = 2	5.55	2.31			8.21			
	R = 5	17.48	3.48						
	R = 8	27.82	7.94	15.3					
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.16	0.63			1.00			0.98
	R = 2	1.86	0.77			1.37			
	R = 5	5.85	1.16						
	R = 8	9.31	2.64						

TABLA 54: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS PARA CASO 1 - INSTRUMENTACIÓN D

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fidC/fidB	R = 1	1.00	1.01				0.98			1.00
	R = 2	1.00	1.00							
	R = 5	1.00	1.02							
	R = 8	0.98	1.03							
β_{idC}/β_{idB}	R = 1	1.04	0.65				0.94			0.97
	R = 2	1.29	0.79							
	R = 5	1.10	1.03							
	R = 8	1.81	1.44							

TABLA 55: COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS Y AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS CON 24 SENSORES (INSTRUMENTACIÓN B) Y 2 SENSORES (INSTRUMENTACIÓN D). LOS VALORES CORRESPONDE A LA RAZÓN ENTRE “D” Y “B”.

La dispersión de las formas modales se muestra en la Tabla 48.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
dispFM	R = 1	1.00	1.00	0.99						0.92
	R = 2	1.00	0.99							0.99
	R = 5	0.99	1.00				0.79			0.96
	R = 8	1.00	0.99	0.99						

TABLA 56: DISPERSIÓN DE LA FORMA MODALES IDENTIFICADAS.

El Diagrama de Estabilización y Cluster del proceso lineal y elástico ($R = 1$) se presenta en la Figura 122, el del proceso de alta no linealidad ($R=8$) se presenta en la Figura 123. Los procesos intermedios, $R = 2$ y $R = 5$, siguen la misma tendencia observada en otras instrumentaciones.

En La Figura 122 se observan modos espurios, todos aquellos descartados en las tablas correspondientes. Uno de ellos es el que se ubica cerca de la Frecuencia 5 Hz.

La frecuencia y el amortiguamiento se alejan de los rangos esperados (que deberían estar en torno a la curva de Rayleigh), y la forma modal no es concluyente. Así mismo, el modo de bajo amortiguamiento cercano a los 12 Hz también exhibe el mismo comportamiento. Se incluye el criterio MAC de esta último en la Figura 124, el cual exhibe proporcionalidad respecto a muchas formas modales.

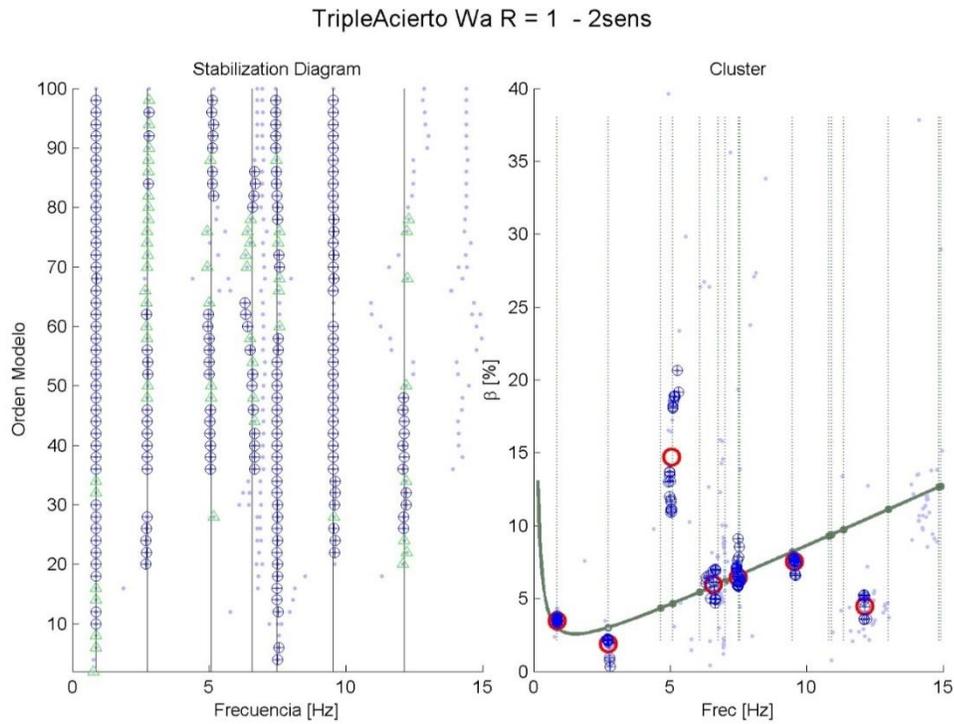


FIGURA 122: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER. PROCESO LINEAL Y ELÁSTICO, INSTRUMENTACIÓN D.

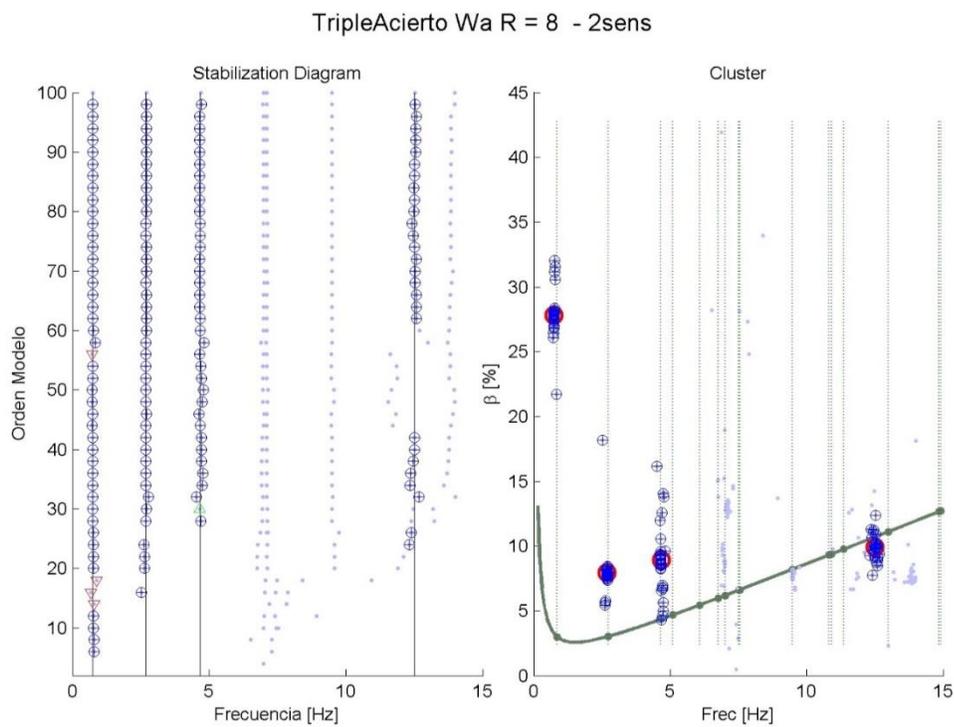


FIGURA 123: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER. PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD, INSTRUMENTACIÓN D.

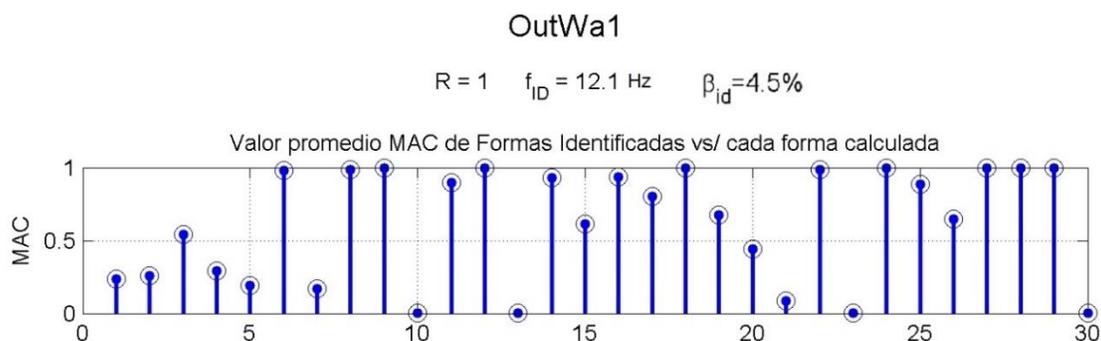


FIGURA 124: MAC DE FORMA MODAL DE MODO ESPÚRIO.

La Figura 125 muestra un ejemplo de forma modal identificada para esta instrumentación (Forma modal 1 R = 5). Se destaca la menor ortogonalidad con el resto de los modos, visualizable en el valor de MAC, respecto a las instrumentaciones con más sensores.

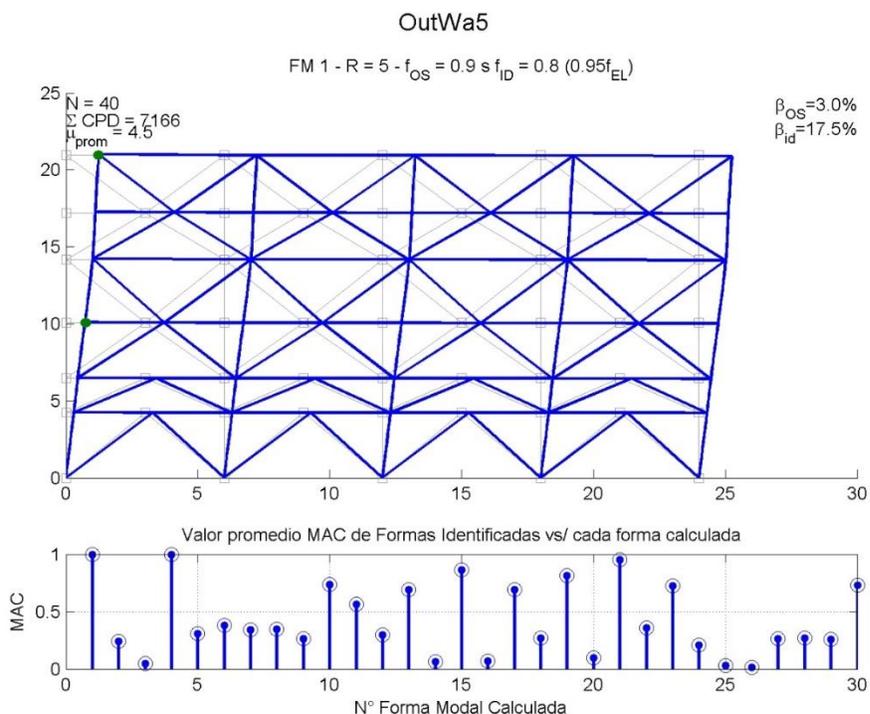


FIGURA 125: FORMA MODAL 1 IDENTIFICADA PARA R = 5 - INSTRUMENTACIÓN D.

Se presenta en la Figura 114 la comparación en ortogonalidad entre las formas modales identificadas en cada proceso de esta instrumentación. Para ello, se selecciona el conjunto de vectores que componen la forma modal de un nodo y se promedian, para luego hacer MAC entre ellas, para cada modo. Se incluye también el valor mínimo de los MAC para cada modo, como una

medida de la pérdida de ortogonalidad al incurrir en el rango no lineal. Los procesos que no identifiquen modos no tienen valores en el gráfico MAC.

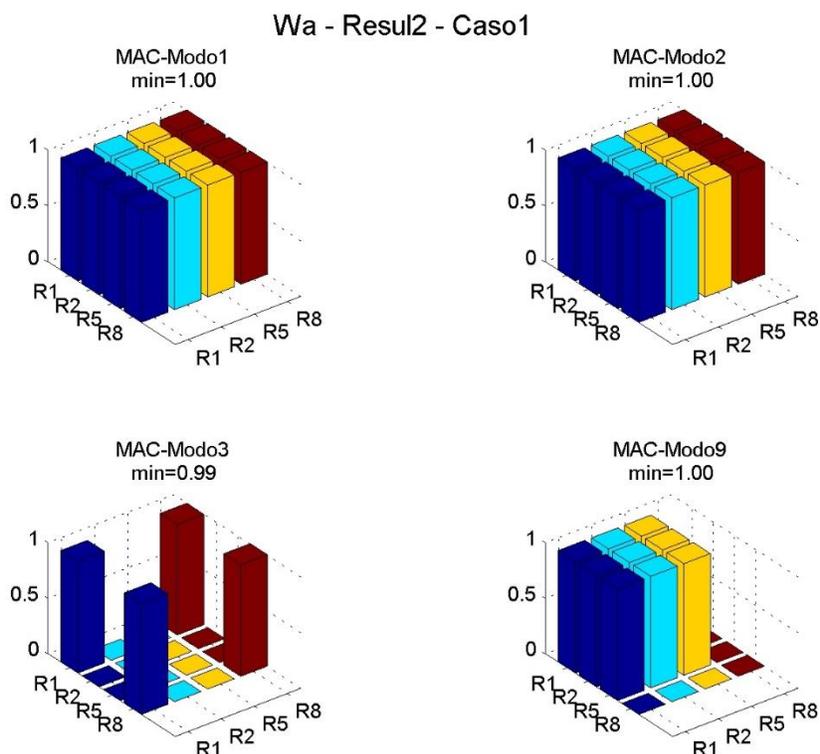


FIGURA 126: MAC ENTRE LA FORMA MODAL PROMEDIO IDENTIFICADA PARA CADA PROCESO DEL CASO 1 – INSTRUMENTACIÓN D.

CASO 2: HISTÉRESIS SUAVIZADA

INSTRUMENTACIÓN B: 24 SENSORES.

Se presenta la Tabla 57 con las frecuencias identificadas. Cada fila contiene los datos de un caso. Cada columna representa a un modo. La ausencia de datos en varias celdas implica que para ese caso, no se identificaron datos asociables a ese modo. La Tabla 58, por su parte muestra los datos asociados a amortiguamiento.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
fid [Hz]	R = 1	0.86	2.71	4.65		6.11	6.70	7.03		7.52		10.84
	R = 2(n)	0.80	2.54	4.62		6.05	6.54			7.32		10.68
	R = 5(n)	0.69		4.62		6.00				7.24		10.65
	R = 8(n)			4.60		5.97						
fid/fel	R = 1	1.00	0.99	1.00		1.00	0.99	1.00		1.00		1.00
	R = 2(n)	0.93	0.93	0.99		0.99	0.97			0.97		0.99
	R = 5(n)	0.81		0.99		0.99				0.96		0.98
	R = 8(n)			0.99		0.98						

TABLA 57: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS PARA CASO 2, CON HISTÉRESIS SUAVIZADA – INSTRUMENTACIÓN B.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
β_{id} [%]	R = 1	3.34	2.90	4.24		5.43	6.37	6.52		6.69		9.42
	R = 2(n)	10.93	6.20	5.43		6.00	7.19			8.78		9.38
	R = 5(n)	15.50		4.73		6.50				11.20		9.34
	R = 8(n)			4.97		7.11						9.68
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.12	0.96	0.97		0.99	1.06	1.05		1.01		1.01
	R = 2(n)	3.65	2.06	1.25		1.10	1.20			1.33		1.01
	R = 5(n)	5.18		1.09		1.19				1.69		1.00
	R = 8(n)			1.14		1.30						1.04

TABLA 58: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS PARA CASO 2, CON HISTÉRESIS SUAVIZADA – INSTRUMENTACIÓN B.

La dispersión de las formas modales se muestra en la Tabla 48.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
dispFM	R = 1	1.00	0.98	0.98		0.18	0.84	0.47		0.98		0.86
	R = 2(n)	1.00	0.85	0.84		0.23	0.82			0.94		0.50
	R = 5(n)	1.00		0.99		0.32	0.84			0.73		
	R = 8(n)			0.98		0.35						0.70

TABLA 59: DISPERSIÓN DE LA FORMA MODALES IDENTIFICADAS.

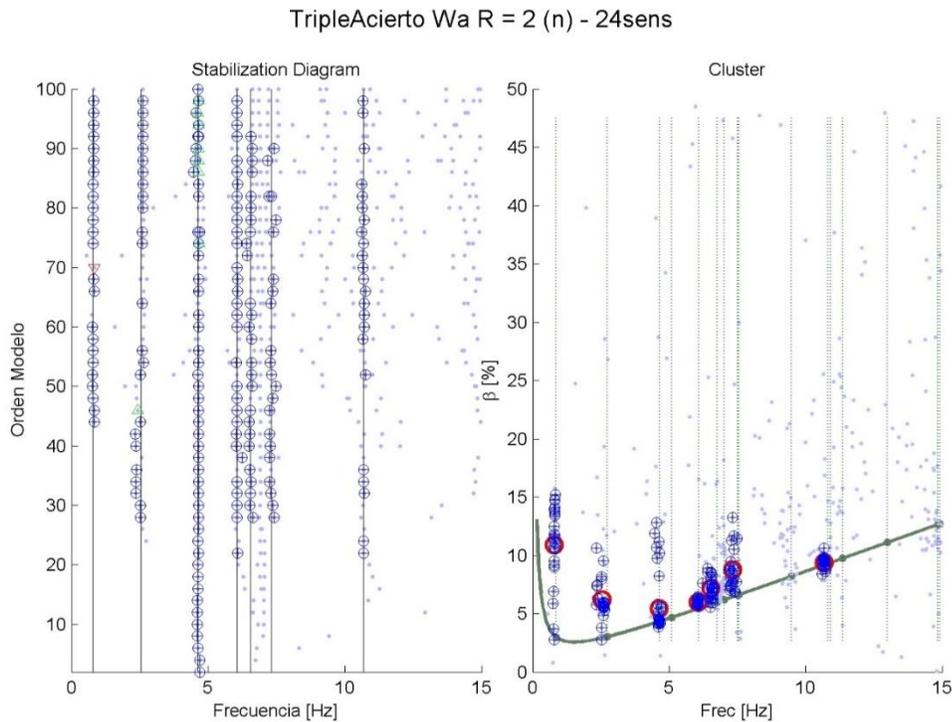


FIGURA 127: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER PARA PROCESO DE BAJA NO LINEALIDAD (R = 2), HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN B

TripleAcierto Wa R = 5 (n) - 24sens

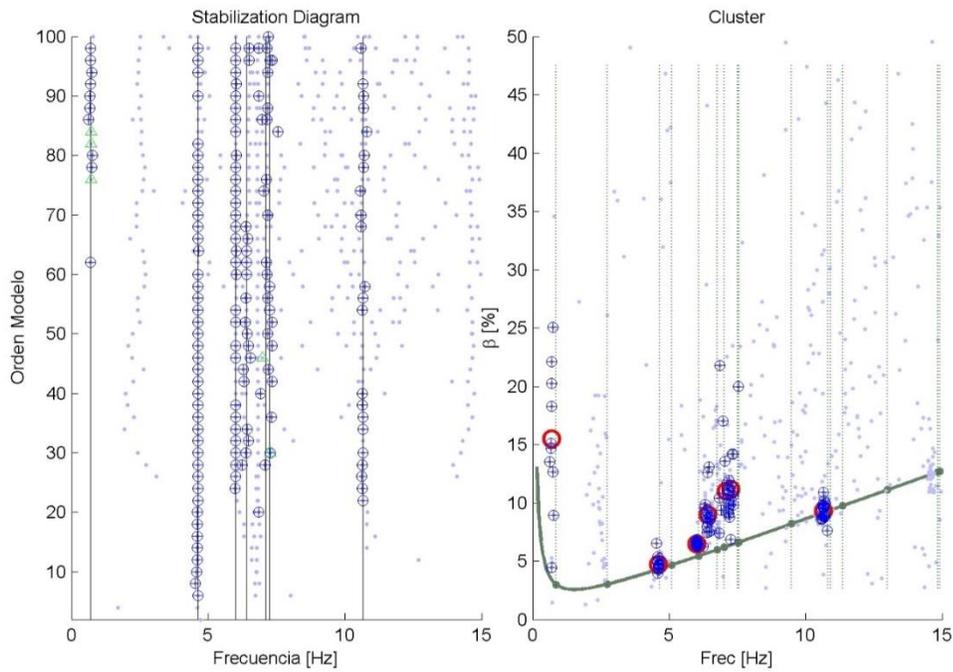


FIGURA 128: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER PARA PROCESO DE NO LINEALIDAD MEDIA ($R = 5$), HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN B

TripleAcierto Wa R = 8 (n) - 24sens

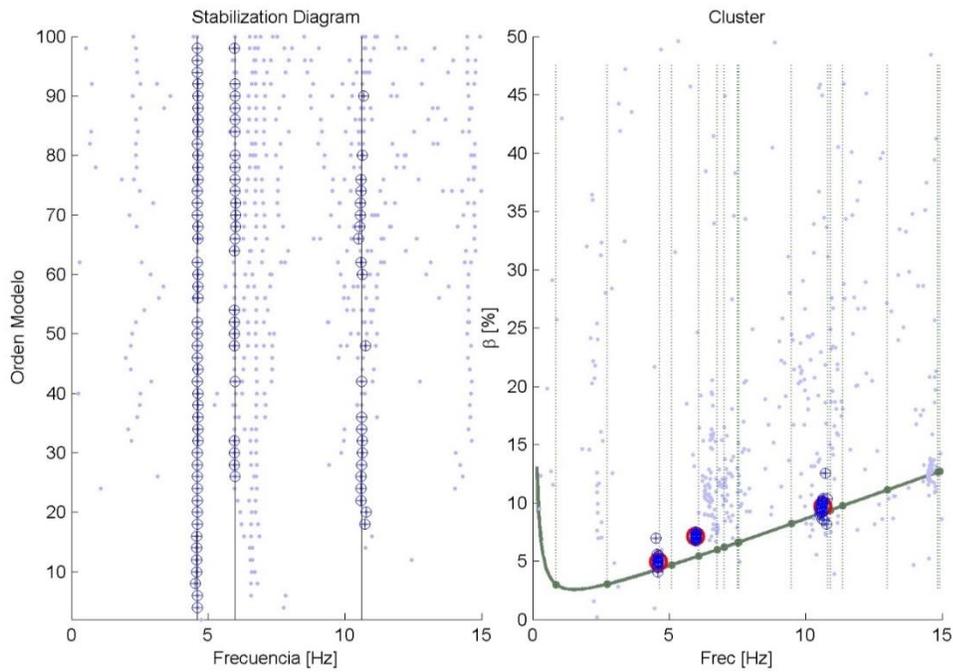


FIGURA 129: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER PARA PROCESO DE NO LINEALIDAD ALTA ($R = 2$), HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN B

La primera forma modal logra ser identificada hasta una incursión media en el rango no lineal ($R = 5$), pero igualmente su forma modal permanece estable y con poca dispersión (Figura 130). En el caso de otras formas modales, como la segunda, desaparecen luego de $R = 2$, pero conservando la forma modal (Figura 131).

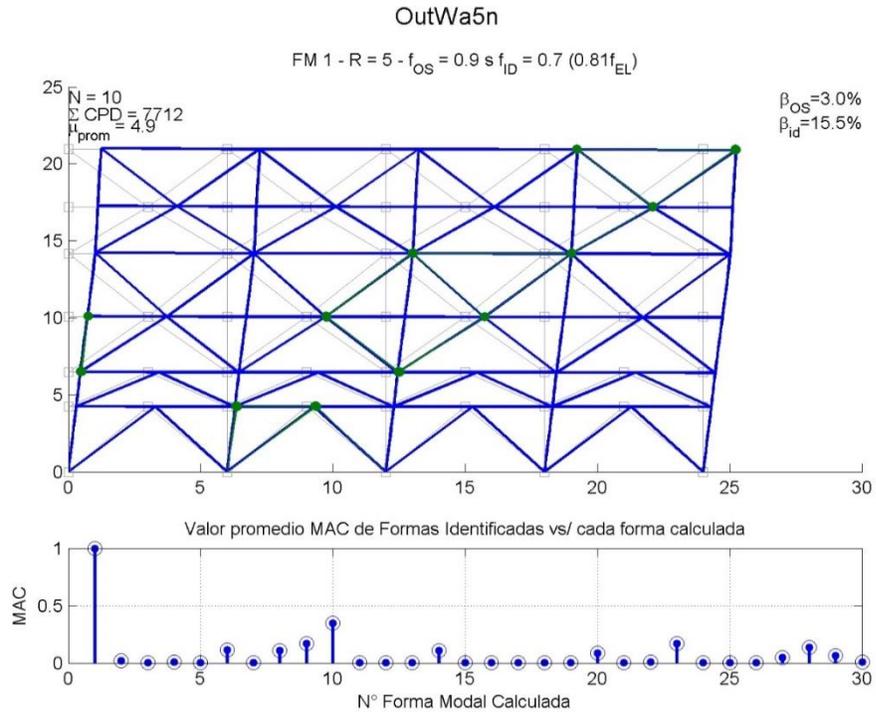


FIGURA 130: PRIMERA FORMA MODAL EN PROCESO DE NO LINEALIDAD MEDIA ($R = 5$), E HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN B.

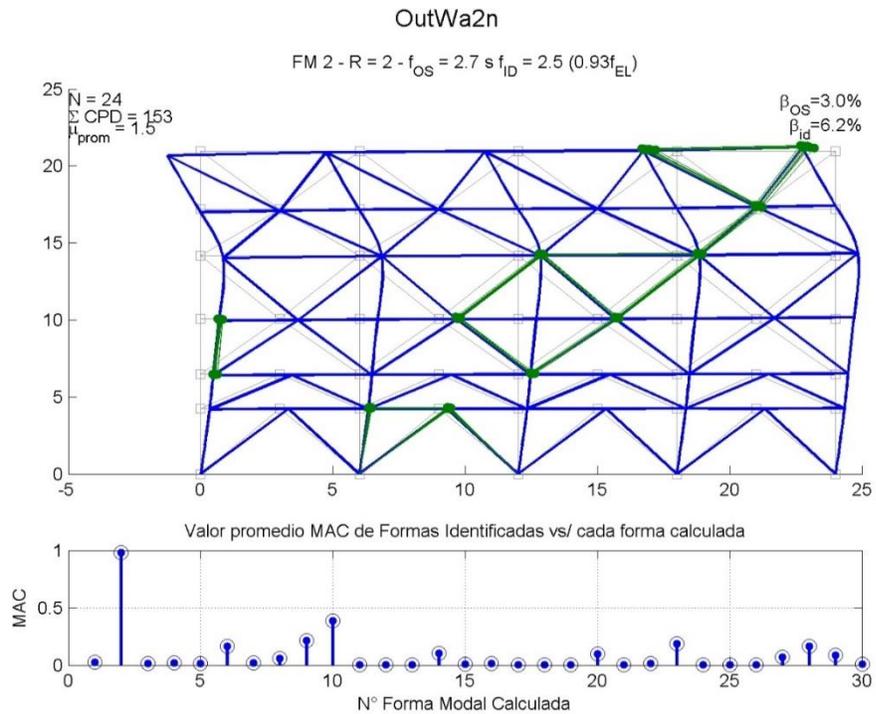


FIGURA 131: SEGUNDA FORMA MODAL EN PROCESO DE BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$), E HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN B.

La forma modal 3, que corresponde a la que moviliza más masa vertical, se conserva hasta los procesos con más alta no linealidad (Figura 133). Lo mismo ocurre con la Forma 11 que se conserva hasta $R = 8$ (Figura 134), pero mostrando mayor dispersión.

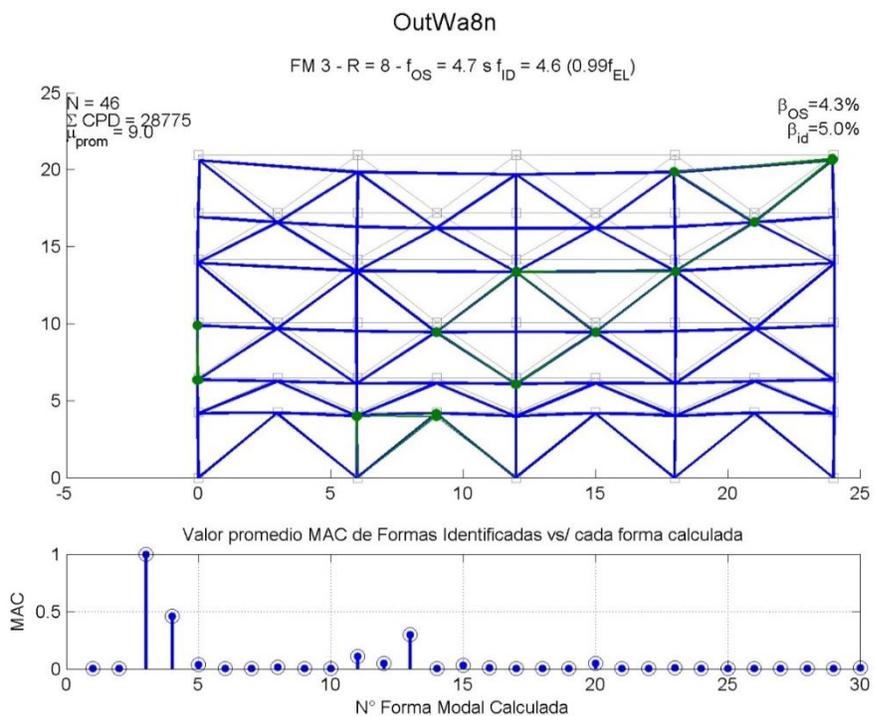


FIGURA 132: FORMA MODAL 3 (LA PRIMERA VERTICAL) EN PROCESO DE NO LINEALIDAD ALTA (R = 8), E HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN B.

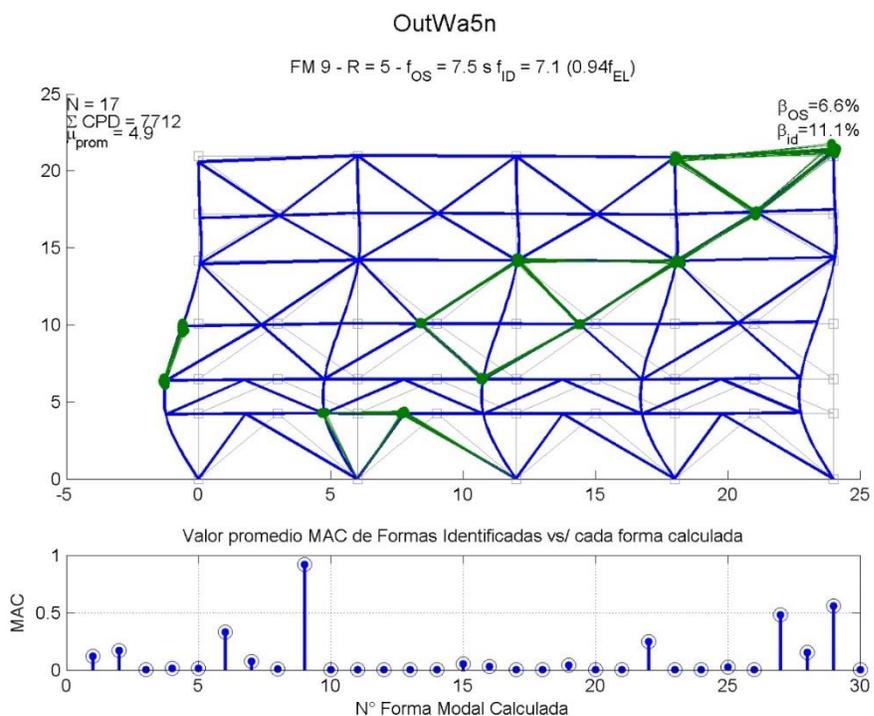


FIGURA 133: FORMA MODAL 9 EN PROCESO DE NO LINEALIDAD MEDIA (R = 5), E HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN B.

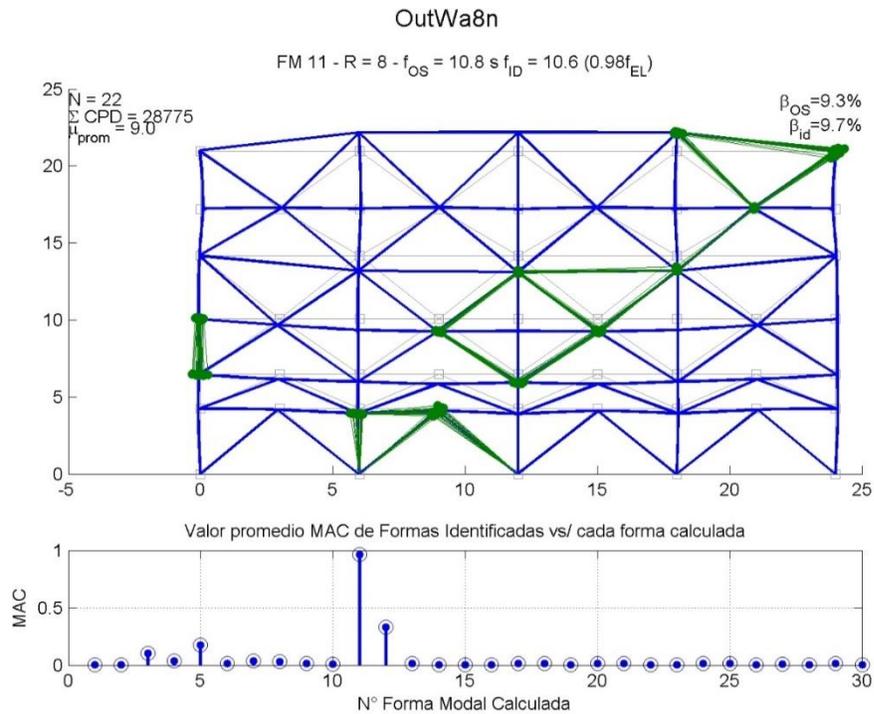


FIGURA 134: FORMA MODAL 11 EN PROCESO DE NO LINEALIDAD ALTA (R = 8), E HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN B.

Se presenta en la Figura 135 Figura 114: MAC entre la forma modal promedio identificada para cada proceso del Figura 114 la comparación en ortogonalidad entre las formas modales identificadas en cada proceso de esta instrumentación. Para ello, se selecciona el conjunto de vectores que componen la forma modal de un nodo y se promedian, para luego hacer MAC entre ellas, para cada modo. Se incluye también el valor mínimo de la los MAC para cada modo, como una medida de la pérdida de ortogonalidad al incurrir en el rango no lineal. Los procesos que no identifiquen modos no tienen valores en el gráfico MAC.

Wa - Resul24 - Caso2

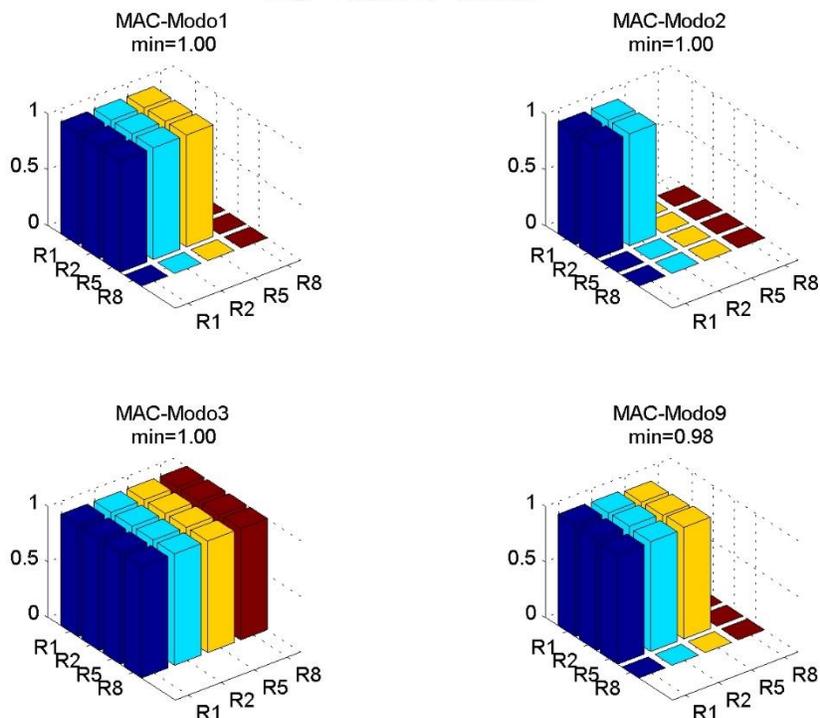


FIGURA 135: MAC ENTRE LA FORMA MODAL PROMEDIO IDENTIFICADA PARA CADA PROCESO DEL CASO 2 – INSTRUMENTACIÓN B.

INSTRUMENTACIÓN C: 4 SENSORES.

Los resultados de la identificación con 4 sensores se presentan en la Tabla 60 y Tabla 61. La Tabla 62 por su parte presenta una comparación respecto a la instrumentación B.

Para este caso con histéresis suave, solo algunos modos son detectados. En general presentan estabilidad en frecuencia, y solo en la forma modal si se trata de un modo bajo (1 o 2).

Modo:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
fid [Hz]	R = 1	0.87	2.71	4.63		6.11	6.85	6.98		7.50	14.78
	R = 2(n)	0.84	2.52	4.59				6.97			14.73
	R = 5(n)			4.54				6.92			14.75
	R = 8(n)			4.54				6.75			14.72
fid/fel	R = 1	1.01	0.99	1.00		1.00	1.01	1.00		0.99	0.99
	R = 2(n)	0.98	0.92	0.99				0.99			0.99
	R = 5(n)			0.98				0.99			0.99
	R = 8(n)			0.97				0.96			0.99

TABLA 60: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS PARA CASO 2 CON HISTÉRESIS SUAVE EN BRB – INSTRUMENTACIÓN C.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
β_{id} [%]	R = 1	4.7	3.02	4.94		5.29	8.51	8.49		6.88	11.42
	R = 2(n)	23.56	7.57	5.57				8.9			11.82
	R = 5(n)			5.87				9.3			11.53
	R = 8(n)			6.04				10.81			12.02
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.57	1	1.14		0.97	1.42	1.37		1.04	0.9
	R = 2(n)	7.88	2.51	1.28				1.44			0.93
	R = 5(n)			1.35				1.5			0.91
	R = 8(n)			1.39				1.75			0.94

TABLA 61: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS PARA CASO 2 CON HISTÉRESIS SUAVE EN BRB – INSTRUMENTACIÓN C.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fidC/fidB	R = 1	1.01	1.00	1.00		1.00	1.02	0.99		1.00
	R = 2(n)	1.06	0.99	0.99						
	R = 5(n)			0.98						
	R = 8(n)			0.99						
β_{idC}/β_{idB}	R = 1	1.41	1.04	1.17		0.98	1.34	1.30		1.03
	R = 2(n)	2.16	1.22	1.03						
	R = 5(n)			1.24						
	R = 8(n)			1.21						

TABLA 62: COMPARACIÓN DE RESULTADOS RESPECTO A INSTRUMENTACIÓN B CON UNA MAYOR CANTIDAD DE SENSORES

La dispersión de las formas modales se muestra en la Tabla 48.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
dispFM	R = 1	1.00	0.99	0.92		1.00	0.57	0.21		0.84	0.98
	R = 2(n)	1.00	0.90	0.68				0.30			0.21
	R = 5(n)			0.76				0.39			0.25
	R = 8(n)			0.94				0.19			0.19

TABLA 63: DISPERSIÓN DE LA FORMA MODALES IDENTIFICADAS.

El resultado de la identificación se puede visualizar en la Figura 136 y Figura 137, en los cuales se presentan los diagramas de Estabilización y cluster de $R = 2$ y $R = 8$. En ellos se ve como desaparecen las primeras formas modales al aumentar la no linealidad a un rango medio ($R = 5$). Antes de esto, ambas formas modales son bien detectadas, de la misma manera que lo hacen cuando hay más sensores (Instrumentación B).

El caso del modo 7, reconocido en las tablas, presenta una forma modal no reconocible (Figura 138), incluso en el proceso lineal. El modo 11 se reconoce incluso ante alta no linealidad (Figura 139).

TripleAcierto Wa R = 2 (n) - 4sens

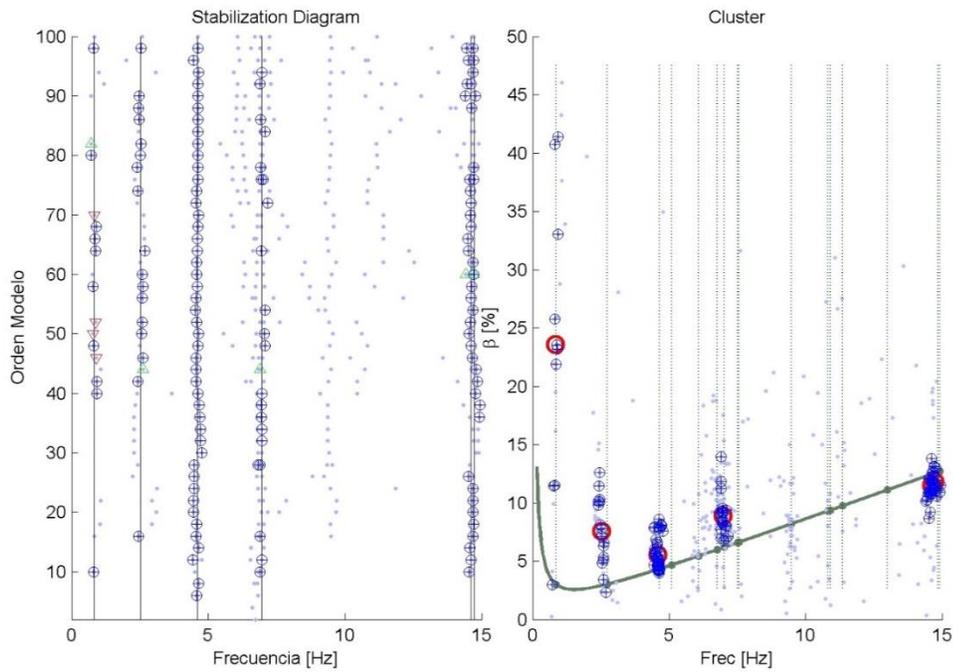


FIGURA 136: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DE PROCESO CON BAJA NO LINEALIDAD ($R = 2$) E HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN C

TripleAcierto Wa R = 8 (n) - 4sens

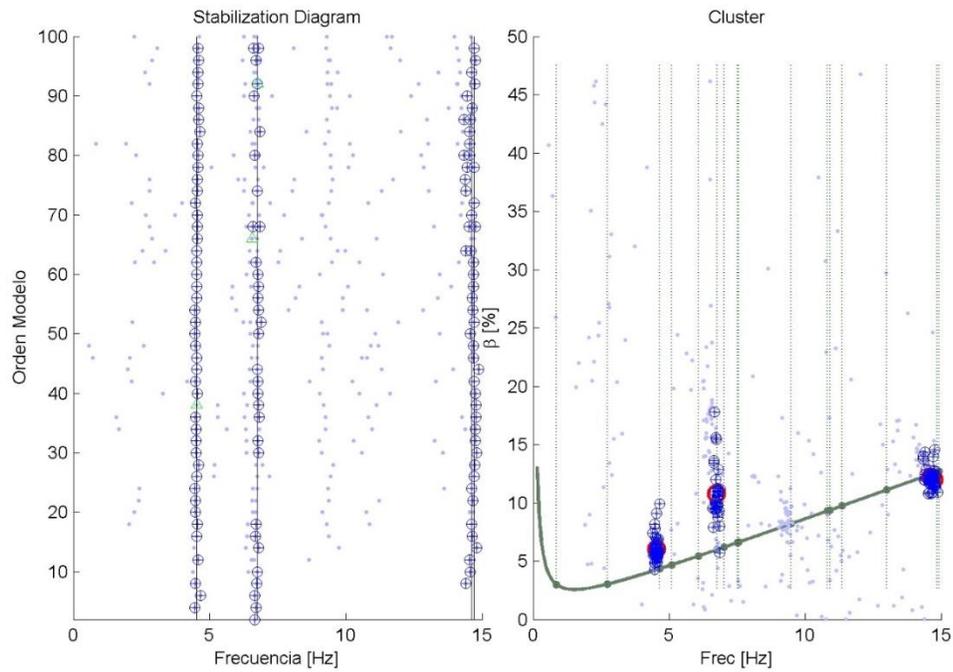


FIGURA 137: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DE PROCESO CON ALTA NO LINEALIDAD ($R = 8$) E HISTÉRESIS SUAVIZADA. INSTRUMENTACIÓN C

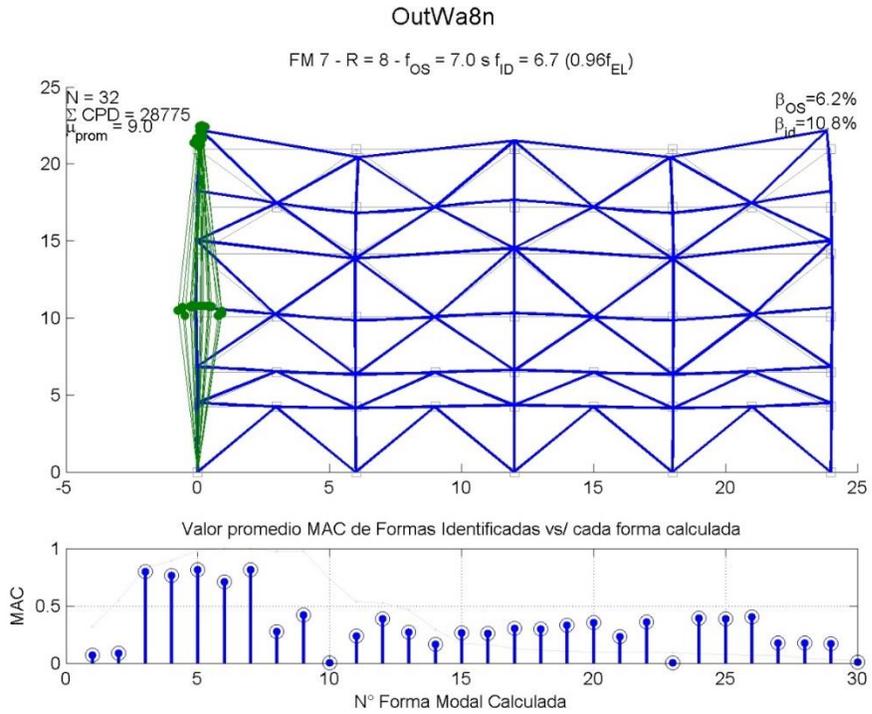


FIGURA 138: FORMA MODAL IDENTIFICADA RELACIONADA AL MODO 7 – INSTRUMENTACIÓN C.

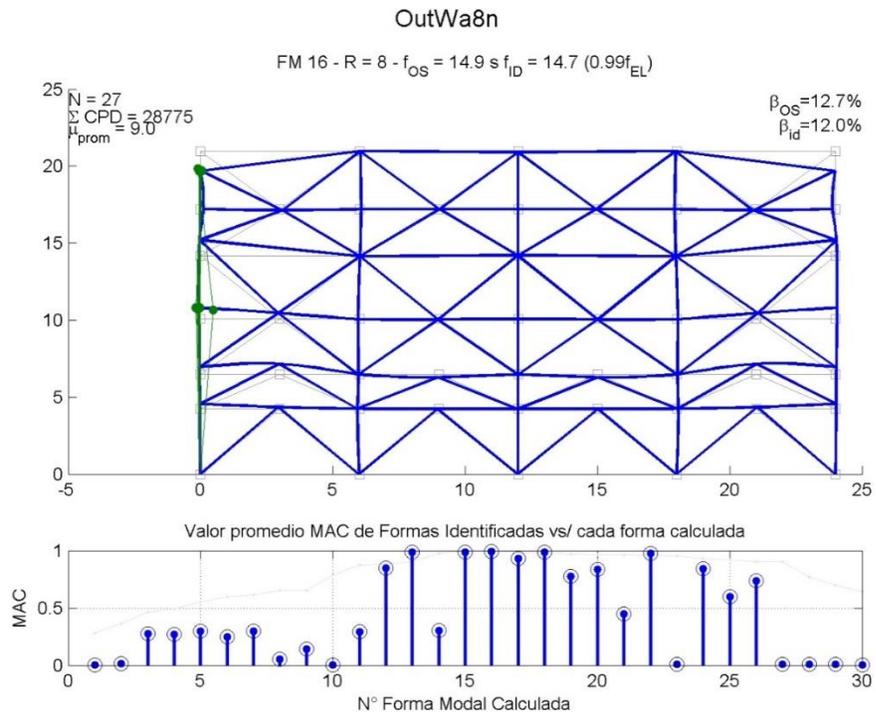


FIGURA 139: FORMA MODAL IDENTIFICADA RELACIONADA AL MODO 11 – INSTRUMENTACIÓN C.

Se presenta en la Figura 114: MAC entre la forma modal promedio identificada para cada proceso de la Figura 114 la comparación en ortogonalidad entre las formas modales identificadas en cada

proceso de esta instrumentación. Para ello, se selecciona el conjunto de vectores que componen la forma modal de un nodo y se promedian, para luego hacer MAC entre ellas, para cada modo. Se incluye también el valor mínimo de los MAC para cada modo, como una medida de la pérdida de ortogonalidad al incurrir en el rango no lineal. Los procesos que no identifiquen modos no tienen valores en el gráfico MAC.

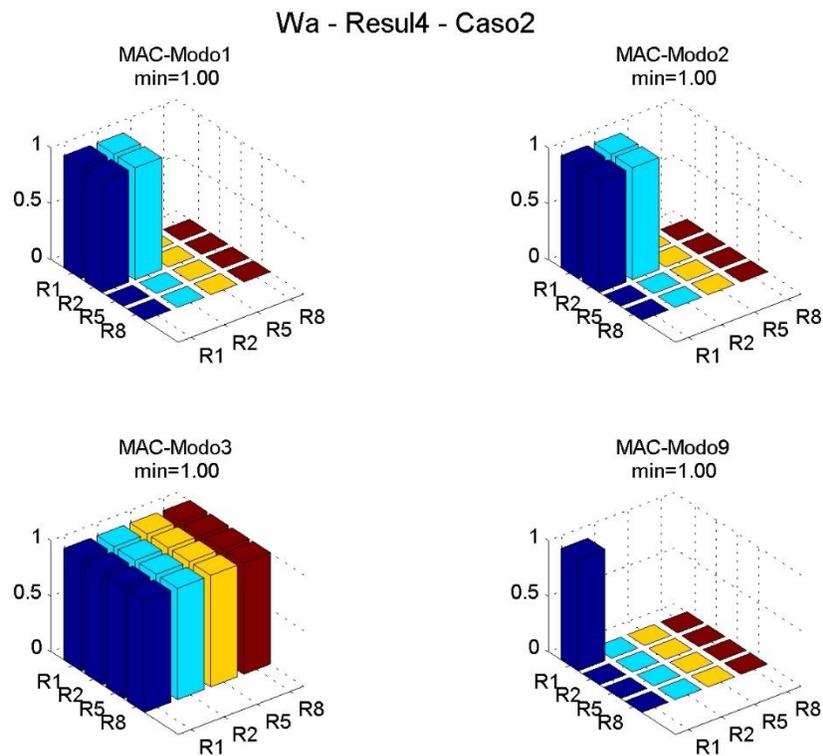


FIGURA 140: MAC ENTRE LA FORMA MODAL PROMEDIO IDENTIFICADA PARA CADA PROCESO DEL CASO 2 – INSTRUMENTACIÓN C.

INSTRUMENTACIÓN D: 2 SENSORES HORIZONTALES

Las Tabla 64 y la Tabla 65 muestran los resultados de la identificación en frecuencia y amortiguamiento, respectivamente. La Tabla 66 compara estas cantidades con las obtenidas en la instrumentación B con más sensores.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fid [Hz]	R = 1	0.85	2.73	5.06						7.22
	R = 2(n)	0.79	2.65	4.72			6.54			7.19
	R = 5(n)	0.73	2.55	4.60			6.54			7.35
	R = 8(n)	0.70	2.55	4.25			6.38			
fid/fel	R = 1	0.99	1.00	1.09						0.96
	R = 2(n)	0.92	0.97	1.01			0.97			0.95
	R = 5(n)	0.85	0.93	0.99			0.97			0.97
	R = 8(n)	0.81	0.93	0.91			0.94			

TABLA 64: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS PARA INSTRUMENTACIÓN D CON DOS SENSORES HORIZONTALES.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\beta_{id} [\%]$	R = 1	3.48	1.88	14.71						6.32
	R = 2(n)	14.78	6.07	12.56			6.83			7.74
	R = 5(n)	28.31	12.81	9.02			13.15			4.31
	R = 8(n)	42.46	22.96	13.30			16.17			
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.16	0.63	3.38						0.95
	R = 2(n)	4.94	2.02	2.89			1.14			1.17
	R = 5(n)	9.47	4.26	2.07			2.19			0.65
	R = 8(n)	14.20	7.63	3.06			2.70			

TABLA 65: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS PARA INSTRUMENTACIÓN D CON DOS SENSORES HORIZONTALES.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fidD/fidB	R = 1	1.00	1.01				0.98			1.00
	R = 2(n)	0.99	1.05				1.00			0.97
	R = 5(n)	1.05								1.02
	R = 8(n)									
β_{idD}/β_{idB}	R = 1	1.04	0.65				0.94			0.97
	R = 2(n)	1.35	0.98				0.95			0.93
	R = 5(n)	1.83								0.38
	R = 8(n)									

TABLA 66: COMPARACIÓN DE FRECUENCIA Y AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO DE INSTRUMENTACIÓN D VS EL DE LA INSTRUMENTACIÓN B.

La dispersión de las formas modales se muestra en la Tabla 48.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
dispFM	R = 1	1.00	1.00	0.99						0.92
	R = 2(n)	1.00	0.99	1.00			0.96			0.97
	R = 5(n)	1.00	0.99	0.97			0.98			0.99
	R = 8(n)	1.00	0.99	0.99			0.98			

TABLA 67: DISPERSIÓN DE LA FORMA MODALES IDENTIFICADAS.

La Figura 141 y Figura 142 muestran los cluster correspondiente a las identificaciones de los procesos baja y alta no linealidad. En ella se aprecian los mismos modos identificados en las tablas recién expuestas, y otros que se decidieron eliminar de estas. Notar que el modo n°3, que es un modo esencialmente vertical, aparece a pesar de que presenta movimientos considerablemente bajos en el eje horizontal. El modo n°10, que se ve en Cluster cercano a la frecuencia de 10 Hz, no presenta una forma consistente, ni siquiera para el rango lineal (Figura 143). El modo que aparece sobre los 10 Hz está fuera de rango y su forma no es concluyente pues presenta nula ortogonalidad frente a varios modos.

TripleAcierto Wa R = 2 (n) - 2sens

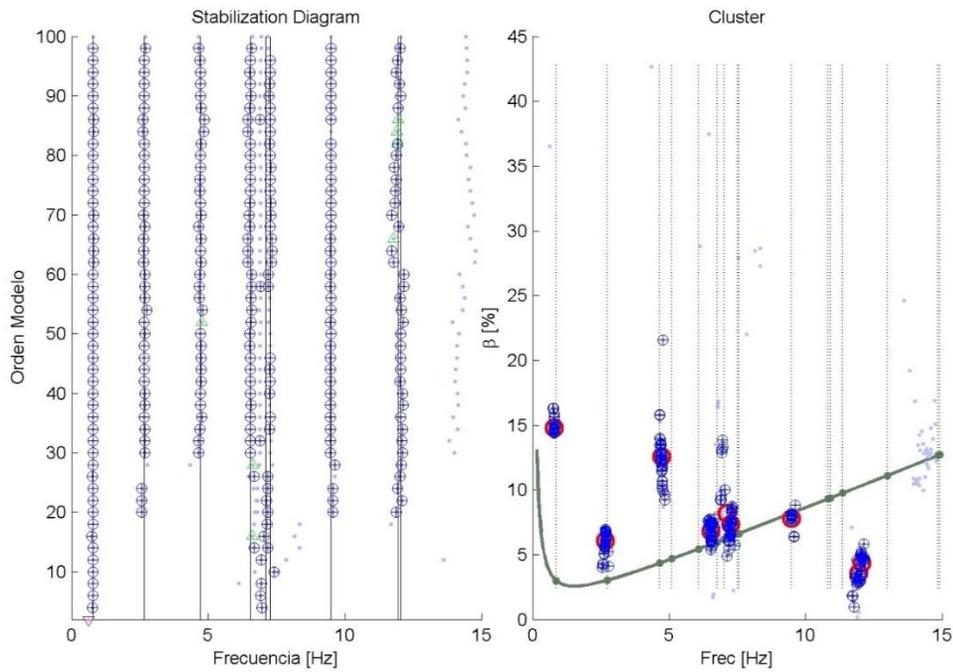


FIGURA 141: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER ASOCIADO AL PROCESO DE BAJA NO LINEALIDAD PARA EL REGISTRO DE RUIDO BLANCO – CASO 2 – INSTRUMENTACIÓN D.

TripleAcierto Wa R = 8 (n) - 2sens

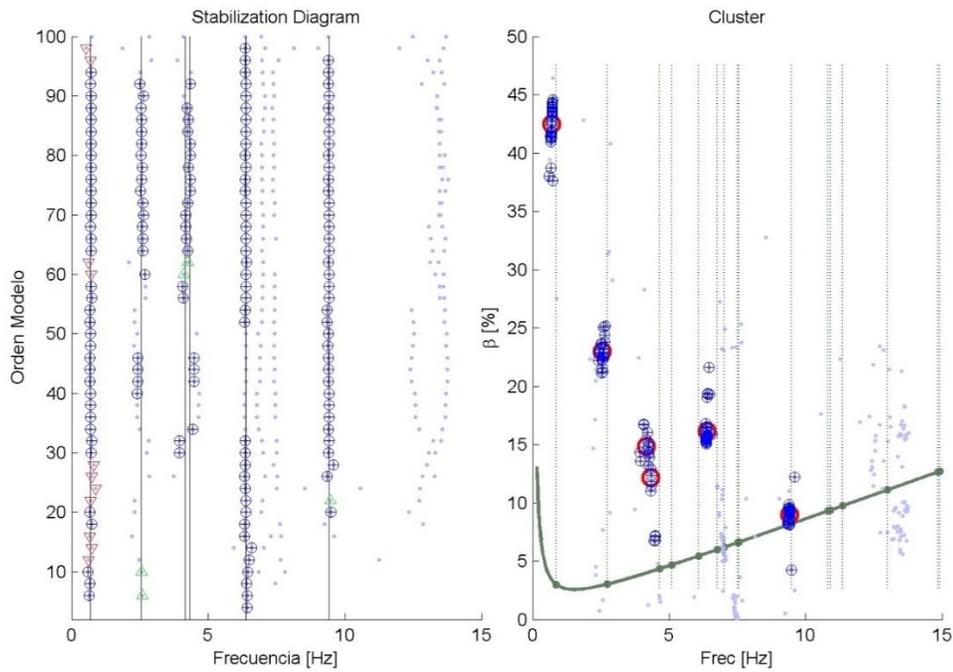


FIGURA 142: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER ASOCIADO AL PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD PARA EL REGISTRO DE RUIDO BLANCO – CASO 2 – INSTRUMENTACIÓN D.

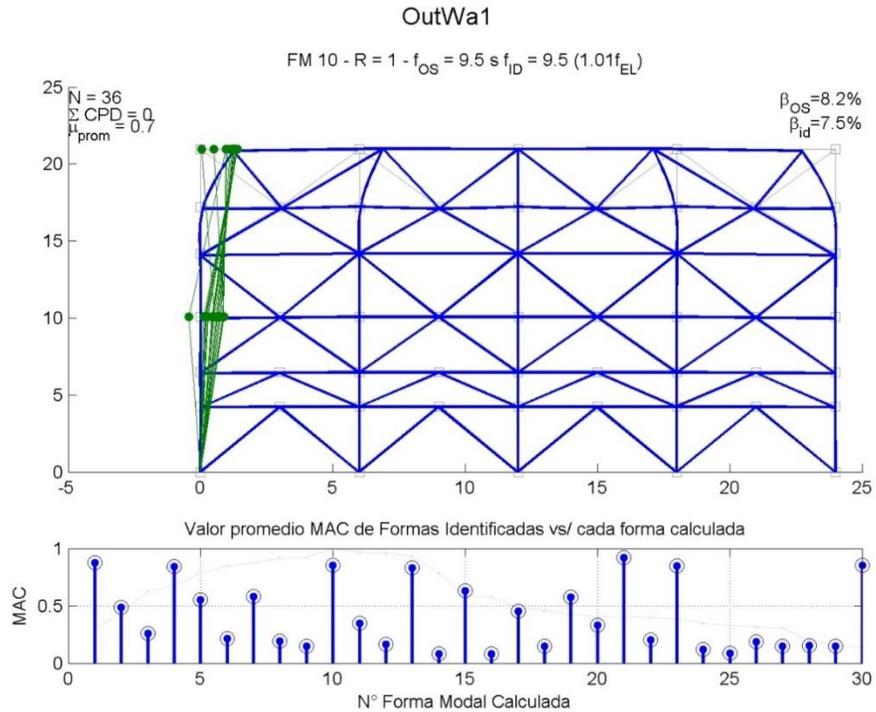


FIGURA 143: FORMA MODAL NO CONCLUYENTE ASOCIADA A LA FRECUENCIA DEL MODO 10 EN PROCESO LINEAL Y ELÁSTICO.

Se presenta en la Figura 144 la comparación en ortogonalidad entre las formas modales identificadas en cada proceso de esta instrumentación. Para ello, se selecciona el conjunto de vectores que componen la forma modal de un nodo y se promedian, para luego hacer MAC entre ellas, para cada modo. Se incluye también el valor mínimo de los MAC para cada modo, como una medida de la pérdida de ortogonalidad al incurrir en el rango no lineal. Los procesos que no identifiquen modos no tienen valores en el gráfico MAC.

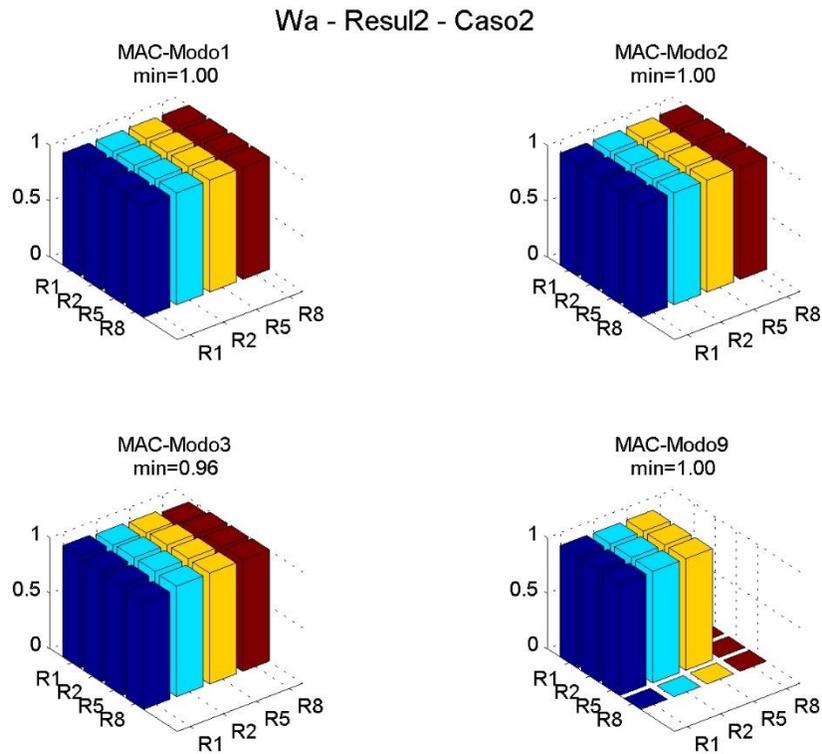


FIGURA 144: MAC ENTRE LA FORMA MODAL PROMEDIO IDENTIFICADA PARA CADA PROCESO DEL CASO 2 – INSTRUMENTACIÓN D.

5.3.3 RESULTADOS MOESP

Los resultados para el análisis de MOESP se presentan en frecuencia, amortiguamiento, y formas modales. Como se realizan varios análisis, cada uno con instrumentaciones en distintos nodos (Tabla 37). Se presentan desde la instrumentación A con sensores en todos los nodos, hasta la instrumentación D, con dos sensores horizontales.

Para la primera instrumentación se presentan las Tablas con la frecuencia absoluta (f_{id}), y normalizada (f_{id}/f_{el}), así como las tablas con el amortiguamiento identificado (β_{id}), y la razón de aumento de amortiguamiento respecto al elástico (β_{id}/β_{el}). Para las instrumentaciones siguientes se presentan directamente las tablas con los valores normalizados, “ f_{id}/f_{el} ” y “ β_{id}/β_{el} ”. Además, se mostrarán tablas con la variación de estos parámetros respecto a la instrumentación A, considerada la más completa.

Si una forma modal tiene asociada más de un *bin*, se presenta en las tablas el promedio de todos los modos incluidos en dichos *bin*. Para simplificar la cantidad de resultados mostrados en las tablas, se muestra el promedio del resultado de los registros identificados para cada proceso e instrumentación. Los resultados desglosados por registro, se encuentran en las Tablas del Anexo 2.

Se presentan también en tablas la dispersión de los vectores que componen la forma modal, o dispersión de la forma modal (dispFM), que se cuantifica mediante el menor MAC obtenido entre los vectores que están asociados a una misma forma, sea en uno o varios *bins*. Este valor se mostrará en tablas para cada caso.

Para todas las identificaciones se podrán ver gráficamente estos resultados en algunos Diagramas de Estabilización y Clusters dispuestos como ejemplo. En estos últimos, se incluye la curva de Rayleigh que define el amortiguamiento inicial y líneas de fondo que representan las frecuencias elásticas del sistema.

Cuando se presentan formas modales de manera gráfica, se plotean el conjunto de vectores de cada *bin* que la componen, sobre la forma modal elástica calculada. También se incluirá el criterio MAC gráficamente: se plotea el valor promedio que alcanza el MAC del vector identificado y cada vector de la forma modal calculada.

La Tabla 68 presenta los parámetros de tolerancia con los que se ajustó la identificación Triple Acierto para cada Caso, y la Tabla 69 presenta el número de Triple Aciertos mínimos a partir de los cuales un *bin* pasa a ser un modo, o parte de este.

	Caso NL	tolf	tolb	tolFM	Δf [Hz]
Caso 1	R = 1	0.002	0.05	0.05	1.50E-04
	R = 2	0.1	0.9	0.1	0.3
	R = 5	0.1	0.9	0.1	0.3
	R = 8	0.1	0.9	0.1	0.3
Caso 2	R = 1	0.002	0.05	0.05	1.50E-04
	R = 2	0.1	0.9	0.1	0.3
	R = 5	0.1	0.9	0.1	0.3
	R = 8	0.1	0.9	0.1	0.3

TABLA 68: PARÁMETROS PARA FILTRADO TRIPLE ACIERTO SEGUN CASO DE IDENTIFICACIÓN Y NIVEL DE NO LINEALIDAD

	Instr.	minTA
Caso 1	A	10
	B	10
	C	20
	D	25
Caso 2	A	10
	B	10
	C	10
	D	25

TABLA 69: PARÁMETRO DE IDENTIFICACIÓN SEGÚN INSTRUMENTACIÓN: CANTIDAD MÍNIMA DE TRIPLE ACIERTOS PARA CONSTITUIR UN BIN

Finalmente, se comparan las formas modales identificadas a medida que se aumenta la incursión en el rango no lineal, es decir, el criterio MAC entre el vector forma modal promedio resultante de cada proceso, dentro de una misma instrumentación. Se presenta un cuadro de comparación MAC para cada modo, y se destaca su mínimo valor

Para todas las Tablas, se usa el código de dos letras presentado en la Tabla 36 para señalar cada registro.

CASO 1: SIMIL BILINEAL

INSTRUMENTACIÓN A: SENSORES EN TODOS LOS GRADOS DE LIBERTAD.
SE PRESENTAN EN LA

fid [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	0.86	2.73	4.65	5.08	6.07	6.73	6.98		7.51
R = 2	0.85	2.71	4.65		6.05	6.58			7.75
R = 5	0.86	2.70	4.63						7.77
R = 8	0.85	2.68	4.62			6.43			7.77

TABLA 70
LAS FRECUENCIAS IDENTIFICADAS, ASOCIADAS A CADA MODO, Y A CADA NIVEL DE NO LINEALIDAD. LA

fid/fel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.99	0.99	1.00		0.99	0.97			1.03
R = 5	1.00	0.99	1.00						1.03
R = 8	0.99	0.98	0.99			0.95			1.03

TABLA 71
POR SU PARTE PRESENTA LOS MISMOS RESULTADOS PER NORMALIZADOS POR LA FRECUENCIA ELÁSTICA DE CADA MODO, CALCULADA. LA

β_{id} [%]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	3.00	3.01	4.33	4.66	5.42	5.94	6.14		6.56
R = 2	6.51	2.98	4.38		5.65	6.66			6.78
R = 5	13.60	3.24	4.55						5.35
R = 8	19.92	3.71	4.69			5.97			5.29

TABLA 72
PRESENTA LOS AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS, Y LA

β_{id}/β_{el}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2	2.18	0.99	1.01		1.04	1.11			1.02
R = 5	4.55	1.08	1.05						0.81
R = 8	6.66	1.23	1.08			1.00			0.80

Tabla 73

normalizados respecto a los elásticos definidos por Rayleigh.

En todas las tablas descritas, se marcan en letra cursiva los modos de los procesos cuya identificación fue exitosa en uno o dos registros. En particular, en esta instrumentación, el modo 5

y 6 tuvieron una identificación en uno o dos registros para los procesos no lineales. Los modos n°1, n°2, n°3 y n°9 fueron identificados en todos los registros para todos los procesos.

fid [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	0.86	2.73	4.65	5.08	6.07	6.73	6.98		7.51
R = 2	0.85	2.71	4.65		6.05	6.58			7.75
R = 5	0.86	2.70	4.63						7.77
R = 8	0.85	2.68	4.62			6.43			7.77

TABLA 70: FRECUENCIA IDENTIFICADA PARA CADA NIVEL DE NO LINEALIDAD – INSTRUMENTACIÓN A. UNIDADES EN HZ

fid/fel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.99	0.99	1.00		0.99	0.97			1.03
R = 5	1.00	0.99	1.00						1.03
R = 8	0.99	0.98	0.99			0.95			1.03

TABLA 71: FRECUENCIA IDENTIFICADA PARA CADA NIVEL DE NO LINEALIDAD, NORMALIZADAS POR LA FRECUENCIA ELÁSTICA DE CADA MODO – INSTRUMENTACIÓN A

β_{id} [%]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	3.00	3.01	4.33	4.66	5.42	5.94	6.14		6.56
R = 2	6.51	2.98	4.38		5.65	6.66			6.78
R = 5	13.60	3.24	4.55						5.35
R = 8	19.92	3.71	4.69			5.97			5.29

TABLA 72: AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO PARA CADA NIVEL DE NO LINEALIDAD – INSTRUMENTACIÓN A.

β_{id}/β_{el}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2	2.18	0.99	1.01		1.04	1.11			1.02
R = 5	4.55	1.08	1.05						0.81
R = 8	6.66	1.23	1.08			1.00			0.80

TABLA 73: AUMENTO DE AMORTIGUAMIENTO RESPECTO AL ELÁSTICO, PARA CADA NIVEL DE NO LINEALIDAD – INSTRUMENTACIÓN A.

La Tabla 74 muestra la dispersión de las formas modales.

dispFM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.99	0.97	0.79		0.21	0.89			0.81
R = 5	0.98	0.96	0.66						0.89
R = 8	0.98	0.91	0.69			0.93			0.91

TABLA 74: DISPERSIÓN DE FORMA MODAL IDENTIFICAD PARA INSTRUMENTACIÓN A.

Se elegirá el registro del terremoto de Talca para mostrar los resultados gráficos de los datos expuestos recientemente. La Figura 145 muestra la identificación lineal. En ella se aprecia una buena identificación de prácticamente todos los modos, y con el amortiguamiento lineal en la curva de Rayleigh.

TripleAcierto Ta R = 1 - Tsens

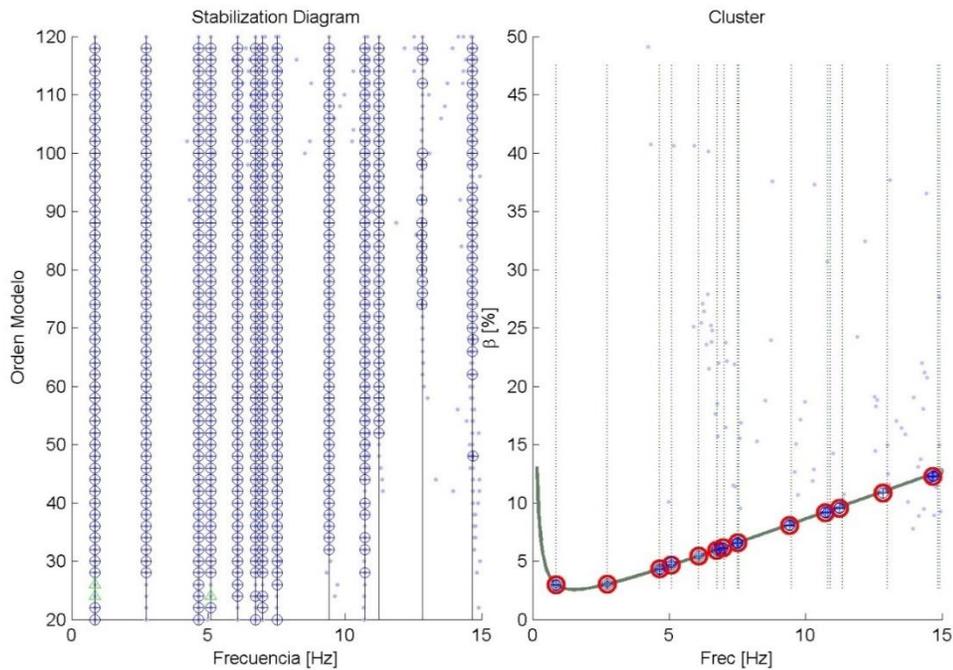


FIGURA 145: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER CORRESPONDIENTE AL PROCESO LINEAL ($R = 1$). INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE TALCA.

La Figura 146 muestra la identificación con baja no linealidad, $R = 2$. En ella se ve la desaparición de la mayoría de formas modales, conservándose las tres primeras horizontales ($n^{\circ}1$, $n^{\circ}2$ y $n^{\circ}9$), y la principal vertical ($n^{\circ}3$). La primera exhibe un aumento de amortiguamiento leve. La $n^{\circ}9$, por su parte, exhibe una gran dispersión en frecuencia y amortiguamiento, lo cual se aprecia en la variedad de *bins* en la cual fue identificada la forma (todos aquellos por sobre los 5 Hz).

La Figura 147 y Figura 148, muestra el Cluster y Diagrama de Estabilización para los procesos de media y alta no linealidad, respectivamente. Ellos presentan el mismo comportamiento que el proceso de baja no linealidad, solo que aumenta significativamente el amortiguamiento identificado así como su dispersión en el primer modo, y en menor medida en el segundo. El tercero permanece con un amortiguamiento cercano al inicial. El modo $n^{\circ}9$, se presenta en varios Clusters, a veces confundido con el modo $n^{\circ}6$, entre los 5 Hz y 10 Hz.

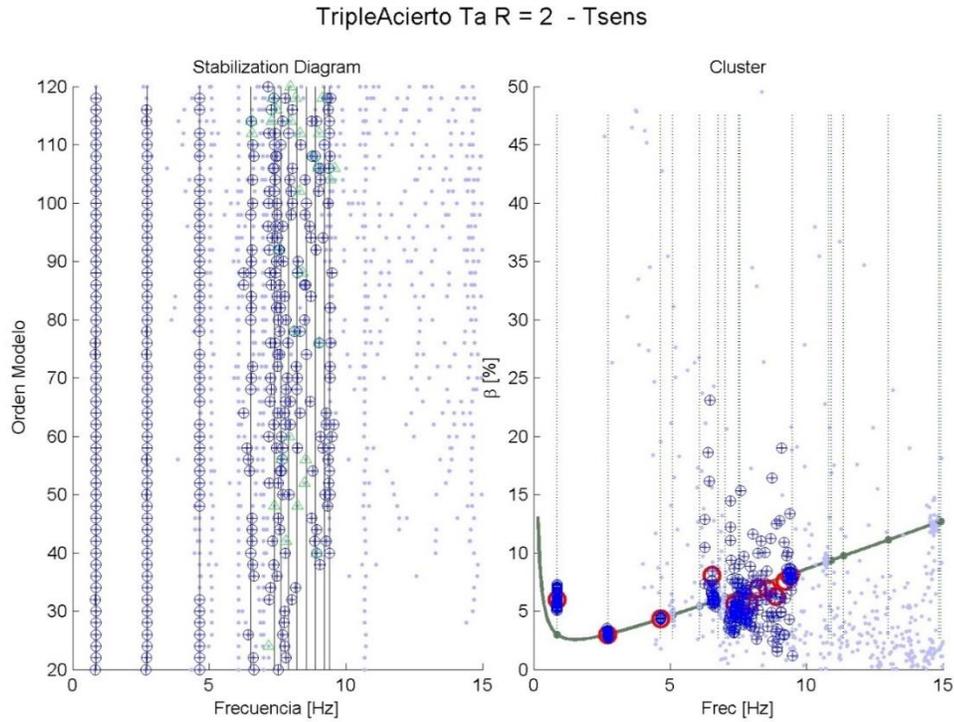


FIGURA 146: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER CORRESPONDIENTE AL PROCESO DE BAJA NO LINEALIDAD(R = 2). INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE TALCA.

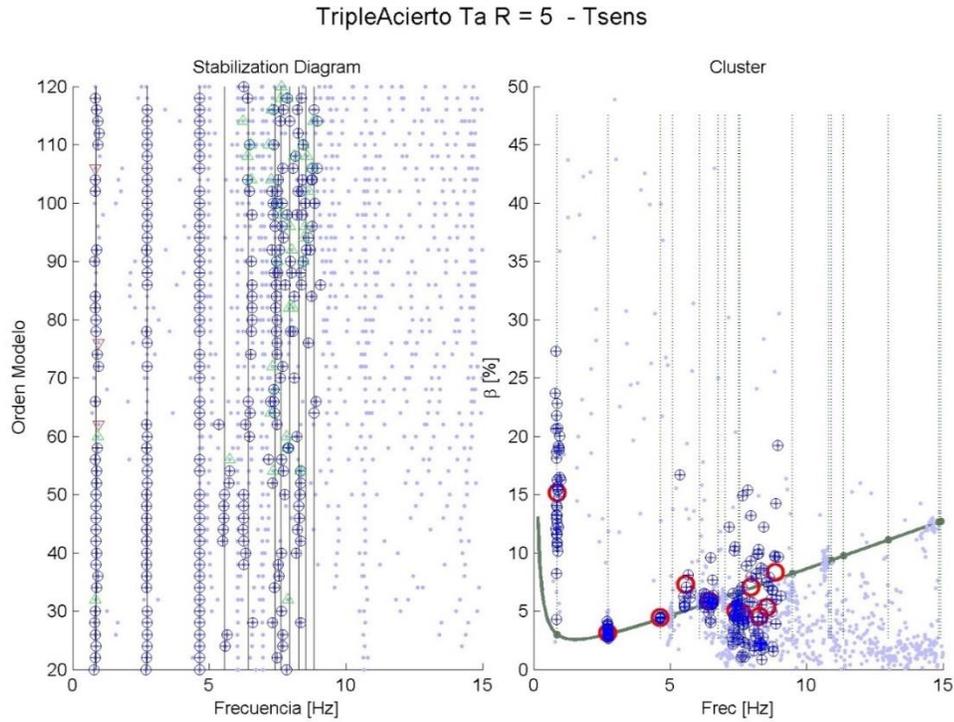


FIGURA 147: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER CORRESPONDIENTE AL PROCESO DE NO LINEALIDAD MEDIA (R = 5). INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE TALCA.

TripleAcierto Ta R = 8 - Tsens

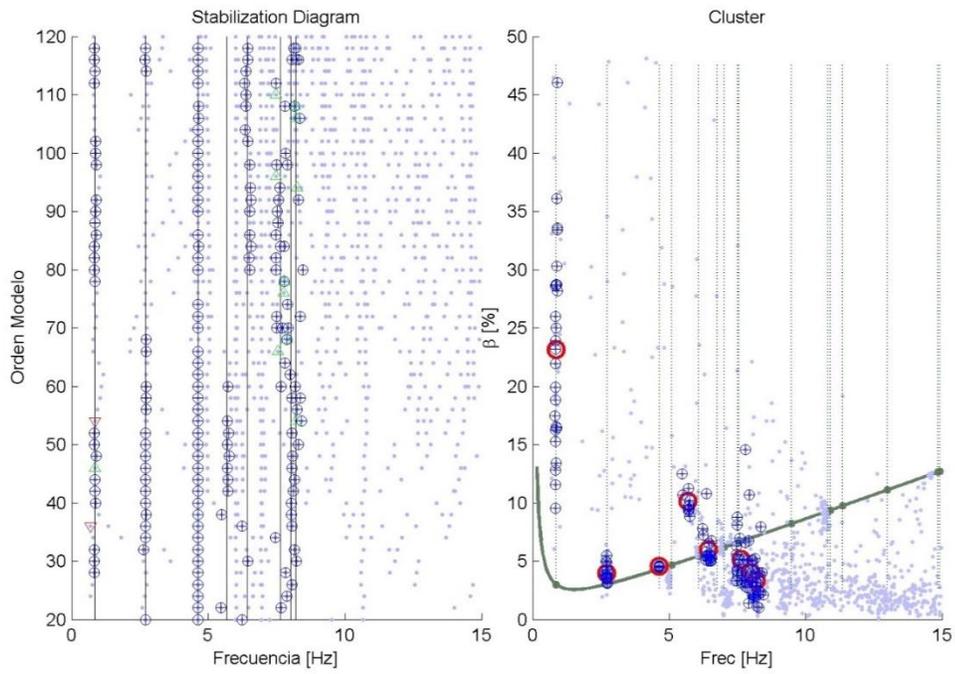


FIGURA 148: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER CORRESPONDIENTE AL PROCESO DE NO LINEALIDAD ALTA (R = 8). INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE TALCA.

En la Figura 149 se presenta la primera forma modal capturada en el proceso de alta no linealidad ($R=8$). Si bien aumenta su dispersión respecto a la identificada en el proceso lineal y elástico, se mantiene prácticamente la misma forma modal.

Cuando se analiza la segunda forma modal, se aprecia el mismo fenómeno, pero con más dispersión a medida que aumenta la no linealidad. La Figura 150 muestra la forma modal detectada para el registro de Mirador (Mi).

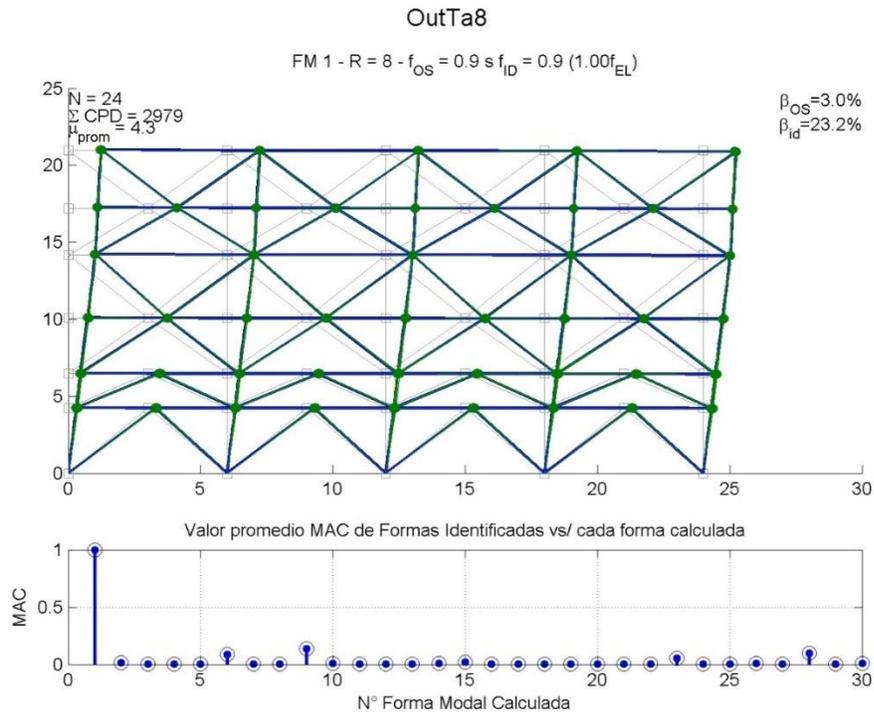


FIGURA 149: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 1 PARA IDENTIFICACIÓN EN ALTA NO LINEALIDAD . INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE TALCA.

La tercera forma modal en algunos casos exhibe mayores grados de dispersión en la determinación de su forma , si bien tanto en frecuencia como en amortiguamiento se mantiene muy cerca de los valores lineales y elásticos (Figura 151); en otros, el modo identificado resultante exhibe evidente distorsión, resultado la forma modal promedio con influencia de otro modo (Figura 152).

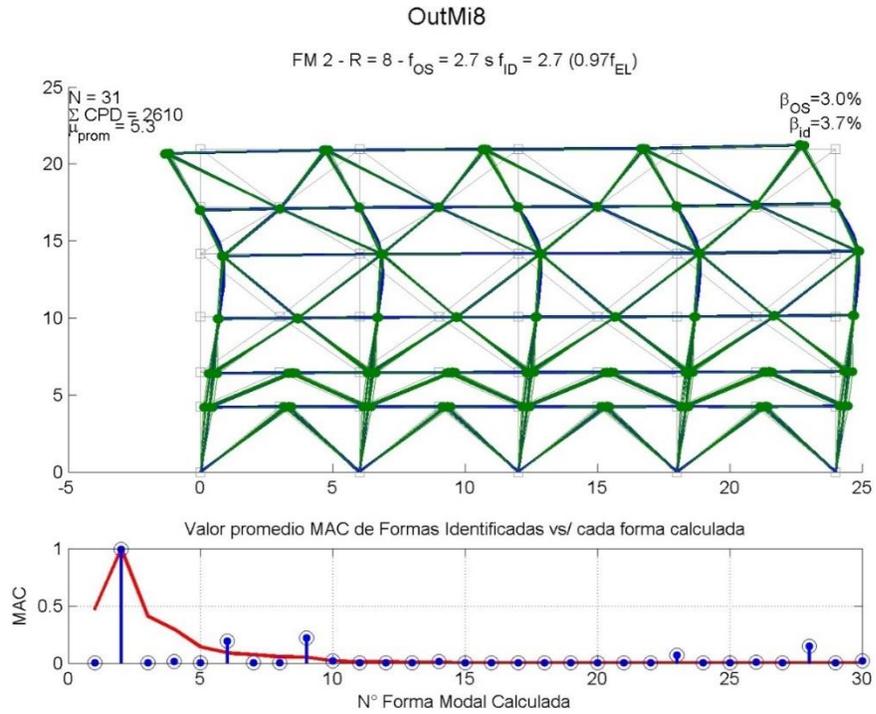


FIGURA 150: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 2 PARA IDENTIFICACIÓN EN ALTA NO LINEALIDAD . INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE MIRADOR.

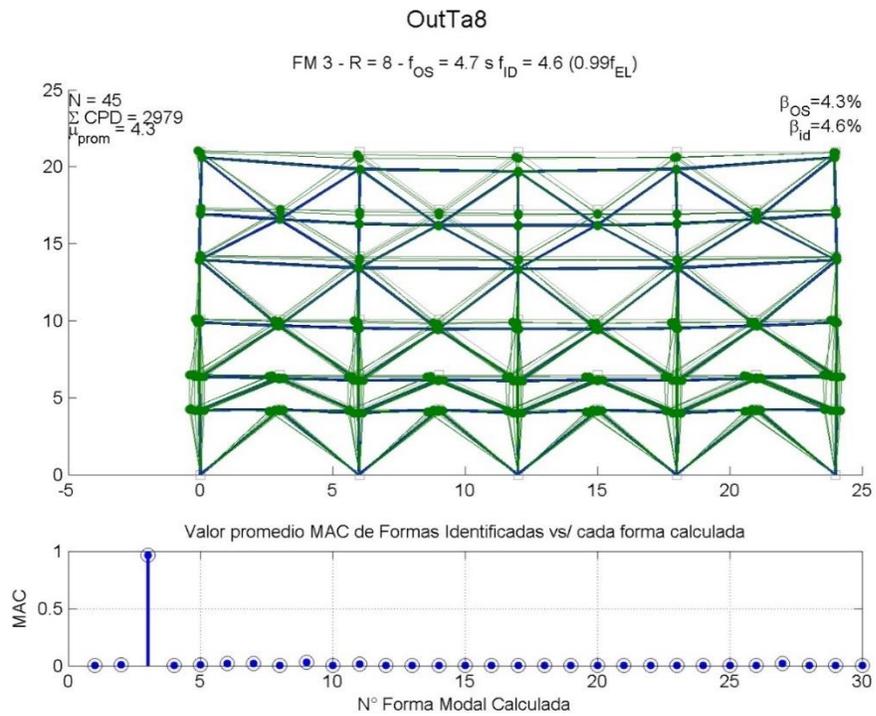


FIGURA 151: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 3 PARA IDENTIFICACIÓN EN ALTA NO LINEALIDAD. INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE TALCA.

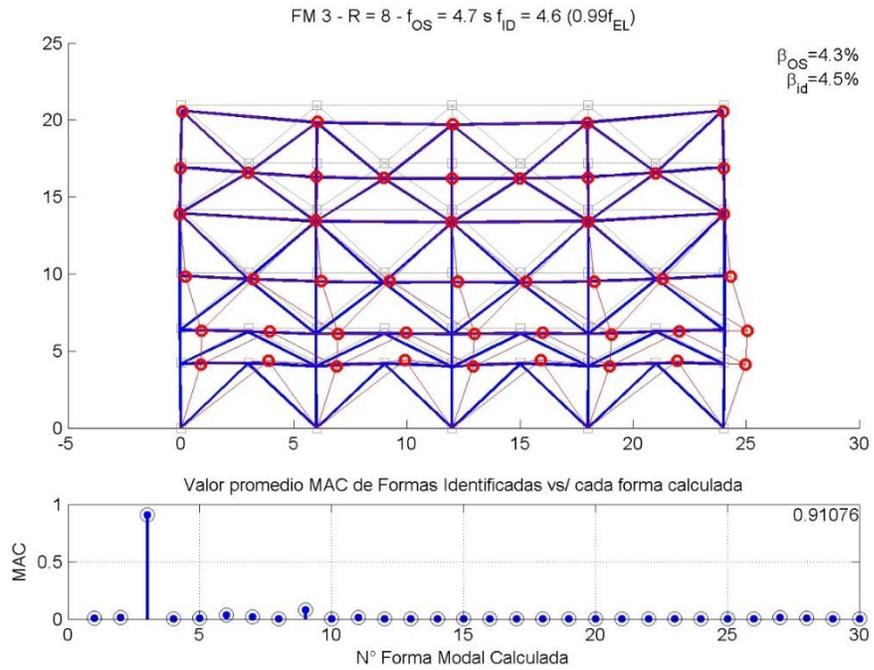


FIGURA 152: FORMA MODAL PROMEDIO DEL PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD, ASOCIADO AL REGISTRO DE CURICÓ – CASO 1.

La forma modal 9 exhibe un comportamiento más complejo en su no linealidad. Una característica presente en todas las identificaciones es que si existe un grado de no-linealidad, el modo no aparece puro, sino combinado con el modo n°6, bastante parecidos en cuanto a desplazamientos horizontales. (Figura 82 y Figura 83). La Figura 153 muestra la identificación de uno de los *bin* identificados como modo 6, que tiene un componente fuerte del modo 9, exhibiendo MAC

prácticamente iguales para ambos modos. De hecho la forma modal mostrada podría también atribuirse al modo 9.

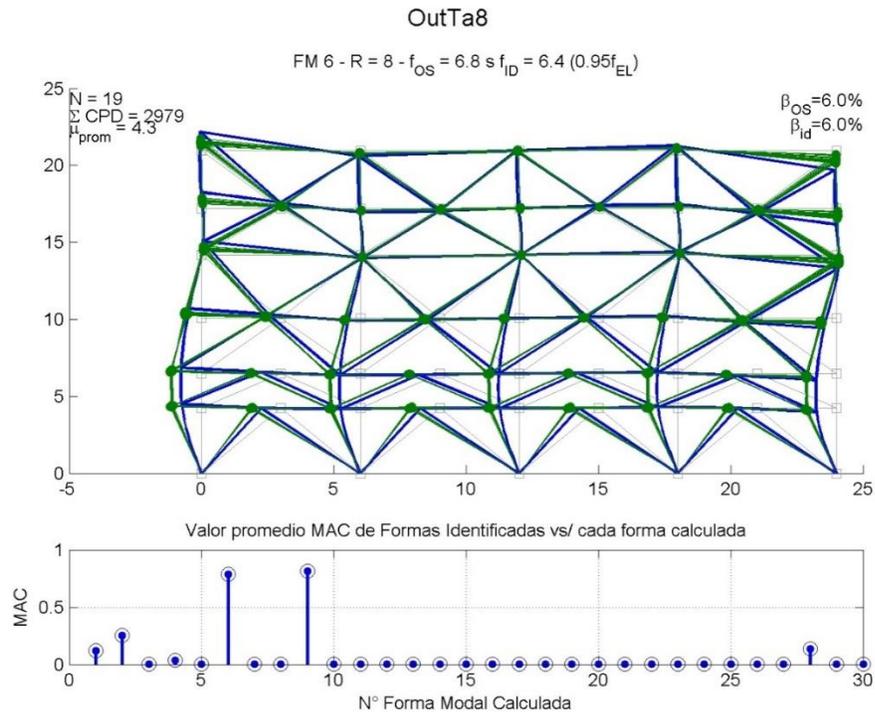


FIGURA 153: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 6 PARA IDENTIFICACIÓN EN ALTA NO LINEALIDAD . INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE TALCA.

Los otros bins asociados al modo 9 que aparecen como una nube de puntos en los Cluster no lineales, exhiben menor dispersión mientras más cercanos están a la frecuencia elástica, y mayor presencia del modo 9 en cuanto a MAC. La Figura 154 muestra un bin cercano a la frecuencia elástica ($0.98f_{el}$), en comparación con la Figura 155, que muestra un bin lejano ($1.17f_{el}$), el de mayor frecuencia dentro de la nube de puntos del Cluster de la Figura 147.

A pesar de la mayor dispersión del modo, la forma modal promedio es atribuible a la forma n°9.

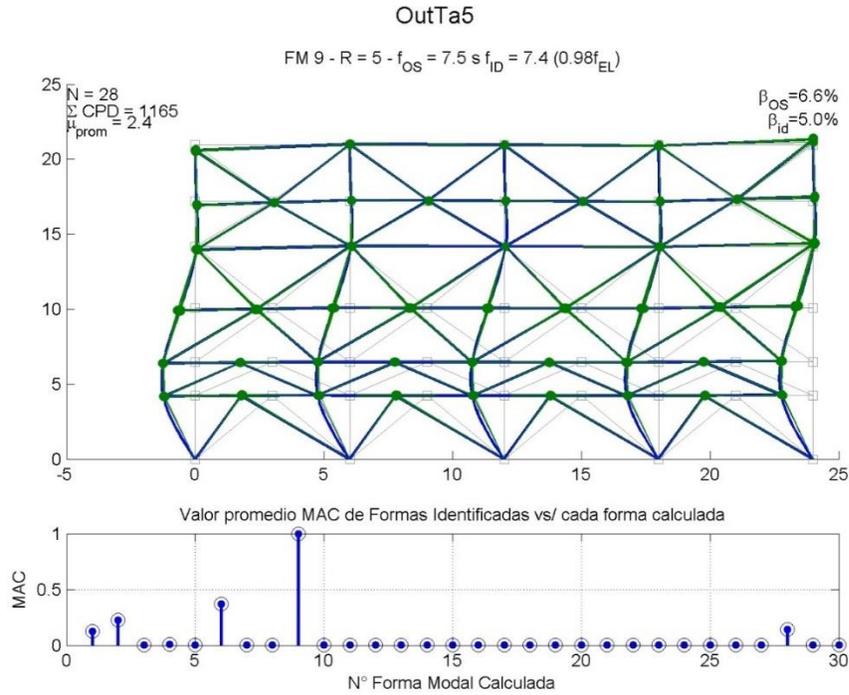


FIGURA 154: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 9 PARA IDENTIFICACIÓN EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD. INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE TALCA.

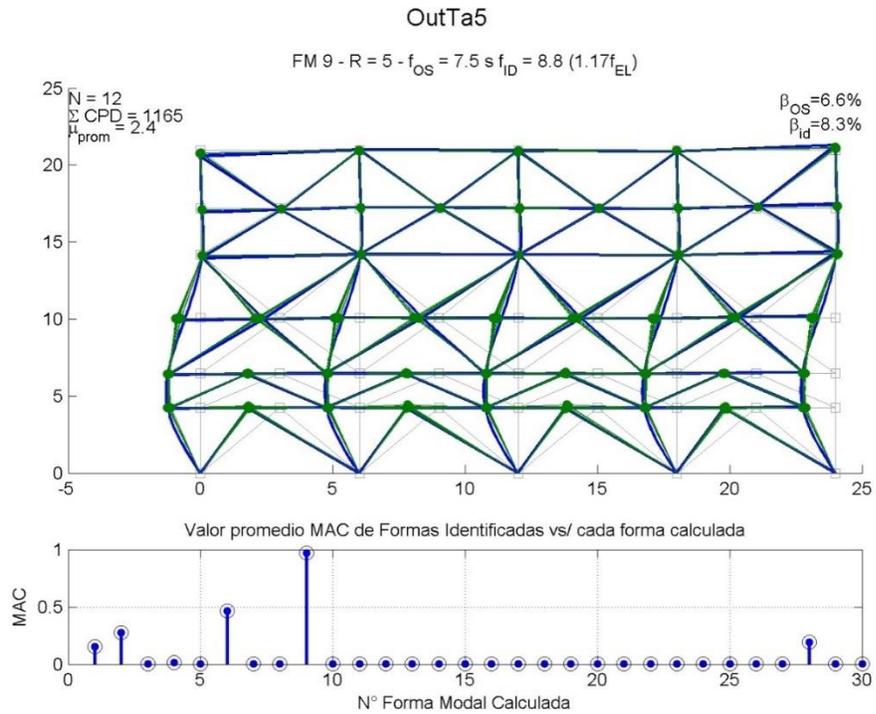


FIGURA 155: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 9 PARA IDENTIFICACIÓN EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD. INSTRUMENTACIÓN A, REGISTRO DE TALCA.

En La Figura 156 se muestran el valor que alcanza el criterio MAC cuando se toma la forma modal promedio identificada en cada proceso para esta instrumentación en el primer modo. Cada diagrama MAC muestra la pérdida de consistencia en la forma modal para este modo en particular. Para cada comparación se muestra también el menor valor que alcanza MAC, es decir la máxima ortogonalidad alcanzada en un mismo modo al aumentar su incursión en el rango no lineal.

Los modos n°2, y n°9, presentan un comportamiento similar al modo n°1, el modo n°3 en cambio, presenta una pérdida de consistencia únicamente para el proceso de alta no linealidad (R = 8), no así para los otros procesos. El valor de la mínima ortogonalidad para todos los modos mencionados se muestra resumido en la Tabla 75. Los diagramas MAC de todos los modos mencionados, son visualizables en el Anexo 2.

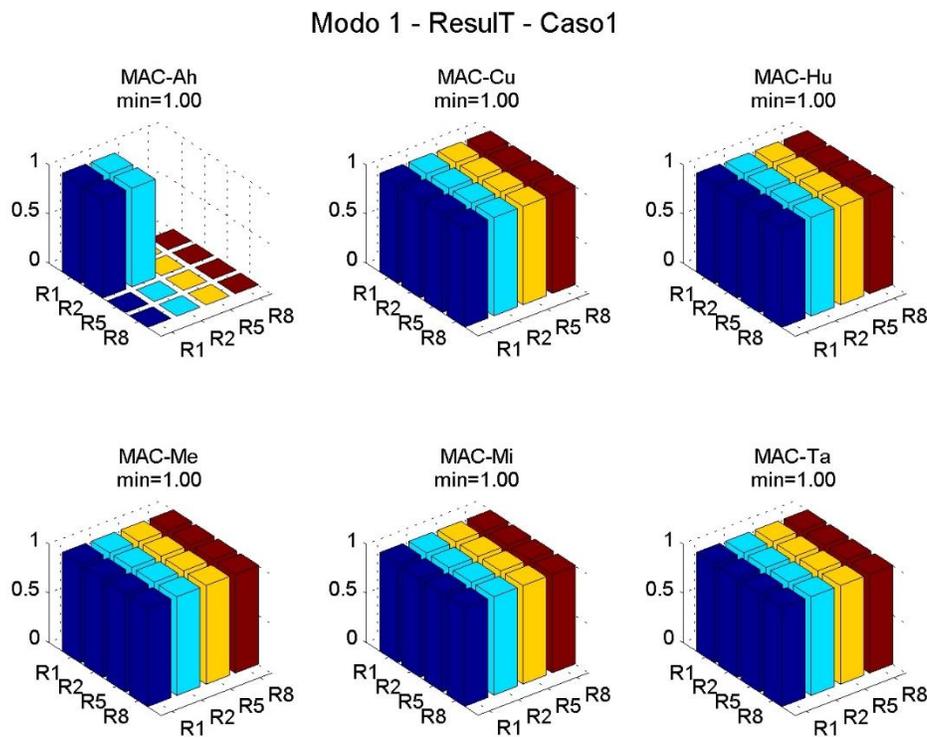


FIGURA 156: MAC DE LA FORMA MODAL N°2 IDENTIFICADA EN CADA PROCESO DE LA INSTRUMENTACIÓN A - CASO 1

Modo	Ah	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	0.15	0.41	1.00	1.00	1.00	1.00
9	0.98	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99

TABLA 75: PERDIDA DE ORTOGONALIDAD AL AUMENTAR NO LINEALIDAD – CASO 1 – INSTRUMENTACION A

INSTRUMENTACIÓN B: 24 SENSORES.

La instrumentación B entrega resultados similares a la instrumentación A, equipada sensores en todos los grados de libertad. Las variaciones en la frecuencia identificada en cada modo son

menores, tal como se ve en la Tabla 76 que recoge este factor, la mayor parte de las frecuencias no distan más de un 4% de la identificada con todos los sensores, salvo en un dato de formas atribuibles al modo n°9, que se sigue comportando como un modo con gran dispersión identificado en varios bins.

Se identifican modos en todos los procesos no lineales para todos los registros, salvo

El modo n°6, se identifica en dos casos (Cu, R = 2 y Ta, R = 2), y se exhibe el mismo comportamiento que el descrito para la instrumentación A, es decir, se identifica un modo que es combinación de éste y el n°9. Los modos n°1, n°2, y n°9, no se identifican cuando se identifican los resultados obtenidos con el registro de Alto Hospicio (Ah), en los procesos no lineales, cosa que sí ocurre con los otros registros (ver Anexo 2).

fidB/fidA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.00	1.00	1.00						1.00
R = 5	0.99	1.00	1.00						1.00
R = 8	1.00	1.00	1.00						1.05

TABLA 76: FRECUENCIA IDENTIFICADA CON INSTRUMENTACIÓN B NORMALIZADO POR EL IDENTIFICADO EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

Los amortiguamientos exhiben un comportamiento más disperso, a medida que se aumenta la no linealidad. La Tabla 77 muestra la relación entre el amortiguamiento identificado con la instrumentación B y el identificado con sensores en todos los grados de libertad.

t][t]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.02	1.03	1.03						0.96
R = 5	0.95	0.98	1.01						0.92
R = 8	0.98	1.06	1.01						0.92

TABLA 77: AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO CON INSTRUMENTACIÓN B NORMALIZADO POR EL IDENTIFICADO EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

Las formas modales se comportan de la misma manera a como se describió en la instrumentación A. Su dispersión se muestra en la Tabla 78.

DispFM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.99	0.99	0.59			0.87			0.84
R = 5	0.99	0.93	0.50						0.85
R = 8	0.97	0.95	0.36						0.86

TABLA 78: DISPERSIÓN DE LA FORMA MODAL IDENTIFICADA. CASO 1 – INSTRUMENTACIÓN B.

La Tabla 79 muestra la máxima ganancia de ortogonalidad en las formas modales promedio identificadas al incursionar en el rango no lineal, del proceso lineal (R = 1), al de alta no linealidad (R = 8).

Modo	Ah	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
3	0.96	0.85	0.96	0.99	0.99	0.83
9	1.00	0.99	0.98	0.96	1.00	0.99

TABLA 79: PERDIDA DE ORTOGONALIDAD AL AUMENTAR NO LINEALIDAD – CASO 1 – INSTRUMENTACION B.

INSTRUMENTACIÓN C: 4 SENSORES.

La instrumentación C mantiene el comportamiento descrito en las instrumentaciones anteriores, si bien, al solo estar registrados 4 grados de libertad, se hace más ambigua la asociación por formas modales: muchas formas modales comparten la proporcionalidad en los cuatro grados de libertad rastreados. Lo anterior lleva a la detección de más modos espurios después del filtrado del Triple Acierto.

Adicionalmente, la instrumentación únicamente dos puntos favorece la aparición de algunos modos verticales que no aparecían en las instrumentaciones anteriores. Estos modos son los n°5 y n°7. N°16.

Cabe destacar que el modo n°9 aparece con menos frecuencia que en la instrumentación B, y con menos bins asociados a este en un solo proceso.

La Tabla 80 muestra la frecuencia identificada normalizada por la frecuencia elástica y la Tabla 81 muestra el amortiguamiento identificado normalizado. En éstas, y todas las tablas mostradas para esta instrumentación se obvian los modos 10 al 15 por no aparecer. En cursiva se muestran las casillas que corresponden a modos que fueron identificados en no más de dos registros de los seis disponibles.

fid/fel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	0.98
R = 2	0.99	1.00	1.00		1.00	0.97	0.99		1.03	0.98
R = 5	0.99	0.99	1.00		1.01	0.89	1.00		1.06	0.98
R = 8	0.99	0.97	1.00		1.03				1.07	0.98

TABLA 80: FRECUENCIA IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA FRECUENCIA ELASTICA DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN C.

βid/βel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.97
R = 2	1.81	1.45	1.02		0.99	0.97	0.98		0.79	0.93
R = 5	3.78	1.37	1.06		1.09	0.97	0.95		0.55	0.93
R = 8	5.10	1.57	1.12		1.22				0.52	0.92

TABLA 81: AMORTIGUAMIENTO NORMALIZADO POR LA FRECUENCIA ELASTICA DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN C.

La Frecuencia no sufre grandes variaciones al disminuir el número de sensores, como sí es el caso del amortiguamiento. La Tabla 82 y Tabla 83 muestran la razón entre la identificación de estos parámetros con 4 sensores y la con la instrumentación de todos los grados de libertad.

fidC/fidA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.00	1.01	1.00						1.01
R = 5	0.99	1.00	1.00						1.02
R = 8	1.00	0.98	1.00						1.07

TABLA 82: RAZÓN ENTRE LA FRECUENCIA IDENTIFICADA EN INSTRUMENTACIÓN C Y LA OBTENIDA EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

bidC/bidA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.92	1.47	1.02						0.77
R = 5	0.83	1.31	1.01						0.78
R = 8	0.77	1.28	1.05						0.75

TABLA 83 RAZÓN ENTRE EL AMORGITUAMIENTO IDENTIFICADO EN INSTRUMENTACIÓN C Y EL OBTENIDO EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

La forma modal por su parte, exhibe dispersiones bajas para los primeros modos horizontales, crecientes con la no linealidad. El modo n°6 y n°9 exhiben dispersiones mayores a medida que aumenta la no linealidad. Los modos n°3, n°5, n°7 y n°16 exhiben dispersiones altas con la no linealidad. Todos ellos son modos verticales para los nodos instrumentados.

DispFM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00
R = 2	1.00	0.95	0.89		0.47	0.63	0.38		0.65	0.61
R = 5	1.00	0.92	0.59		0.23	0.39	0.27		0.86	0.54
R = 8	0.99	0.92	0.56		0.45				0.79	0.32

TABLA 84: DISPERSIÓN INTERNA DE CADA FORMA MODAL - INSTRUMENTACIÓN C.

La Figura 157 muestra el diagrama de Estabilización y Cluster asociado al proceso de no linealidad media (R = 5) del registro de Mejillones. En él se ve un modo espurio de alta frecuencia, bajo la curva de Rayleigh. Corresponde a ruido, y su forma modal no es concluyente. También se ven los modos verticales n°5, n°7 y n°16 que aparecen junto a la curva, después de los 5 Hz.

La Figura 158 y Figura 159 muestran la forma modal asociada a los modos n°5 y n°16 de este registro, con gran dispersión en la determinación de la forma, concentrada en la determinación de la deformación horizontal del nodo del tercer nivel.

TripleAcierto Me R = 5 - 4sens

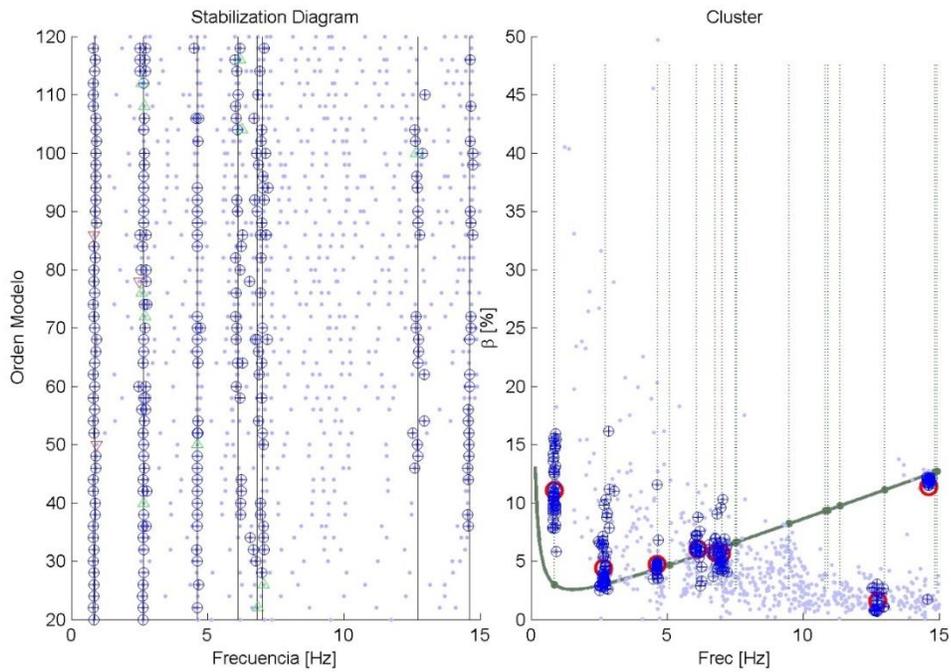


FIGURA 157: CLUSTER DEL PROCESO DE NO LINEALIDAD MEDIA. REGISTRO DE MEJILLONES. IDENTIFICADOS MODOS 1,2,3,5,6 Y 16. PRECENCIA DE MODO ESPURIO EN 13 HZ.

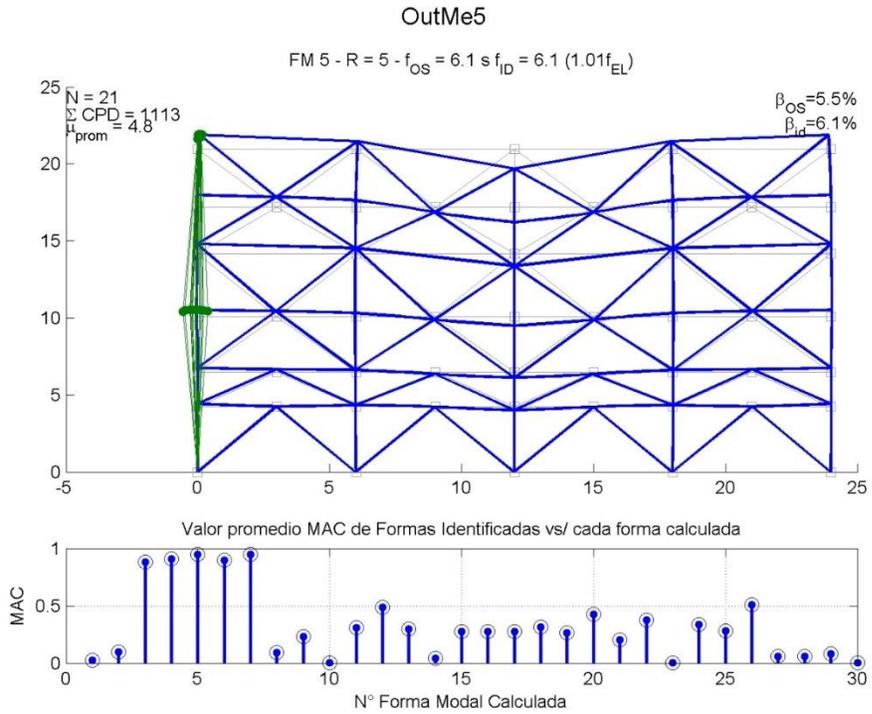


FIGURA 158: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 5 EN PROCESO R = 5 DEL REGISTRO DE MEJILLONES. (DISPERSIÓN INTERNA 0.27).

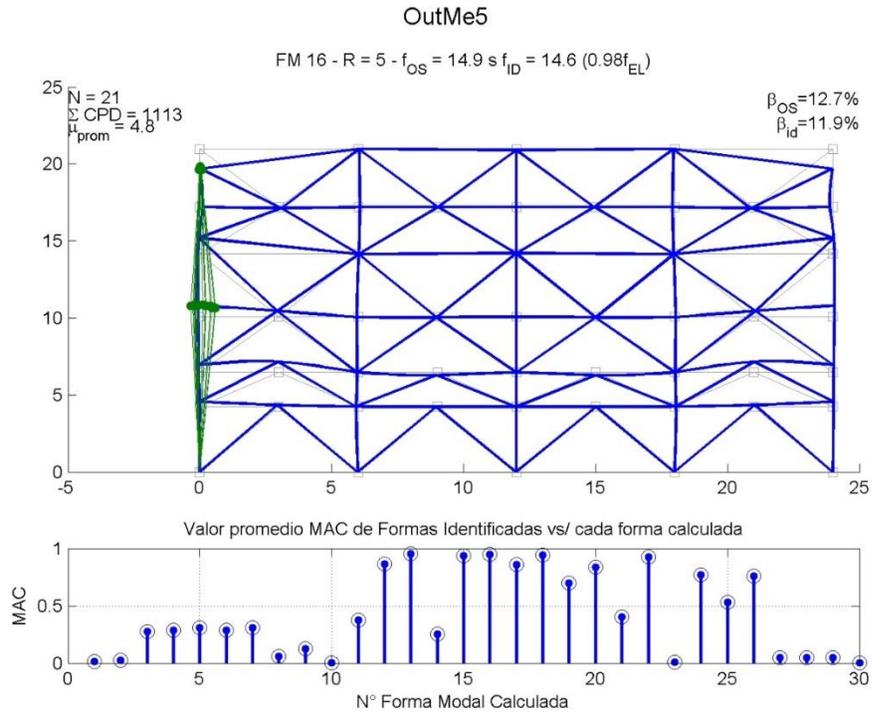


FIGURA 159: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 7 EN PROCESO R = 5 DEL REGISTRO DE MEJILLONES. (DISPERSIÓN INTERNA 0.21).

La Tabla 79 muestra la máxima ganancia de ortogonalidad en las formas modales promedio identificadas al incursionar en el rango no lineal, del proceso lineal ($R = 1$), al de alta no linealidad ($R = 8$). Figura 160 ejemplifica la información asociada al modo 16, mostrando el MAC obtenido al comparar las formas modales promedios identificadas de un mismo registro.

Modo 16 - Resul4 - Caso1

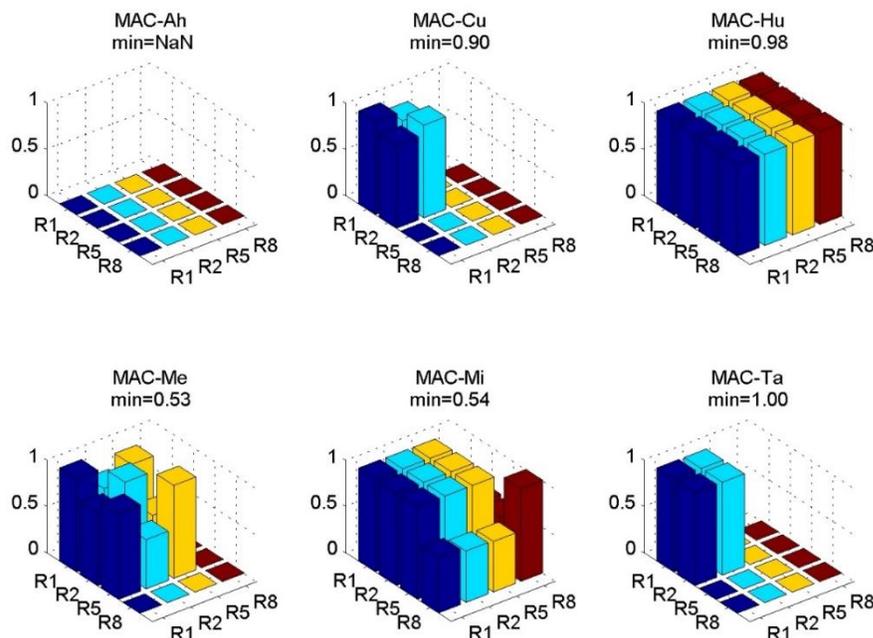


FIGURA 160: PÉRDIDA DE ORTOGONALIDAD EN EL MODO 9 DE FORMAS MODALES PROMEDIO IDENTIFICADAS. CASO 1 – INSTRUMENTACION B.

Modo	Ah	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
3	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9	0.99	0.99	0.99	1.00	0.98	1.00
16		0.90	0.98	0.53	0.54	1.00

TABLA 85: PERDIDA DE ORTOGONALIDAD AL AUMENTAR NO LINEALIDAD – CASO 1 – INSTRUMENTACION C.

INSTRUMENTACIÓN D: 2 SENSORES HORIZONTALES.

La instrumentación con dos sensores horizontales arroja buenos resultados para la identificación lineal, de casi todos los modos, incluso verticales. Las pequeñas componentes de éstos en la horizontal la hacen identificable. Al entrar en el rango no lineal, desaparecen los modos verticales (n°3, n°4, n°5, n°7), quedando únicamente los modos horizontales. Tampoco hay buen alcance para frecuencias superiores a 8 Hz (sobre el noveno modo). Cabe destacar que el modo n°3, el principal de los verticales, alcanza a ser capturado para baja no linealidad en algunos registros. La Tabla 86 muestra las observaciones descritas en este párrafo, con la frecuencia identificada normalizada, y la Tabla 87 el amortiguamiento normalizado.

fid/fel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.00	0.99	1.00			1.01			0.99
R = 5	0.97	0.98				0.92			0.99
R = 8	0.96	0.98				0.93			1.01

TABLA 86: FRECUENCIA IDENTIFICADO NORMALIZADA POR LA FRECUENCIA ELASTICA DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN D.

β_{id}/β_{el}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2	1.86	1.31	1.20			1.09			0.87
R = 5	3.23	1.45				0.84			0.84
R = 8	4.30	1.35				0.92			0.69

TABLA 87: AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO NORMALIZADO POR EL AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN D.

La comparación entre la frecuencia identificada con dos sensores y con la instrumentación completa (A) está reflejada en la Tabla 88, a manera de razón entre ellas, la Tabla 89 por su parte lo hace con amortiguamiento identificado.

$fidD/fidA$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.00	1.00	1.00			1.01			0.97
R = 5	0.97	0.99							0.96
R = 8	0.97	0.99				1.05			1.01

TABLA 88: VARIACIÓN ENTRE FRECUENCIA IDENTIFICADA EN INSTRUMENTACIÓN D Y LA IDENTIFICADA EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

β_{idD}/β_{idA}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.87	1.36	1.20			1.15			0.85
R = 5	0.71	1.22							1.03
R = 8	0.65	1.14				0.93			0.99

TABLA 89: VARIACIÓN ENTRE EL AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO EN INSTRUMENTACIÓN D Y EL IDENTIFICADO EN INSTRUMENTACIÓN A.

Incluir únicamente dos sensores, aumenta la posibilidad de obtener modos espurios después del filtrado Triple Acierto. La Figura 161 muestra dos modos espurios sobre los 10 Hz.

TripleAcierto Mi R = 8 - 2sens

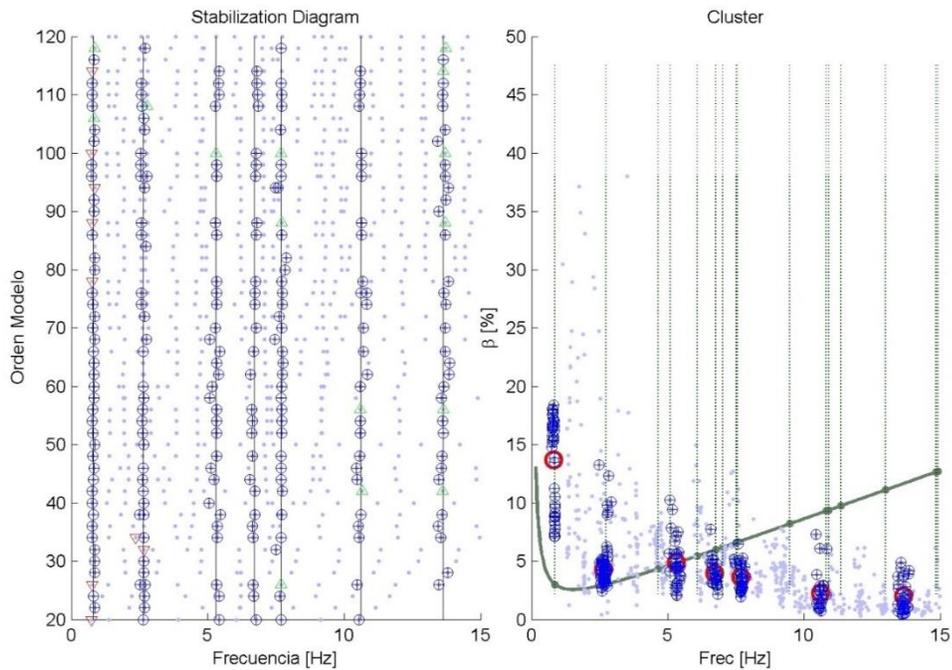


FIGURA 161: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DEL PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD DEL REGISTRO DE MIRADOR. MODOS ESPURIOS SOBRE LOS 10 HZ.

La Tabla 90 muestra la dispersión interna de las formas modales para la instrumentación presente.

DispFM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.00	0.97	0.90			0.89			0.86
R = 5	1.00	0.91				0.83			0.84
R = 8	1.00	0.89				0.81			0.63

TABLA 90: DISPERSIÓN INTERNA DE LAS FORMAS MODALES SEGÚN MAC. INSTRUMENTACIÓN D.

La Figura 162 muestra la forma modal asociada al modo 6 en el proceso de alta no linealidad (R = 8) del registro de Mejillones, y la Figura 163 la forma modal n°9. Se muestra también en ambas figuras el valor promedio del MAC de esta forma respecto a las formas modales calculadas. En esta instrumentación, con únicamente sensores horizontales, es especialmente confuso discriminar entre las dos formas modales mencionadas, ya que en estos g.d.l. son iguales.

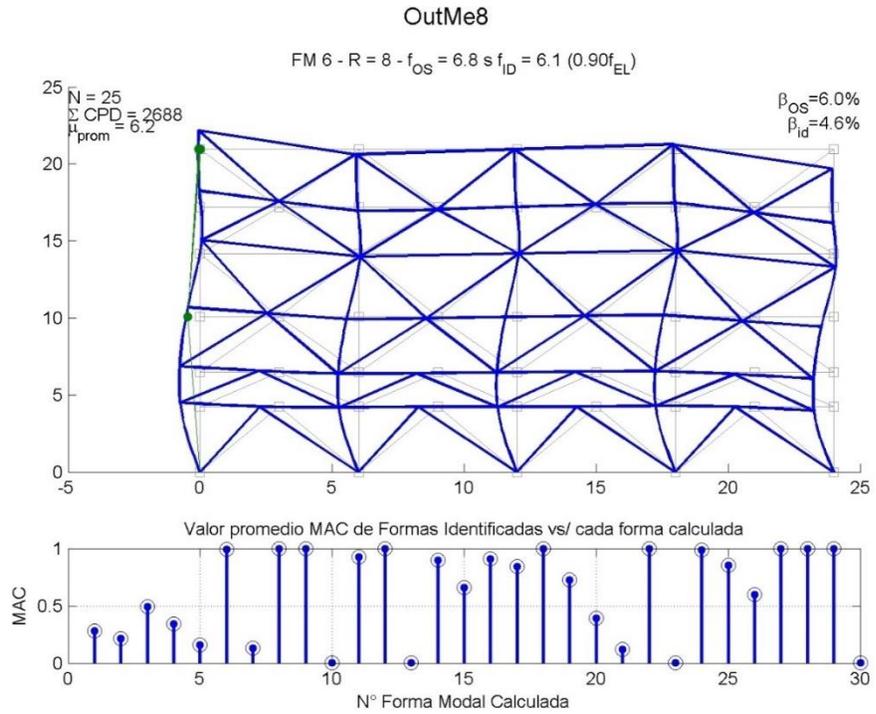


FIGURA 162: FORMA MODAL ASOCIADA A MODO 6 EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD (R = 8), REGISTRO DE MEJILLONES, INSTRUMENTACIÓN D.

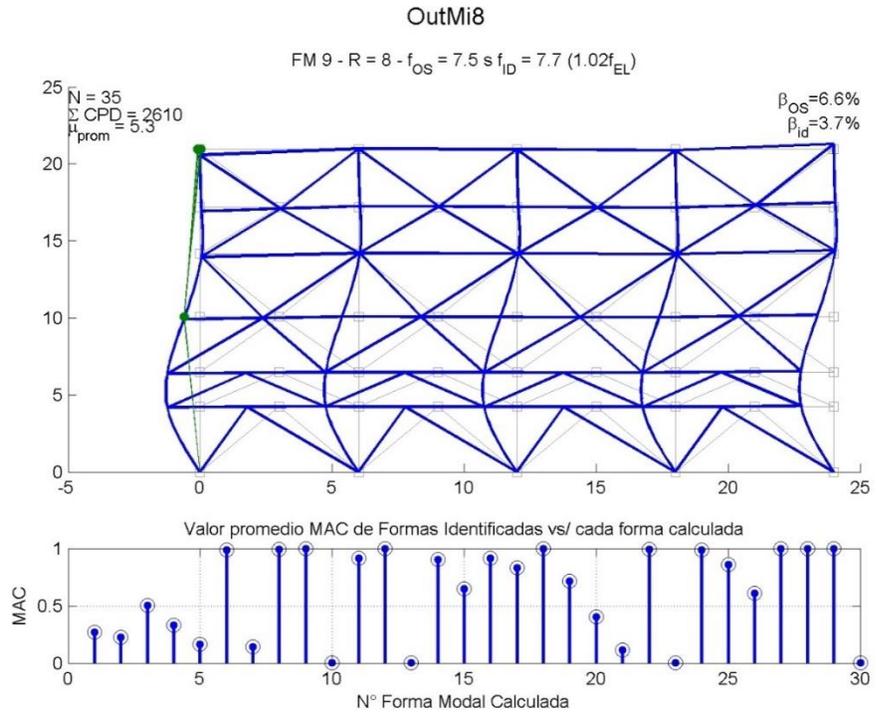


FIGURA 163: FORMA MODAL ASOCIADA A MODO 9 EN PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD (R = 8) , REGISTRO DE MIRADOR – INSTRUMENTACIÓN D.

La Tabla 79 muestra la máxima ganancia de ortogonalidad en las formas modales promedio identificadas al incursionar en el rango no lineal, del proceso lineal ($R = 1$), al de alta no linealidad ($R = 8$).

Modo	Ah	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
9	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00

TABLA 91: PERDIDA DE ORTOGONALIDAD AL AUMENTAR NO LINEALIDAD – CASO 1 – INSTRUMENTACION D.

CASO 2: HISTÉRESIS SUAVIZADA

INSTRUMENTACIÓN A: SENSORES EN TODOS LOS GRADOS DE LIBERTAD.

Para la instrumentación completa del Caso 2, con histéresis suavizada, se presentan caídas en la frecuencia identificada de los dos primeros modos, ellos dos horizontales. En el modo n°3 la caída en frecuencia es muy leve. El modo n°9 aparece en muchos *bins* en todas las identificaciones, y mezclado con el modo 6, al igual de lo que ocurría en el Caso 1. Este se muestra con una gran dispersión, no es clara su disminución en frecuencia como tampoco su aumento en amortiguamiento.

Los modos 5 y 7 aparecen ocasionalmente luego de la incursión en el rango no lineal. Los modos superiores a 9 desaparecen del análisis.

La Tabla 92 muestra la frecuencia identificada en cada caso, normalizada por la elástica de cada modo, la Tabla 93 por su parte, lo hace con el amortiguamiento identificado.

fid/fel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.96	0.96	0.99		0.99	0.96			0.99
R = 5	0.94	0.94	0.99						0.98
R = 8	0.93	0.93	0.99				0.97		0.95

TABLA 92: FRECUENCIA IDENTIFICADA NORMALIZADA POR LA FRECUENCIA ELÁSTICA DE CADA MODO- CASO 2, INSTRUMENTACIÓN A.

β_{id}/β_{el}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2	5.77	1.82	1.05		1.08	1.09			1.12
R = 5	8.55	2.62	1.09						1.35
R = 8	10.01	3.01	1.15				1.08		1.16

TABLA 93: AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO NORMALIZADO POR EL AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO DE CADA MODO- CASO 2, INSTRUMENTACIÓN A.

La dispersión en la determinación de la forma modal se puede ver en la Tabla 94.

DispFM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00

R = 2	0.98	0.97	0.74	0.26	0.91	0.71
R = 5	0.93	0.69	0.45			0.60
R = 8	0.97	0.69	0.79		0.77	0.69

TABLA 94: DISPERSIÓN DE LA FORMA MODAL IDENTIFICADA – CASO 2 – INSTRUMENTACIÓN A.

La Figura 164 muestra el diagrama de Estabilización y Cluster del proceso de alta no linealidad (R = 8) correspondiente al registro de Hualañé. Se identifican los modos n°1, n°2, n°3, n°7 y n°9. A este último se tributan los cuatro *bins* de más alta frecuencia. Los demás Cluster muestran una forma similar, en especial con los *bins* asociados al modo n°9.

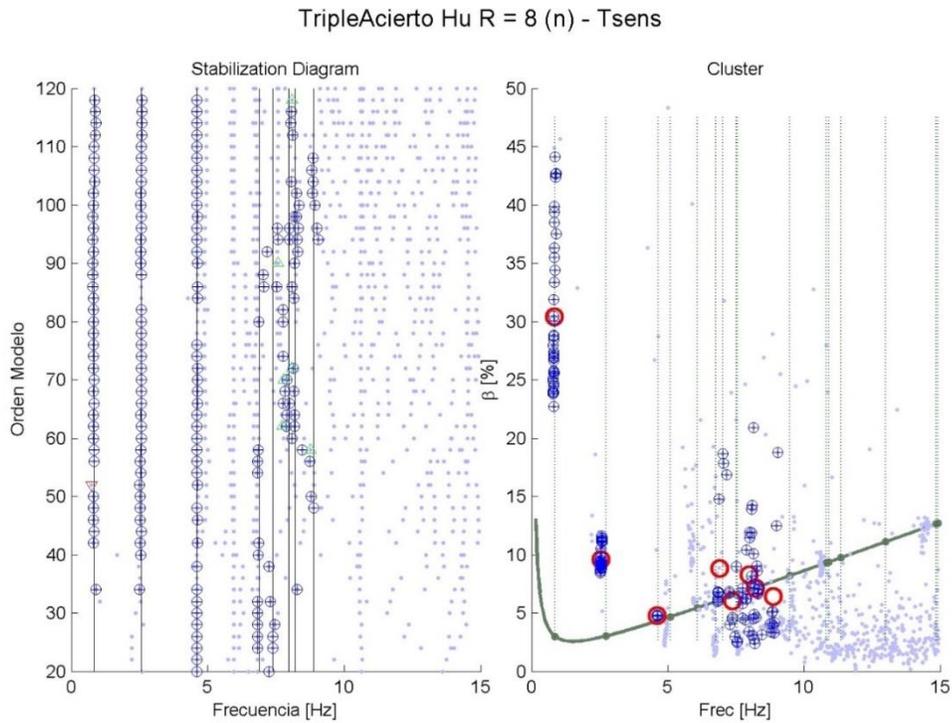


FIGURA 164: DIAGRAMA ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER DEL PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD

El modo 1 se puede visualizar en la Figura 165 en el proceso mostrado en la Figura 164. El modo 2 se puede visualizar en la Figura 166, correspondiente al registro de Curicó.

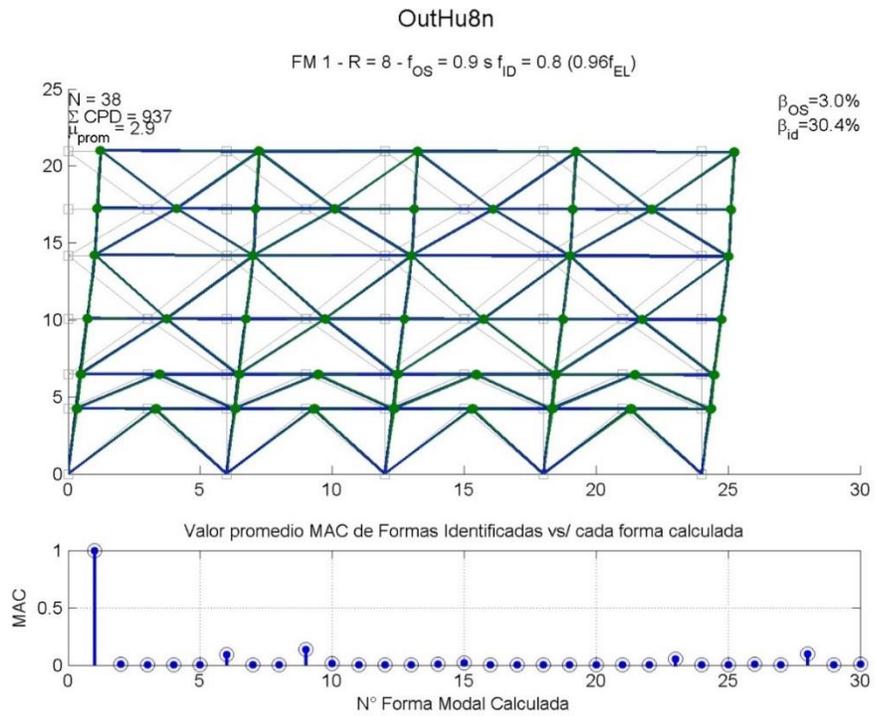


FIGURA 165: FORMA MODAL ASOCIADA A MODO 1 - PROCESO R = 8 REGISTRO DE HUALANÉ, INSTRUMENTACIÓN A

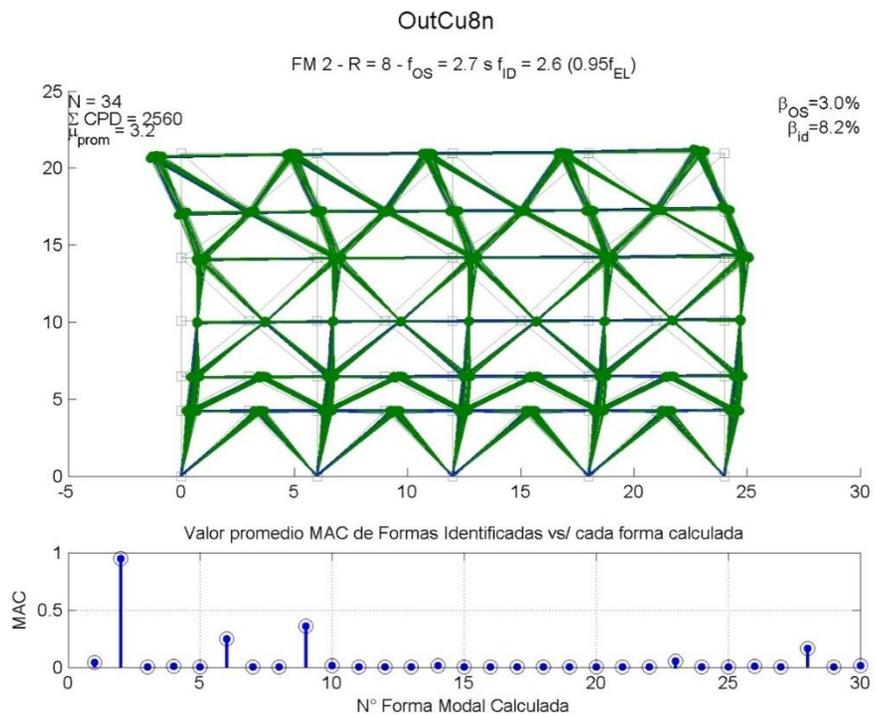


FIGURA 166: FORMA MODAL N°2, REGISTRO DE CURICÓ, PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD (R = 8) - INSTRUMENTACIÓN A.

La Figura 167 muestra la identificación de la forma modal n°7 para alta no linealidad, en uno de los registros en que logró ser identificado.

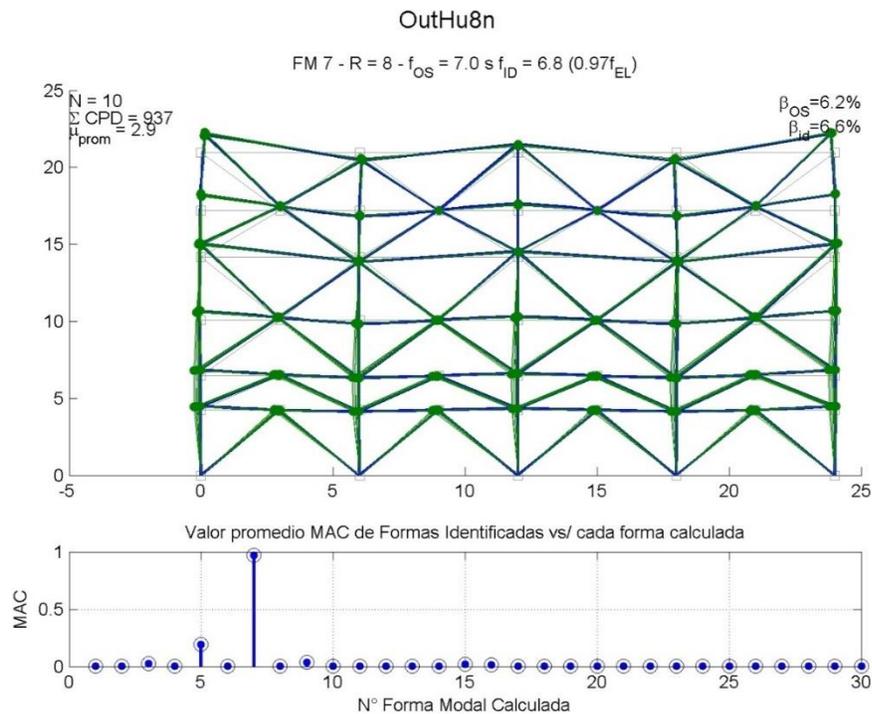


FIGURA 167: FORMA MODAL N°7 EN REGISTRO DE CURICÓ, PROCESO DE ALTA NO LINEALIDAD – INSTRUMENTACIÓN A.

La Figura 168 muestra el valor que alcanza el criterio MAC cuando se toma la forma modal promedio identificada en cada proceso para esta instrumentación. Se muestra la pérdida de consistencia de la forma modal 3 para cada registro. Se incluye también el menor valor que alcanza MAC, es decir la máxima ortogonalidad alcanzada en un mismo modo al aumentar su incursión en el rango no lineal. Este valor de mínima ortogonalidad se muestra resumido en la Tabla 75, para las formas modales más importantes.

Modo 3 - Result - Caso2

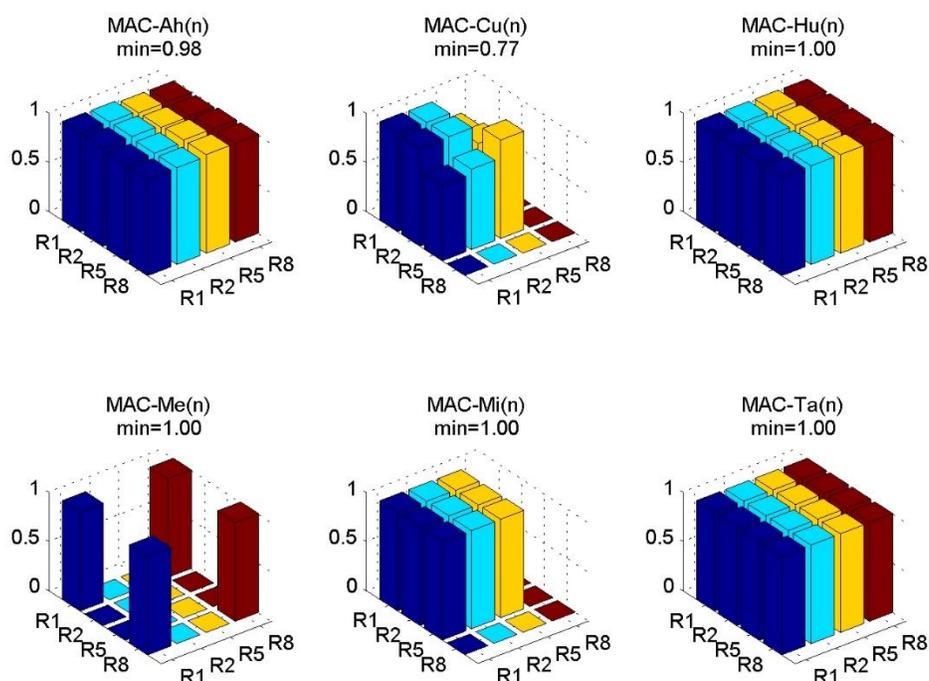


FIGURA 168: MAC DE LA FORMA MODAL N°4 IDENTIFICADA EN CADA PROCESO DE LA INSTRUMENTACIÓN A - CASO 1

Modo	Ah	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
9	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00

TABLA 95: PERDIDA DE ORTOGONALIDAD AL AUMENTAR NO LINEALIDAD – CASO 2 – INSTRUMENTACION A

INSTRUMENTACIÓN B: 24 SENSORES

En la instrumentación B se sigue la tendencia de la instrumentación A. No hay aparición de modos n°5, o n°7 en procesos no lineales.

La frecuencia identificada normalizada por la de los modos elásticos se muestra en la Tabla 96, mientras que el amortiguamiento normalizado en la Tabla 97.

fid/fel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.97	0.96	0.99						1.02
R = 5	1.00	0.94	0.99						0.96
R = 8	0.98	0.93	0.99						0.88

TABLA 96: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR LA FRECUENCIA ELÁSTICA DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN B.

βid/βel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99

R = 2	4.92	1.86	1.05	1.20
R = 5	8.43	2.67	1.10	1.05
R = 8	10.47	3.19	1.14	1.48

TABLA 97: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADAS POR LA AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN B.

La Tabla 98 y Tabla 99 muestran la variación entre las frecuencias y amortiguamientos identificados en esta instrumentación y la instrumentación A, con todos los sensores.

fidB/fidA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.01	1.00	1.00						1.03
R = 5	1.07	1.00	1.00						0.97
R = 8	1.05	1.00	1.00						0.94

TABLA 98: RAZÓN ENTRE LA FRECUENCIA IDENTIFICADA EN LA INSTRUMENTACIÓN B Y LA IDENTIFICADA EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

βidB/βidA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.01	1.02	1.00						1.07
R = 5	1.01	1.03	1.01						0.80
R = 8	1.05	1.07	1.01						1.35

TABLA 99: RAZÓN ENTRE EL AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO EN LA INSTRUMENTACIÓN B RESPECTO AL IDENTIFICADO EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

La Tabla 100 muestra la dispersión de las formas modales.

DispFM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.00	0.99	0.59						0.73
R = 5	0.96	0.76	0.55						0.70
R = 8	0.94	0.46	0.38						0.75

TABLA 100: DISPERSIÓN FORMAS MODALES PARA INSTRUMENTACIÓN B, CASO 2

Cabe destacar que en este caso y esta instrumentación, la dispersión aumenta. El modo n°9 presenta el comportamiento resaltado en la instrumentación A y también Caso 1. El modo 1 presenta dos *bins* en algunas identificaciones, como la mostrada en la Figura 163.

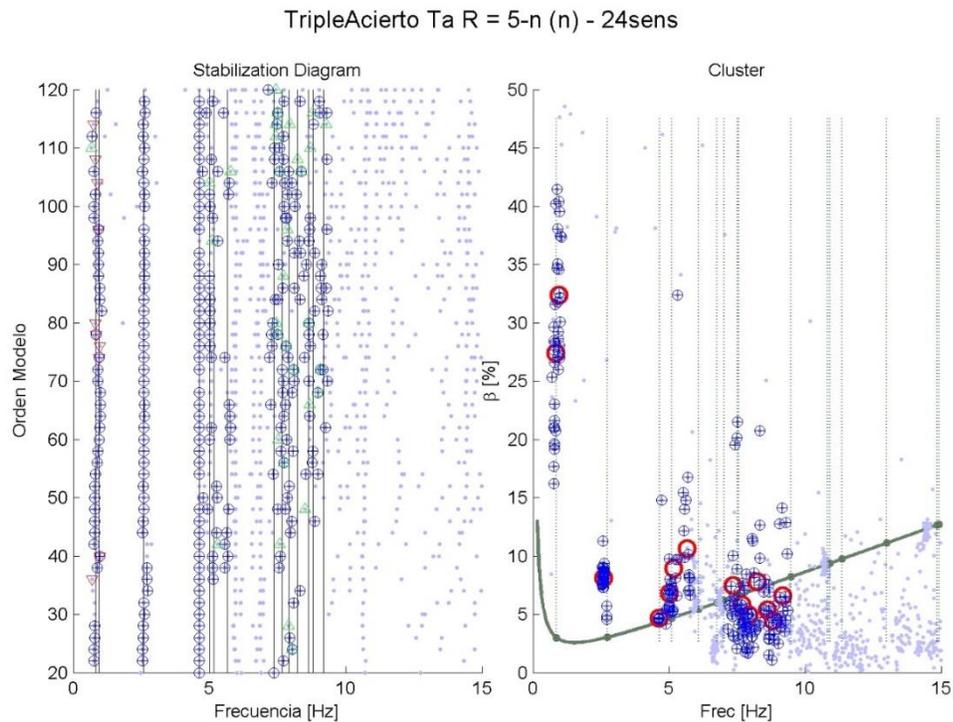


FIGURA 169: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER CORRESPONDIENTE AL PROCESO R = 5 DEL REGISTRO DE TALCA, CASO 2, INSTRUMENTACIÓN B.

A modo de ejemplo se muestra la Figura 170 con la forma modal identificada asociada al modo 3, correspondiente al mismo proceso mostrado en la figura anterior.

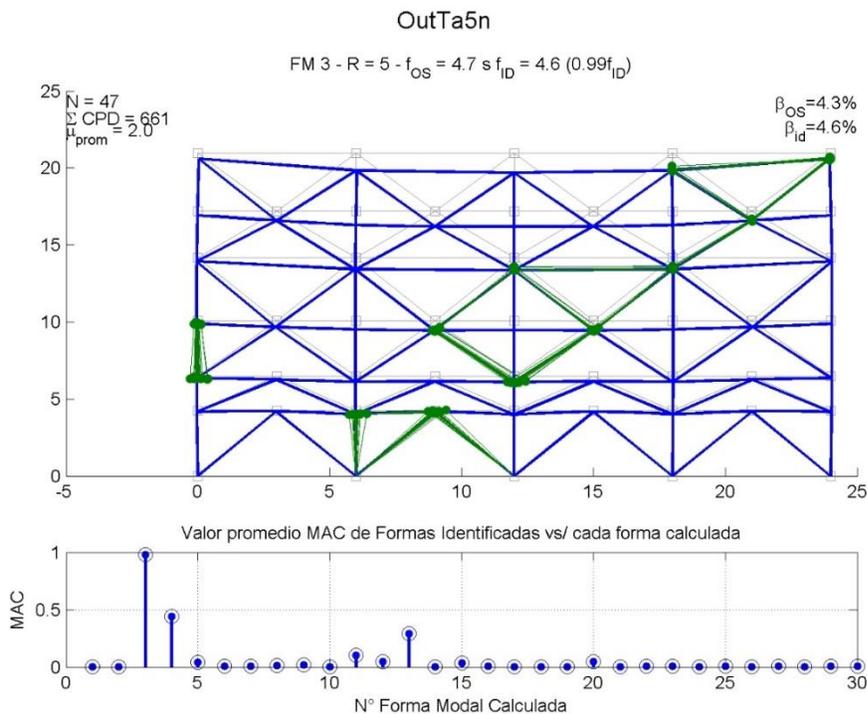


FIGURA 170: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 3 IDENTIFICADA EN PROCESO R = 5, CASO 2, REGISTRO DE TALCA – INSTRUMENTACIÓN B.

La Tabla 79 muestra la máxima ganancia de ortogonalidad en las formas modales promedio identificadas al incursionar en el rango no lineal, del proceso lineal ($R = 1$), al de alta no linealidad ($R = 8$).

Modo	Ah	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
1	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	0.91	1.00	0.99	0.96	0.99
3	0.98	0.91	1.00	0.99	0.99	0.49
9	0.97	0.98	0.99	0.95	0.98	0.97

TABLA 101: PERDIDA DE ORTOGONALIDAD AL AUMENTAR NO LINEALIDAD – CASO 2 – INSTRUMENTACION B.

INSTRUMENTACIÓN C: 4 SENSORES.

En la instrumentación C se identifica, como en todas las otras, al modo n°1, n°2 y n°3, y n°9, pero además hay presencia de modos verticales como el n°5 y otras más altos como el n°16. Existe presencia de modos espurios aún después del filtrado Triple Acierto.

La frecuencia identificada normalizada por la de los modos elásticos se muestra en la Tabla 96, mientras que el amortiguamiento normalizado en la Tabla 97.

fid/fel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	0.98
R = 2	0.95	0.96	0.99		0.98	0.92	0.98		1.02	0.98
R = 5	0.96	0.93	0.99			0.95	0.98		0.82	0.98

R = 8	0.96	0.90	0.99			0.92	0.97		0.71	0.98
-------	------	------	------	--	--	------	------	--	------	------

TABLA 102: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR LA FRECUENCIA ELÁSTICA DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN C.

β_{id}/β_{el}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.97
R = 2	4.37	1.93	1.05		1.13	0.90	0.97		0.70	0.94
R = 5	6.94	2.40	1.14			0.92	0.84		0.67	0.94
R = 8	8.35	2.81	1.15			1.19	1.00		0.67	0.92

TABLA 103: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADAS POR LA AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN C.

La Tabla 98 y Tabla 99 muestran la variación entre las frecuencias y amortiguamientos identificados en esta instrumentación y la instrumentación A, con todos los sensores.

f_{idC}/f_{idA}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.00	1.00	1.00		1.00				1.03
R = 5	1.03	0.98	1.00						0.83
R = 8	1.04	0.98	1.01				1.01		0.82

TABLA 104: RAZÓN ENTRE LA FRECUENCIA IDENTIFICADA EN LA INSTRUMENTACIÓN C Y LA IDENTIFICADA EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

β_{idC}/β_{idA}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.89	1.06	1.00		1.08				0.60
R = 5	0.82	0.93	1.01						0.56
R = 8	0.84	0.91	1.04				0.92		0.68

TABLA 105: RAZÓN ENTRE EL AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO EN LA INSTRUMENTACIÓN C RESPECTO AL IDENTIFICADO EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

La Tabla 100 muestra la dispersión de las formas modales.

$disp_{FM}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00
R = 2	1.00	0.80	0.65		0.27	0.48	0.16		0.51	0.54
R = 5	1.00	0.85	0.65			0.51	0.18		0.28	0.28
R = 8	0.98	0.86	0.61			0.78	0.16		0.59	0.67

TABLA 106: DISPERSIÓN FORMAS MODALES PARA INSTRUMENTACIÓN C, CASO 2

Se muestra un Cluster de ejemplo, del proceso de baja no linealidad correspondiente al registro de Mejillones, con la presencia del modo 16 en la cercanía de los 15Hz, y un modo espurio con forma modal no concluyente en 13 Hz

TripleAcierto Me R = 2-n (n) - 4sens

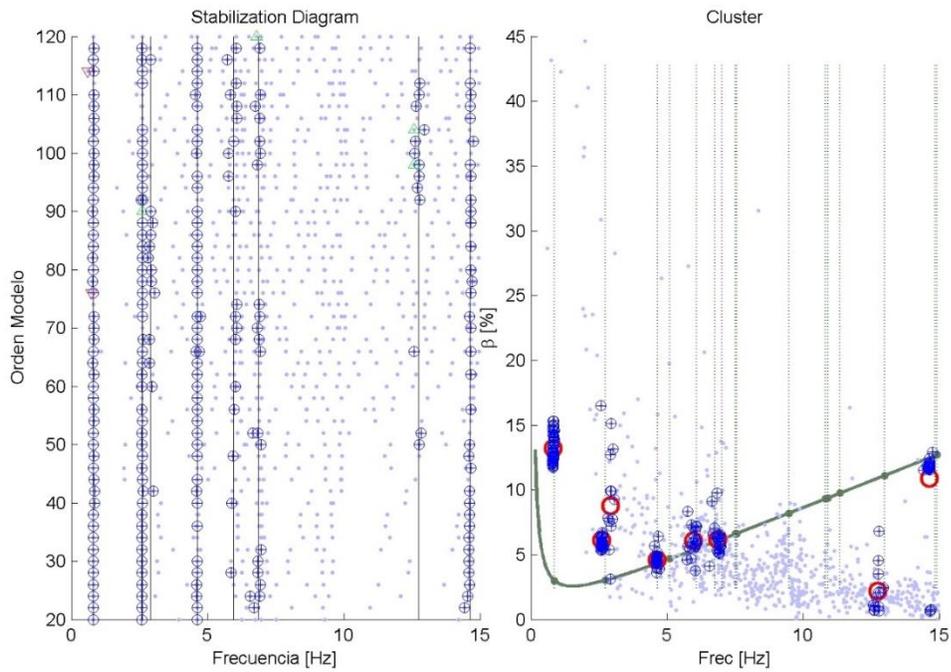


FIGURA 171: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER CORRESPONDIENTE AL PROCESO R = 2 DEL REGISTRO DE TALCA, CASO 2, INSTRUMENTACIÓN C.

Se muestra en la Figura 172 la forma modal n°16 identificada, destacando su gran dispersión (dispFM = 0.38).

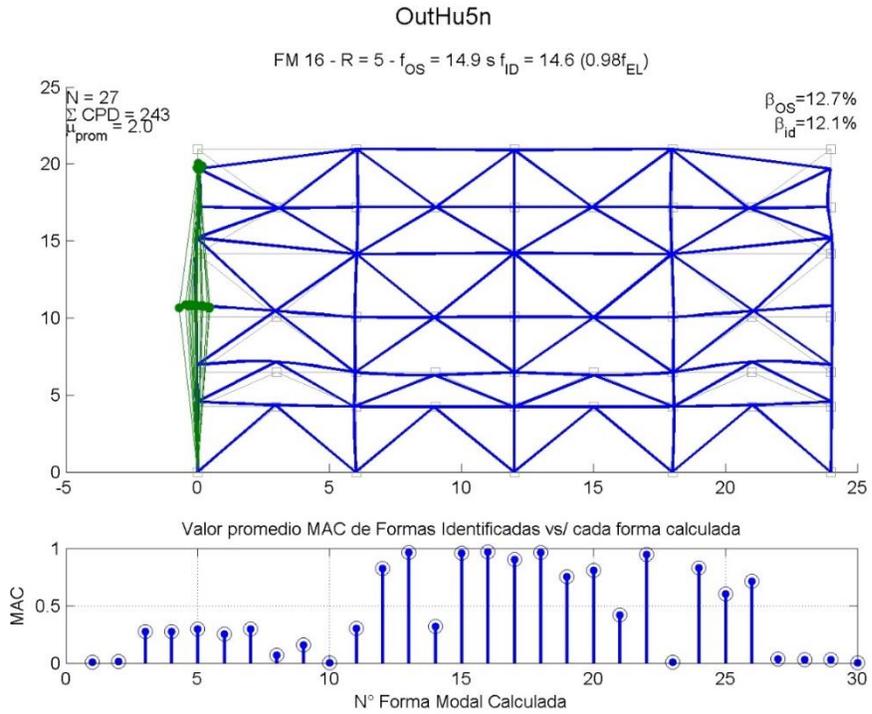


FIGURA 172: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 3 IDENTIFICADA EN PROCESO R = 5, CASO 2, REGISTRO DE TALCA – INSTRUMENTACIÓN B.

La Tabla 79 muestra la máxima ganancia de ortogonalidad en las formas modales promedio identificadas al incursionar en el rango no lineal, del proceso lineal ($R = 1$), al de alta no linealidad ($R = 8$). La Figura 173 ejemplifica la información asociada al modo 9, mostrando el MAC obtenido al comparar las formas modales promedios identificadas de un mismo registro.

Modo 16 - Result4 - Caso2

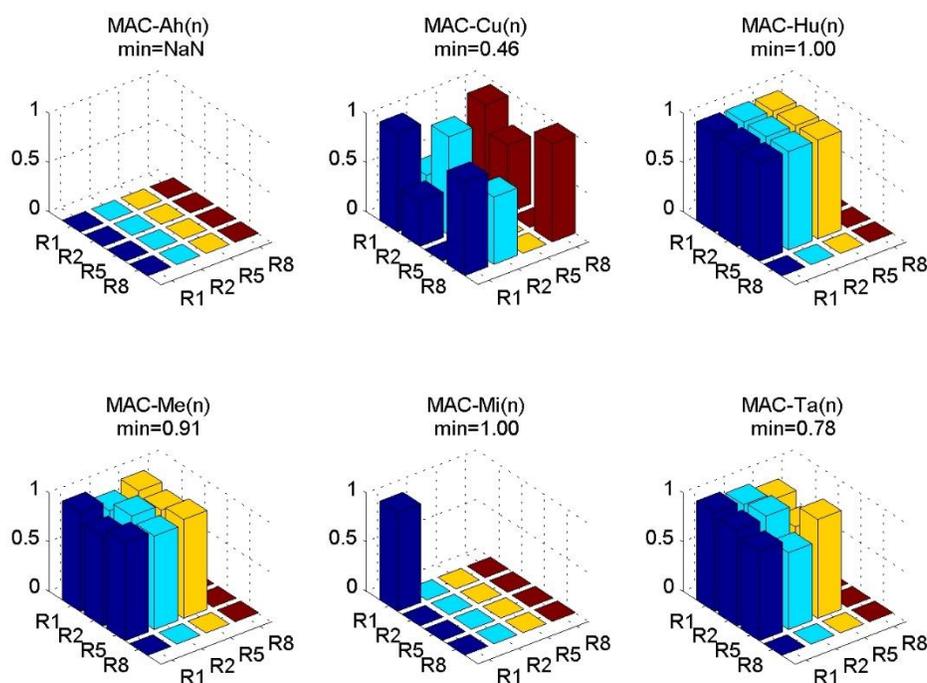


FIGURA 173: PÉRDIDA DE ORTOGONALIDAD EN EL MODO 9 DE FORMAS MODALES PROMEDIO IDENTIFICADAS. CASO 1 – INSTRUMENTACION B.

Modo	Ah	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00
3	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9	0.98	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00
16		0.46	1.00	0.91	1.00	0.78

TABLA 107: PERDIDA DE ORTOGONALIDAD AL AUMENTAR NO LINEALIDAD – CASO 2 – INSTRUMENTACION C.

INSTRUMENTACIÓN D: 2 SENSORES HORIZONTALES.

En la instrumentación C se identifica, como en todas las otras, al modo n°1, n°2 y n°3, y n°9, pero además hay presencia de modos verticales como el n°5 y otras más altos como el n°16. Existe presencia de modos espurios aún después del filtrado Triple Acierto.

La frecuencia identificada normalizada por la de los modos elásticos se muestra en la Tabla 96, mientras que el amortiguamiento normalizado en la Tabla 97.

fid/fel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.95	0.95	1.00			0.95			0.98
R = 5	0.91	0.93				0.92			1.02
R = 8	0.87	0.92	0.91			0.91			1.05

TABLA 108: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR LA FRECUENCIA ELÁSTICA DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN D.

β_{id}/β_{el}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2	4.88	2.23	1.53			1.02			0.90
R = 5	6.23	2.18				1.07			0.86
R = 8	7.63	2.37	3.43			1.07			0.86

TABLA 109: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADAS POR LA AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO DE CADA MODO. INSTRUMENTACIÓN D.

La Tabla 98 y Tabla 99 muestran la variación entre las frecuencias y amortiguamientos identificados en esta instrumentación y la instrumentación A, con todos los sensores.

$fidD/fidA$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.99	0.99	1.00			1.00			0.99
R = 5	0.96	0.99							1.02
R = 8	0.94	0.99	0.93						1.05

TABLA 110: RAZÓN ENTRE LA FRECUENCIA IDENTIFICADA EN LA INSTRUMENTACIÓN D Y LA IDENTIFICADA EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

β_{idD}/β_{idA}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	0.84	1.11	1.49			1.21			0.77
R = 5	0.74	0.85							0.63
R = 8	0.77	0.80	2.74						0.72

TABLA 111: RAZÓN ENTRE EL AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO EN LA INSTRUMENTACIÓN D RESPECTO AL IDENTIFICADO EN LA INSTRUMENTACIÓN A.

La Tabla 100 muestra la dispersión de las formas modales.

$dispFM$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	1.00	0.92	0.68			0.89			0.69
R = 5	1.00	0.90				0.84			0.80
R = 8	1.00	0.90	0.98			0.85			0.88

TABLA 112: DISPERSIÓN FORMAS MODALES PARA INSTRUMENTACIÓN D, CASO 2

A modo de ejemplo se muestra el proceso de identificación de baja no linealidad ($R = 2$) correspondiente al registro de Alto Hospicio. Se aprecia el modo 1, 2, y luego de los 5 Hz los Cluster se asocian al modo n°9.

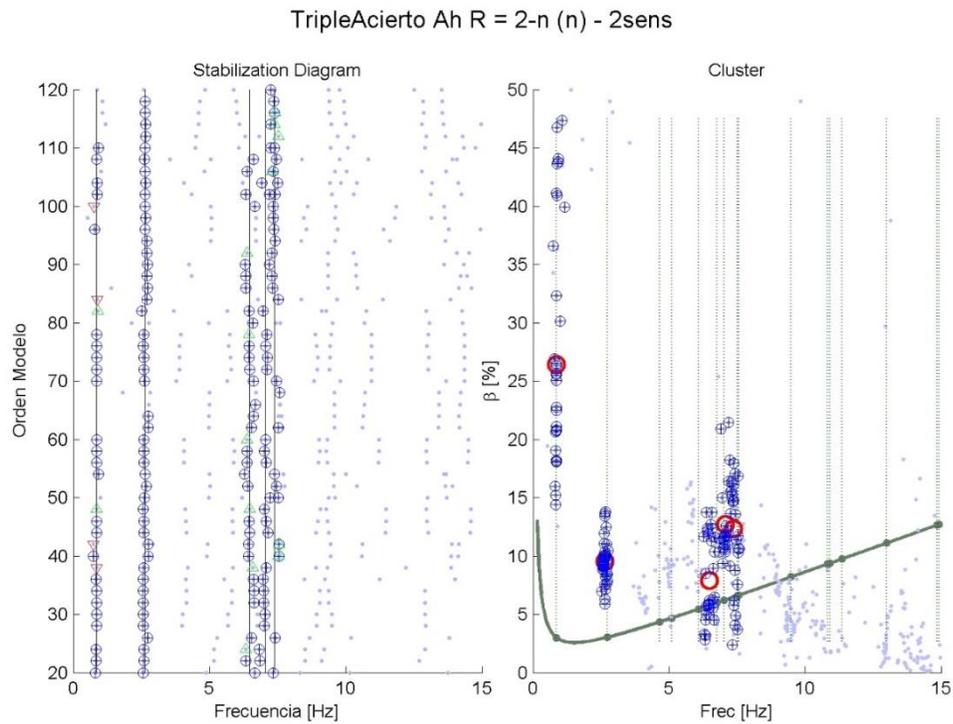


FIGURA 174: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN Y CLUSTER CORRESPONDIENTE AL PROCESO $R = 2$ DEL REGISTRO DE ALTO HOSPICIO, CASO 2, INSTRUMENTACIÓN C.

Se muestra en la Figura 172 la forma modal asociada al modo 1 correspondiente al proceso mostrado en la figura anterior.

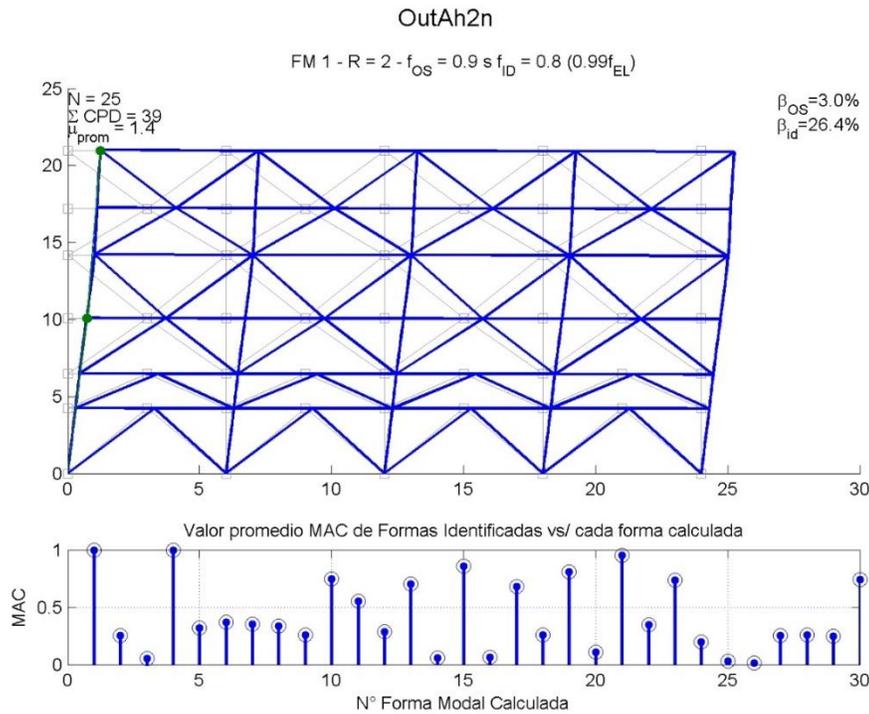


FIGURA 175: FORMA MODAL ASOCIADA AL MODO 1 IDENTIFICADA EN PROCESO R = 2, CASO 2, REGISTRO DE ALTO HOSPICIO – INSTRUMENTACIÓN B.

La Tabla 79 muestra la máxima ganancia de ortogonalidad en las formas modales promedio identificadas al incursionar en el rango no lineal, del proceso lineal (R = 1), al de alta no linealidad (R = 8). Los gráficos MAC relacionado a estos valores se pueden encontrar en el Anexo 2.

Modo	Ah	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	1.00
3	0.68	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00

TABLA 113: PERDIDA DE ORTOGONALIDAD AL AUMENTAR NO LINEALIDAD – CASO 2 – INSTRUMENTACION D.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 IDENTIFICACIÓN SOBRE OSCILADOR DE 1 G.D.L.

La rigidez identificada sobre sistemas bilineales de un grado de libertad con la técnica de selección de máximos en el espectro de potencia, P.S.D., es, en la mayoría de los casos, una rigidez cercana a la inicial del sistema, y bastante lejana a la rigidez secante tomada a la máxima deformación, lo que podría ser un resultado intuitivo.

Para el sistema elastoplástico perfecto, representado en el Caso 1, el aumento de la incursión en el rango no lineal, produce una caída en la rigidez identificada respecto a la inicial del sistema, en que esta disminuye con el aumento del parámetro R . Sin embargo, la caída no es tal, como para que se identifique la rigidez secante tomada a la máxima deformación, y solo es notoria cuando hay una incursión considerable en el rango no lineal. Si esta es baja, no hay diferencia alguna con la identificación de un sistema lineal y elástico.

Se observa que el efecto de la rigidez post fluencia, Caso 2, no hace variar considerablemente los resultados obtenidos del Caso 1, a pesar de que este parámetro llega a 50% de la rigidez inicial, exagerado para los modelos constitutivos del BRB o del acero estructural. Cuando se trata de la suavización de la curva en la transición a la fluencia, se ve un efecto en la rigidez identificada, produciéndose una caída de la misma a medida que el parámetro n baja.

El caso en que se analiza la respuesta no lineal de tres pulsos a distintos instantes de tiempo, en que la única incursión en el rango no lineal se da en el instante del pulso, muestra que una la incursión en el rango no lineal por sí sola no afecta la rigidez identificada. En todos los casos se identifica la misma rigidez inicial.

6.2 IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV

A grandes rasgos, el mismo comportamiento observado bajo la identificación PSD es observable en SSI-COV. Existe una caída en la rigidez identificada con el aumento en la incursión en el rango no lineal, aunque es menos acentuada que la obtenida con la técnica anterior.

En cuanto a la variación de los otros parámetros, K_{post} y n , se observa el mismo tipo de caída en la rigidez inicial, es decir, influencia despreciable del primer parámetro, mientras que el segundo reduce la rigidez identificada. El amortiguamiento por su parte, tiende a aumentar cuando R aumenta y cuando n disminuye, siendo el primer parámetro mucho más influyente para estos efectos que el segundo. El comportamiento es esperable debido a que ambos parámetros tienen relación con el nivel de daño del sistema y su capacidad de disipar energía.

El parámetro K_{post} por su parte, no genera grandes cambios el amortiguamiento identificado, mientras este sea relativamente bajo (menos de 20%).

6.3 IDENTIFICACIÓN CON MOESP

La variación de parámetros del sistema, entrega un comportamiento similar al descrito en las técnicas anteriores. Sin embargo, en este caso es notoria la aparición, con cierta de frecuencia, de un segundo modo, atribuible a la rigidez secante del sistema tomada a la máxima deformación. Este segundo modo, más el primero similar a la rigidez inicial del sistema, constituye la tónica de la identificación bajo la técnica Moesp.

Sin embargo, al ser aplicada la técnica a un registro más corto que los anteriores, presenta mayor inestabilidad y en varios casos no se registra modo significativo alguno.

6.4 IDENTIFICACIÓN CON PSD EN EL BRBF

La identificación sobre el Caso con ley constitutiva del BRB similar a la bilineal, arroja un PSD con máximos en frecuencias parecidas a las lineales y elásticas.

Para los sensores orientados en la dirección horizontal, existe una pequeña caída en frecuencia, que para el modo n°1 y n°2 (principales en la dirección horizontal) no supera un 10%. En cuanto a la forma del P.S.D normalizado por la amplitud máxima, se aprecian distintos resultados dependiendo de la ubicación del sensor en la estructura.

Para sensores dispuestos en los gdl inferiores, el modo que aparece con mayor amplitud es el n°9 (tercero horizontal), lo que es esperable incluso en la identificación lineal y elástica. En las identificaciones no lineales, este es el único modo visible. Los sensores dispuestos en los gdl horizontales más altos, en cambio, muestran mayor presencia de los modos principales. Al incursionar en el rango no lineal estos modos disminuyen su amplitud relativa y muestran un ensanchamiento alrededor de los *peaks* asociados a estos modos, que se asocia con mayor amortiguamiento. Los modos altos siguen siendo visibles y aumentan su amplitud relativa en el PSD.

Adicionalmente, se destaca para el Caso 1 con histéresis bilineal que el PSD obtenido con los sensores orientados en la dirección vertical no cambian su aspecto a medida que incursionan en el rango no lineal. Este fenómeno se explica en este caso y esta estructura, porque los modos verticales sacan su mayor cantidad de energía de elementos que permanecen lineales y elásticos durante todo el sismo.

Para el caso en que la histéresis de los BRB contempla mayor suavidad y su forma se aleja de una bilineal, los resultados de los PSD obtenidos de los sensores orientados horizontalmente son esencialmente iguales, es decir, que se disminuye la frecuencia a medida que se aumenta en el rango no lineal, y para modos altos se visualiza un ensanchamiento alrededor del *peak*. La diferencia está en la magnitud de la disminución de la frecuencia, considerablemente mayor. Además, los gráficos asociados a modos altos se distorsionan de mayor medida, habiendo más *peaks* locales asociados a la frecuencia del tercer modo horizontal.

6.5 IDENTIFICACIÓN CON SSI-COV EN EL BRBF

Para la identificación con SSI-COV se contó con la técnica de filtrado automático del diagrama de estabilización, sin la cual no habría sido viable la realización de la cantidad de identificaciones

necesarias para el trabajo. Para ello, se debió fijar las variables de ajustes que permiten realizar el filtrado automático, tales como ancho del *bin*, o mínima cantidad de triples aciertos necesaria para conformar uno. En la identificación no lineal, estos parámetros de ajuste son incidentes en los resultados, pueden conducir a la no detección de un modo, o la sobre detección de modos espúrios.

Para la identificación de la estructura del caso con ley bilineal en los BRB, que se ve sometida a ruido blanco basal, es observable una disminución pequeña en la frecuencia identificada en los tres primeros modos horizontales. Los demás modos, no ven disminuida la frecuencia. De cualquier manera, dicha flexibilización no es grande, y de hecho, en los *cluster* no es perceptible el desplazamiento de estos modos hacia frecuencias menores. El aumento en el amortiguamiento, sí es notorio, así como la dispersión de este parámetro, crecientes a medida que se incursiona en el rango no lineal. La dispersión es tan notoria para el primer modo, que el amortiguamiento promedio identificado de un modo es solo una forma referencial de capturar este parámetro.

Es observable también que dicho comportamiento es más pronunciado en el modo 1 que en el modo 2, y que en el nivel alto de no linealidad, es más costoso ver el modo n°1 y aparecen menos puntos en el *bin*. El modo principal de la dirección vertical, es un modo que no sufre mayor cambio con la no linealidad en cuanto a frecuencia y amortiguamiento, razonable debido a que su energía proviene principalmente de la extensión de elementos que permanecen lineal y elásticos durante todo el proceso. El modo que constituye el tercero de la dirección horizontal, exhibe aumento en amortiguamiento y dispersión en su determinación.

En cuanto a las formas modales, es observable una conservación de las mismas a pesar de la incursión en el rango no lineal. El modo n°1, por ejemplo, si bien se muestra con amortiguamientos notoriamente distintos, todas las formas modales asociado a estos resultados son colineales a la forma modal n°1. Las formas modales identificadas asociadas a la frecuencia del modo n°2, también son atribuibles a la segunda forma modal. Exhiben una mayor dispersión entre las formas modales agrupadas en un mismo *bin*.

Cuando se disminuye el número de sensores en la instrumentación, la frecuencia identificada es similar a la identificada utilizando un mayor número de sensores. El amortiguamiento en cambio, muestra mayores diferencias, lo cual se condice con la dispersión ya comentada. De cualquier forma, la tendencia a detectar valores de amortiguamiento más altos a medida que se ingresa en el rango no lineal se mantiene, así como el hecho de que el primer modo es el con mayor amortiguamiento. Es interesante ver que para el caso en que se identificaron los datos recopilados de pocos sensores, aparece en la identificación un modo no visible para las otras identificaciones hechas con una mayor cantidad de sensores. Con ello, es posible decir que la variación de la disposición de los sensores, y la disminución del número de ellos, hace posible visualizar otros modos que no aparecen cuando se instrumentan más grados de libertad.

Es posible agregar que para una instrumentación con varios sensores, los mejores parámetros para visualizar un modo en el rango no lineal son la cercanía en frecuencia al modo elástico, y la cercanía en MAC al mismo. Cuando se disminuye el número de sensores, el segundo criterio pierde

relevancia, y sirve para descartar que los resultados no pertenecen a un modo específico, pues para pocos grados de libertad, muchos modos comparten su colinealidad.

El Caso 2, en el que los BRB se modelan con histéresis suavizada, es una identificación en que la técnica encuentra más dificultad en detectar puntos en los modos principales, y aparecen menos resultados por bins que para el Caso 1, en que los BRB del marco tienen histéresis bilineal. En aquellos procesos de alta no linealidad, no se detectan los modos principales horizontales. Lo anterior es relacionable a una mayor distorsión del modo por la forma de la histéresis. En términos de rigidez, se denota una caída en rigidez mucho más pronunciada que la identificada Caso 1

En amortiguamiento detectado en el Caso 2, por su parte, exhibe mayor dispersión y menor cantidad de aciertos si se compara procesos con el mismo R de los casos 1 y 2. La visualización de efectos de la no linealidad se alcanzan a menores R respecto al Caso 1. De cualquier forma, si bien la técnica detecta menos aciertos en el *cluster*, cuando detecta las formas modales lo hace bien. La menor disposición de sensores, modifica, así como lo hacía en el caso 1, el amortiguamiento promedio identificado. La frecuencia promedio identificada difiere pero en menor medida.

6.6 IDENTIFICACIÓN CON MOESP EN EL BRBF

La identificación con la técnica MOESP fue hecha usando seis registros distintos ponderados de manera que exhiben niveles similares de no linealidad. Los resultados de los distintos registros siguen la misma tendencia al incursionar en el rango no lineal, y en algunos casos son iguales. Hay ocasiones en que algunos registros no arrojan modo alguno en no linealidad, y algunas en que solo uno o dos registros entregan algún modo.

En primera instancia se destaca que la técnica MOESP detecta principalmente los modos principales en las instrumentaciones que usan 24 sensores y que instrumentan todos los gdl. Lo hace entregando resultados similares entre ambas instrumentaciones, incluso en amortiguamiento, parámetro que cuando se compara con las otras instrumentaciones cambia bastante. Lo anterior sugiere que cuando se instrumenta con varios grados de libertad, y espacialmente dispersos en la estructura, la identificación es similar a la completa y se priorizan solamente los modos con mayor movilización de masa.

Adicionalmente, las formas modales n°1 y n°2 exhiben buena colinealidad con las formas modales elásticas, y se mantienen así incluso en altos grados de no linealidad. Estas formas modales promedio no cambian esencialmente cuando aumenta el grado de no linealidad.

La forma modal n°3, (principal en la dirección vertical), exhibe gran dispersión. Esta llega a niveles que la forma promedio pueda tener componentes de otros modos. De cualquier forma, a pesar del ruido en la detección de la forma y la presencia de otros modos en el promedio, la frecuencia exhibe un comportamiento estable, en torno a elástica. Lo anterior sugiere que la Forma modal n°3 es representativa del problema, con su frecuencia elástica, pero la técnica se equivoca en su detección de la forma. El tercer modo horizontal, por su parte, exhibe mayor dispersión en frecuencia y amortiguamiento respecto al que se detecta con SSI-COV. En los *cluster* aparece detectada en

varios *bins*, como una nube en torno a la frecuencia y amortiguamiento elástico del modo. En alguno de ellos la forma modal se acopla a otras formas modales.

6.7 COMENTARIOS GENERALES

En términos generales, puede decirse que cuando la estructura entra en el rango no lineal, las formas modales lineales más adecuada para plantear el problema siguen siendo las mismas formas modales lineales y elásticas, de esta manera, se explica que estas sigan conservándose como modos identificados a pesar de la incursión en el rango no lineal, o al menos las de mayor cantidad de movilización de energía. Lo dicho anteriormente, no implica que el planteamiento lineal sea el adecuado para describir un problema no lineal, sino que es el ajuste admisible si se quiere plantear el problema linealmente.

El parámetro usado para determinar las formas modales, *dispFM*, que mide la máxima ortogonalidad entre los vectores que componen una forma modal identificada, permite concluir que la forma modal principal, n°1, no sufre distorsión al entrar en el rango no lineal. Sobre las otras formas modales, es posible ver que los vectores identificados pueden tener componentes de otros modos y esto hace bajar el valor del parámetro mencionado en algunos casos, aunque esto no es un efecto que se visualiza como una tendencia progresiva al entrar en el rango no-lineal. Pueden exhibirse menores valores de *dispFM* de la misma forma modal en procesos no lineales de menor incursión en este rango. En general es posible destacar que no es posible ver cambios en la forma modal comparando su ortogonalidad. El resultado no contradice el hecho que la curvatura de las formas modales altas en la altura se modifique con la no linealidad, propiedad que sí muestra cambios.

La frecuencia asociada a una forma modal identificada en el rango no lineal es en general algo menor que la frecuencia lineal y elástica, y la suavidad de la histéresis es un factor determinante para que esta disminuya. Los tres métodos usados para identificar son consistentes con ese hecho.

El amortiguamiento identificado por los métodos aumenta con la no linealidad y será más pronunciado el aumento mientras más suave sea la histéresis. De cualquier forma, la gran dispersión mostrada para identificar el amortiguamiento con las técnicas paramétricas, enfatiza el hecho que no hay un amortiguamiento equivalente para plantear el problema no lineal, sino que cada vez que se intente hacer una regresión para la respuesta no lineal, se estima algún amortiguamiento mayor al elástico para dar cuenta de la disipación de energía que se está experimentando, y éste tenderá a ser mayor mientras más grande sea la disipación de energía.

Con todo, es posible plantear que con las técnicas de identificación paramétricas utilizadas, se debería ver un aumento en amortiguamiento en un marco arriostrado con diagonales de pandeo restringido cuando este entra en el rango no lineal, y mayor dispersión que la identificada en el rango lineal. Los resultados del presente trabajo indican que sería posible ver una disminución en la frecuencia identificada durante el sismo, sin embargo, esta caída es leve, y puede no ser suficiente para ser un discriminador de fluencia en un registro real.

Así mismo, se debe recalcar que todos los análisis hechos son resultados de análisis computacionales y no consideran el inminente ruido y error en la identificación, que podría hacer desaparecer muchos de los puntos que sobre registros sintéticos se ven, además de usarse un modelo constitutivo idealizado, y un modelo de amortiguamiento como de Rayleigh que no representa necesariamente el amortiguamiento elástico de los modos.

Es necesario, por lo tanto, comparar estos resultados con registros reales para saber si es posible detectar la entrada en fluencia de las diagonales. El trabajo realizado muestra qué variaciones podrían esperarse en los parámetros estudiados al ocurrir este fenómeno.

GLOSARIO

- F_s : Frecuencia de paso de una señal discreta.
- N : Orden del sistema lineal y elástico.
- f_{el} : Frecuencia elástica o inicial.
- f_{id} : Frecuencia identificada.
- f_{id_X} : Frecuencia identificada asociada a proceso o instrumentación X.
- i : Unidad imaginaria, $\sqrt{-1}$
- m, m_i : Masa del sistema de un grado de libertad, o masa modal del modo i de una estructura.
- $v(t), \{v(t)\}$: Desplazamiento de un sistema de uno, o varios grados de libertad según corresponda.
- $\dot{v}(t), \{\dot{v}(t)\}$: Velocidad de un sistema de uno, o varios grados de libertad según corresponda.
- $\ddot{v}(t), \{\ddot{v}(t)\}$: Aceleración de un sistema de uno, o varios grados de libertad según corresponda.
- T_{ini} : Periodo natural de la estructura en el rango lineal y elástico.
- $[C]$: Matriz de Amortiguamiento de un sistema lineal.
- $[K]$: Matriz de Rigidez de un sistema lineal.
- $[M]$: Matriz de Masa de un sistema lineal.
- $\{\phi_i\}$: Vector propio de un modo i de un sistema.
- $()^*$: Operador conjugado complejo.
- β, β_i : Razón de amortiguamiento de un sistema de 1 grado de libertad o modo i de una estructura.
- β_{el} : Amortiguamiento elástico o inicial.
- β_{id} : Amortiguamiento identificado.
- β_{id_X} : Amortiguamiento identificado asociado a proceso o instrumentación X.
- Δf : Paso de frecuencia para filtrado en Diagrama de Estabilización.
- $\delta(t)$: Función Delta de Dirac.
- Δt : Paso de tiempo de una señal discreta.
- ω, ω_i : Frecuencia natural de un sistema de un grado de libertad o del modo i de una estructura.
- ω_n : Frecuencia Natural de la estructura no amortiguada.
- ω_D : Frecuencia Natural amortiguada de un sistema de un grado de libertad.
- $\mathbb{E}\{\cdot\}$: operador Esperanza de variable estocástica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Bendat. y. A. Piersol, «Random Data: Analysis and Measurement Procedures.», New York: Wiley, 1986.
- [2] B. De Moor y P. Van Overschee, Subspace identification for linear systems: Theory-Implementation-Applications, Dodrecht: Kluwer Academic Publishers., 1996.
- [3] M. Verheagen, ««Identification of Deterministic Part of MIMO State Space Models given in Innovation Form from Input-Output Data»,» *Journal of IFAC*, vol. 30, nº 1, pp. 61-74, 1994.
- [4] R. Sabelli y W. López, «Design of Buckling-Restrained Braced Frames,» *The Modern Steel Construction*, vol. 3, 2004.
- [5] Hera, «<https://www.hera.org.nz>,» [En línea]. Available: https://www.hera.org.nz/Story?Action=View&Story_id=1500. [Último acceso: 05 Diciembre 2016].
- [6] X. Qiang, «State of the art of Buckling-restrained braces in Asia,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 61, nº 1, pp. 727-748, 2005.
- [7] American Institute of Steel Construction, Seismic provisions for structural Steel Building, Chicago, 2016.
- [8] R. Boroschek, «Boroschek.com,» 2014. [En línea]. Available: www.boroschek.com.
- [9] T. Barber y Y. Wen, «Seismic Response of Hysteretic degrading Structures,» *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 107, nº 6, pp. 1069-1087, 1981.
- [10] X. Zhu, X. Lu, «Parametric Identification of Bouc-Wen Model and Its Application in Mild Steel Damper Modeling» *Science Direct*, vol. 14, nº 1, pp. 318-324, 2011.
- [11] C.H. Wang, Y.K. Wen, «Reliability and redundancy of pre-Northridge low-rise steel building under seismic action,» vol. III, 2002.
- [12] T. Baber, Y.K. Wen, «Random vibrations of hysteretic degrading systems,» *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 1069-1089, 1981.

- [13] T. Baber, M.N. Noori, « Random vibration of degrading pinching systems.,» *Journal of Engineering Mechanics. ASCE. 111*, vol. 8, pp. 1010-1026, 1985.
- [14] L. Mevel y M. Döhler, «Fast multi-order computation of system matrices in subspace-based system identificacion.,» *Control Engineering Practice*, vol. 20, pp. 882-894, 2012.
- [15] P. G. Bakir, «Automation of the stabilization diagrams for subspace based system identification.,» *Science Direct*, vol. 38, n° 12, pp. 14390-14397, 2011.
- [16] M. Pastor, M. Binda y T. Harcarik, «Modal Assurance Criterion,» *SciVerse ScienceDirect*, vol. 48, pp. 513-548, 2012.
- [17] J. A. Bilbao, «Interpretación automática de Diagramas de Estabilización,» Universidad de Chile, Santiago, 2014.
- [18] P. Villalpando, «Identificación experimental de daño en estructuras a través de aprendizaje supervisado e información mutua.,» Universidad de Chile, Santiago, 2016.
- [19] T. Susagna, L. Cabañas, X. Goula, J. M. Alcalde y M. Melvaux, «Hal Archivos-ouvertes,» 5 Junio 2012. [En línea]. Available: <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00704265/document>. [Último acceso: 10 12 2016].
- [20] Universidad de Chile, «Terremotos - UChile,» [En línea]. Available: <http://terremotos.ing.uchile.cl/>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [21] A. Zona y A. Dall' Asta, «Elastoplastic model for steel buckling-restrained braces,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 68, pp. 118-125, 2012.
- [22] E. Reynders, J. Houbrechts y G. De Roeck, «Fully automated (operational) modal analysis,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 29, pp. 228-250, 2012.
- [23] R. A. Retamales, «Efecto de uso de disipadores de energía en un edificio industrial» Universidad de Chile, Santiago, 2004.
- [24] American Concrete Institute, Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials, Detroit, 1988.
- [25] P.P. Rossi, «Importance of Isotropic Hardening in the Modeling of Buckling Restrained Braces,» *Journal of Structural Engineering*, vol. 14, capítulo 4, 2014.

ANEXO A: DISEÑO DEL BRBF

En el trabajo de Tesis, únicamente se describe el modelo, sus secciones, propiedades y características sísmicas, sin analizar si esta nueva estructura se encuentra dentro de las exigencias de las normas estadounidenses y chilenas. Este anexo está dedicado a presentar el diseño, desde la estructura inicial equipada con diagonales pandeables, hasta la final con BRB.

A.1 ESTRUCTURA ORIGINAL

La estructura a analizar es un silo de almacenamiento minero, en uno de sus marcos planos. La Figura A.1 muestra la estructura con su marco a analizar en primer plano. Además de él, hay dos marcos intermedios y uno posterior.

Los marcos exteriores son marcos sísmicos, con diagonales diseñadas para soportar las acciones horizontales, mientras que los marcos interiores son únicamente estáticos. Por ende, el marco a analizar recibe la masa de los cuatro silos frontales, y la mitad de su peso estático.

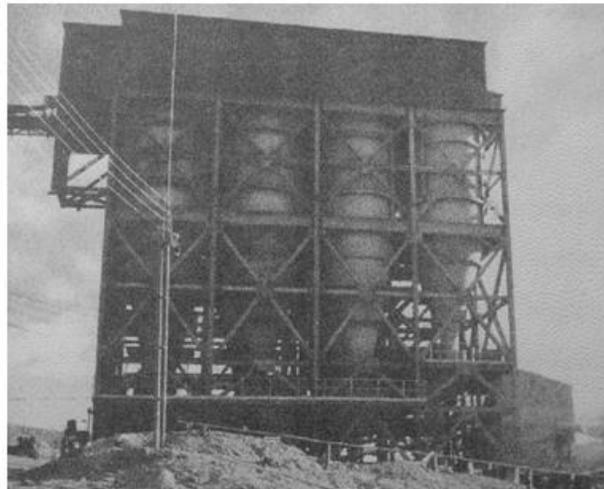


FIGURA A.1: ESTRUCTURA REAL A MODELAR

La Tabla A.1 muestra las características sísmicas de la estructura.

	Valor	Comentario.
Zona Sísmica	2	
Suelo	II	
R	3	Estructura de péndulo invertido
ξ	0.03	Estructura de Acero soldada.

TABLA A.1: CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS DE LA ESTRUCTURA

A.1.1 DIMENSIONES

El Marco consta de 6 niveles y 4 vanos. Las cotas de cada nivel se encuentran representadas en la Tabla A.2 y también en la Figura A.2. Cada vano tiene 6 metros de ancho, las diagonales en V y *Chevron* se intersectan en la mitad del vano.

Nivel	H piso [mm]	Cota [mm]
Niv 6	3735	20950
Niv 5	3035	17215
Niv 4	4120	14180
Niv 3	3599	10060
Niv 2	2225	6461
Niv 1	4236	4236

TABLA A.2: COTAS Y DIMENSIONES DEL MARCO

A.1.2 PERFILES

Los Perfiles usados por la estructura Original están representados en la Figura A.2. Estos son “Doble T”, salvo las diagonales “XL”. Las columnas están orientadas según su eje débil en la dirección del marco, y las vigas según su eje fuerte. La Tabla A.3 muestra el detalle de los perfiles, y sus propiedades.

Las vigas se encuentran rotuladas en sus conexiones a las columnas, de manera que la responsabilidad sísmica recaerá únicamente en las diagonales. El marco no trabaja sísmicamente.

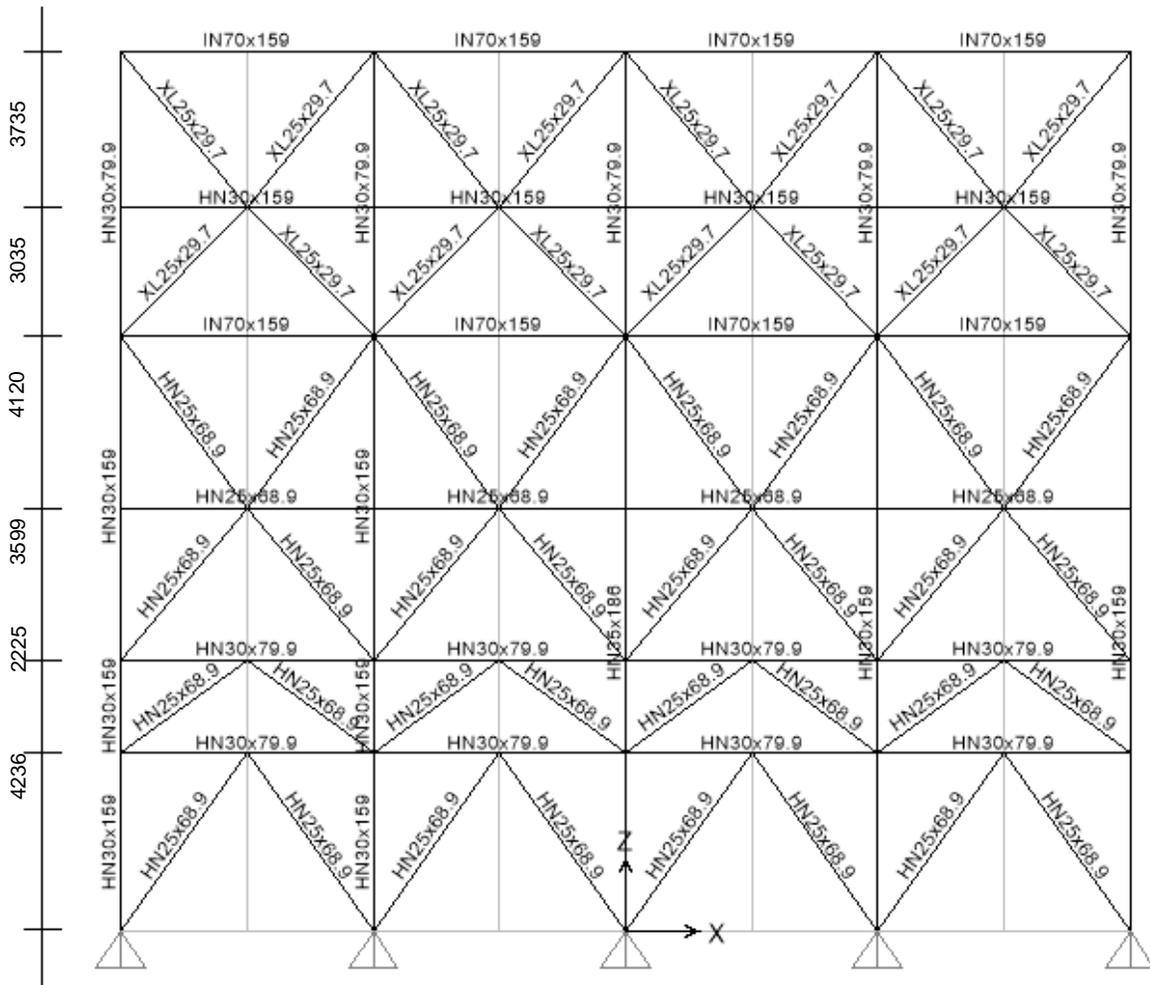


FIGURA A.2: PERFILES Y DIMENSIONES GENERALES. COTAS EN MM.

SectionName	Material	t3	t2	tf	tw	t2b	tfb	Area	TorsConst	I33	I22
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm2	cm4	cm4	cm4
HN25x68.9	A270ES	25	25	1.4	0.8	25	1.4	87.8	47.8	10488	3647
HN30x159	A270ES	30	30	2.8	1.4	30	2.8	202.2	434.7	32878	12606
HN30x79.9	A270ES	30	30	1.2	0.8	30	1.2	94.1	38.3	16340	5401
HN35x186	A270ES	35	35	2.8	1.4	35	2.8	237.2	512.5	53898	20015
IN70x159	A270ES	70	30	2.5	0.8	30	2.5	202.0	307.1	189246	11253
XL25x29.7	A270ES							38.7	8.4	1046	1046

TABLA A.3: CARACTERÍSTICAS DE PERFILES DE LA ESTRUCTURA. “HN” E “IN” SON DOBLE T SIMÉTRICAS. “T3” ALTURA TOTAL DEL PERFIL, “T2” Y “T2B”, ANCHO DE LAS ALAS DEL PERFIL (IGUALES), “TF”, Y “TFB” EL ESPESOR DE LAS MISMAS. “TW” EL ESPESOR DEL ALMA DEL PERFIL. XL ES UNA DIAGONAL DOBLE L.

A.1.3 CARGAS EN LA ESTRUCTURA

PP: Peso Propio

Las cargas de peso propio corresponden a la de los perfiles de la estructura.

CM: Carga Muerta

Las cargas muertas corresponden a las cargas del sistema de correa de transporte ubicados en el nivel 2 y 3 de la estructura. Se modelan como carga lineal sobre las vigas de dichos niveles. Los valores se encuentran en la Tabla A.4.

SC: Sobrecargas de Uso

Las sobrecargas de uso corresponden al peso del material de almacenamiento minero cuando los silos están llenos en un 100%. Los valores fueron tomados de la tesis de Rodrigo Retamales Saavedra [22] y modelados como cargas puntuales en los apoyos de dichos silos sobre el marco, es decir, en las conexiones viga-columnas de los niveles 4 y 6, considerando que las conexiones de las columnas internas se les tributa el doble de carga que aquellas ubicadas en las columnas externas. Los valores de la carga total por nivel se muestran en la Tabla A.4.

	CM [ton]	SC [ton]
Nivel 6		294
Nivel 5		
Nivel 4		520
Nivel 3		
Nivel 2	16.8	
Nivel 1	31.2	

TABLA A.4: CARGAS GRAVITACIONALES EN MARCO POR NIVEL

A.1.4 PESO SÍSMICO

El peso sísmico (P_{sis}) se obtiene mediante la totalidad de las cargas permanentes (PP y CM), más el 80% de la carga eventual (SC), (ACI 313-97) [23]:

$$P_{sis} = PP + CM + 0.8 SC \quad (1)$$

El peso sísmico por nivel se detalla en la Tabla A.5: Pesos sísmico por nivel. PP: Peso propio aproximado estructura. Cm carga muerta y SC sobrecarga de uso., y totaliza $P_{sis} = 1438 \text{ ton}$. Notar que tanto “CM” como “SC” de la Tabla A.5, contabilizan el doble del valor al expuesto en la Tabla A.4. Esto se debe a que sobre el marco a analizar tributa sísmicamente el doble de área que en el caso estático debido a la estaticidad de los marcos intermedios. El Peso Propio corresponde al de la estructura original.

	PP [ton]	CM [ton]	0.8 SC [ton]	Peso sísmico
Nivel 6	5.2		470.4	475.6
Nivel 5	6.1			6.1
Nivel 4	8.0		832	840

Nivel 3	7.5			7.5
Nivel 2	6.4	33.6		40
Nivel 1	6.8	62.4		69.2

TABLA A.5: PESOS SISMICO POR NIVEL. PP: PESO PROPIO APROXIMADO ESTRUCTURA. CM CARGA MUERTA Y SC SOBRECARGA DE USO.

A.1.5 CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS DE LA ESTRUCTURA ORIGINAL

Se aplica análisis espectral considerando la norma NCh2369 a la estructura Original, se muestra Periodo Principal, Corte basal, y coeficiente de corte basal en la Tabla A.6

T principal [s]	0.54
Q basal [Ton]	250
Q basal / P_{sis}	~0.17

TABLA A.6: CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS ESTRUCTURA ORIGINAL

A.2 REDISEÑO CON BRB

La estructura será reestructurada reemplazando las diagonales pandeables, por Diagonales con Pandeo Restringido (BRB), de manera de tener un Marco arriostrado con Diagonales con Pandeo restringido (BRBF).

Se verificarán diagonales, vigas y columnas de la estructura. Las primeras serán dimensionadas de manera de distribuir la plasticidad en el marco, mientras que vigas y columnas serán chequeadas para resistir las acciones sísmicas de la estructura bajo las nuevas condiciones que impone el BRBF. Eventualmente, será necesario cambiarlas si resultan ser insuficientes.

Las conexiones internas del marco, y las conexiones entre este y las diagonales, así como las fundaciones de la estructura, quedarán fuera del alcance de este trabajo debido a que éstas no modifican significativamente el comportamiento dinámico de la estructura.

A.2.1 COMBINACIONES DE DISEÑO PARA REVISIÓN DE MARCO

Se hará la combinación de diseño según LRFD, las combinaciones de carga se obtendrán de la norma NCh3171:

- 1.4 D
- 1.2 D + 1.6 L
- 1.2 D + 1.4 E + L
- 0.9 D + 1.4 E

Siendo *D*, *L* las cargas permanentes (PP y CM) y las vivas (SC), respectivamente. Estas, que constituyen las cargas estáticas, deben ser resistidas sin considerar la contribución de las diagonales. *E*, son los esfuerzos provenientes del sismo. El sismo debe ser consistente con las indicaciones de la Norma NCh2369, es decir, se diseña con el espectro reducido ($R = 3$) y luego se verifica con sismos consistes con el suelo y la zona elegidas.

A.2.2 CONSIDERACIONES ESPECIALES

Las consideraciones especiales están descritas en el punto 2.1, basadas en la norma AISC 341 -10.

A.2.3 PERFILES ESTRUCTURA REDISEÑADA

La estructura rediseñada conserva las vigas y columnas de la estructura original. Las diagonales son Reemplazadas por BRB's. La Tabla A.7 muestra el área del núcleo de las nuevas diagonales, A_{sc} , en cada nivel. Se establece un único tipo de BRB por piso. La Figura A.3 muestra esquemáticamente esta nueva disposición.

Nivel	Sección	Asc [cm ²]	Py [ton]	Longitud [m]
6	BRB10	6.45	16.3	4.79
5	BRB10	6.45	16.3	4.27
4	BRB125	8.06	20.4	5.10
3	BRB10	6.45	16.3	4.69
2	BRB10	6.45	16.3	3.74
1	BRB125	8.06	20.4	5.19

TABLA A.7: PROPIEDADES DE LOS BRB: AREA DEL NUCLEO (ASC), FUERZA DE FLUENCIA NOMINAL (PY), LONGITUD DEL BRB, Y RIGIDEZ EQUIVALENTE EN EL RANGO LINEAL (K_{BRB})

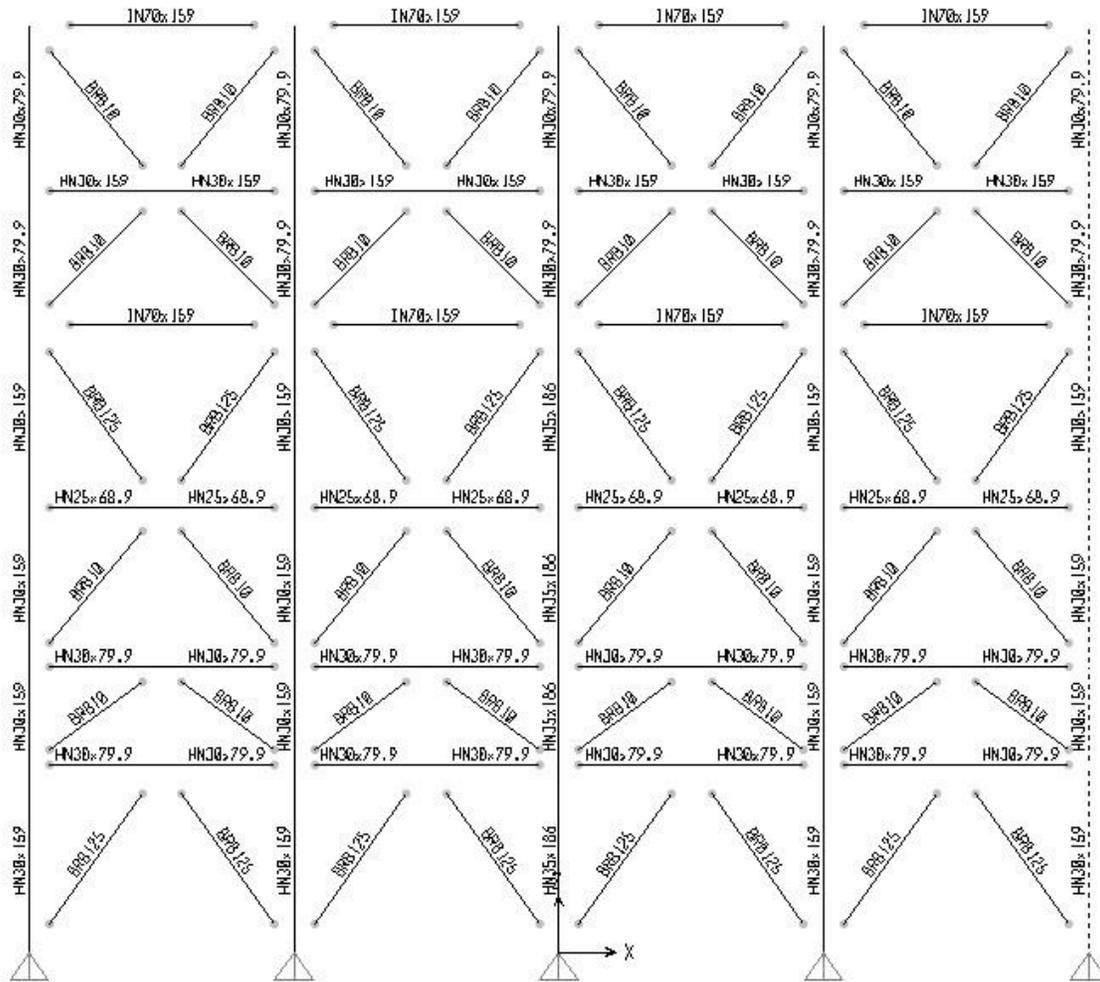


FIGURA A.3: ESTRUCTURA REDISEÑADA.

A.2.4 MODELO DE LA ESTRUCTURA

El modelo de la estructura se hace con la ayuda del programa *Opensees*. Las Vigas y Columnas se modelan con elementos *elasticBeamColumn*, esto es, elementos barras que trabajan en flexión y esfuerzo axial, y ley constitutiva lineal y elástica. Las diagonales son ingresadas como elementos tipo *Truss*, esto es elementos trabajan solo en esfuerzo axial. Se modelaron con una ley constitutiva tipo Bouc-Wen (punto 3.1.2 Tesis), para imitar una ley bilineal.

La rigidez inicial K_{ini} se toma de la rigidez de la barra modificada, es decir, la rigidez de una barra prismática de área igual a el área del núcleo, A_{sc} , ponderada por el factor C_m :

$$K_{ini} = \frac{C_m A_{sc} E_s}{L} \quad (2)$$

Siendo E_s el módulo de elasticidad del acero (200.000 MPa) y L la longitud del elemento medido de punto a punto de trabajo. El factor C_m por su parte, recoge el aumento de rigidez en el elemento debido a su forma no prismática. Su valor es la diferencia entre la rigidez del elemento con uno prismático de área igual al área del núcleo, A_{sc} . Se estimó como $C_m = 1.8$, el cual es el promedio de valores reales de este parámetro en BRB fabricados. Estos valores se muestran en la Tabla A.8, y fueron obtenidos por el alumno en comunicación personal con diseñadores de elementos.

Tipo	Cm												
BRB30.6	1.55	BRB20.9	1.86	BRB9.6	1.97	BRB14.5	1.74	BRB30.6	1.58	BRB17.7	1.91	BRB20.9	1.84
BRB20.9	1.81	BRB20.9	1.66	BRB9.6	1.97	BRB30.6	1.49	BRB20.9	1.84	BRB17.7	1.91	BRB20.9	1.9
BRB20.9	1.86	BRB20.9	1.63	BRB14.5	1.93	BRB17.7	1.79	BRB17.7	1.91	BRB17.7	1.91	BRB9.6	2.02
BRB20.9	1.86	BRB20.9	1.68	BRB14.5	1.7	BRB14.5	1.76	BRB17.7	1.91	BRB17.7	1.71	BRB9.6	2.77
BRB17.7	1.87	BRB14.5	1.67	BRB14.5	1.68	BRB14.5	1.69	BRB17.7	1.91	BRB14.5	1.72	BRB9.6	2.28
BRB17.7	1.87	BRB14.5	1.67	BRB14.5	1.74	BRB14.5	1.81	BRB17.7	1.91	BRB14.5	1.79	BRB14.5	1.92
BRB17.7	1.87	BRB30.6	1.49	BRB14.5	1.67	BRB14.5	1.7	BRB17.7	1.91	BRB30.6	1.58	BRB17.7	1.84
BRB20.9	1.86	BRB20.9	1.78	BRB14.5	1.67	BRB14.5	1.69	BRB17.7	1.91	BRB20.9	1.84	BRB20.9	1.7
BRB20.9	1.66	BRB17.7	1.71	BRB30.6	1.55	BRB30.6	1.6	BRB17.7	1.71	BRB20.9	1.9	BRB20.9	1.67
BRB20.9	1.63	BRB17.7	1.65	BRB17.7	1.82	BRB17.7	1.85	BRB14.5	1.72	BRB9.6	2.02	BRB20.9	1.73
BRB20.9	1.68	BRB17.7	1.77	BRB17.7	1.87	BRB14.5	1.97	BRB14.5	1.79	BRB9.6	2.77	BRB14.5	1.72
BRB30.6	1.55	BRB17.7	1.66	BRB14.5	1.93	BRB14.5	1.97	BRB14.5	1.72	BRB9.6	2.28	BRB14.5	1.72
BRB20.9	1.81	BRB17.7	1.66	BRB14.5	1.93	BRB14.5	1.97	BRB14.5	1.72	BRB14.5	1.92	BRB30.6	1.58
BRB20.9	1.86	BRB30.6	1.55	BRB9.6	1.97	BRB9.6	2.02	BRB30.6	1.58	BRB17.7	1.84	BRB20.9	1.84
BRB20.9	1.86	BRB17.7	1.82	BRB9.6	1.97	BRB9.6	2.02	BRB20.9	1.84	BRB20.9	1.7	BRB30.6	1.84
BRB17.7	1.87	BRB17.7	1.87	BRB14.5	1.93	BRB9.6	2.02	BRB17.7	1.91	BRB20.9	1.67	BRB9.6	1.86
BRB17.7	1.87	BRB14.5	1.93	BRB14.5	1.7	BRB9.6	1.82	BRB17.7	1.91	BRB20.9	1.73	BRB9.6	2.58
BRB17.7	1.87	BRB14.5	1.93	BRB14.5	1.68	BRB9.6	1.78	BRB17.7	1.91	BRB30.6	1.58	BRB9.6	1.98
BRB9.6	1.98	BRB9.6	2.58	BRB9.6	1.86	BRB30.6	1.84	BRB20.9	1.84	BRB30.6	1.58	BRB14.5	1.76

TABLA A.8: VALORES CM DE MULTIPLES TIPOS DE BRB. SU PROMEDIO ES 1.8

La rigidez después de la fluencia, K_y se establece simulando el comportamiento del BRB desde la primera fluencia (F_{y0}) hasta que esta llegue a su máximo valor por el endurecimiento isotrópico (F^R). Usando la expresión [21]:

$$K_y = \frac{F^R - F_{y0}}{\Delta l_{y0}(\mu_k^R - 1)} \quad (3)$$

Siguiendo la referencia [25], se consideran los valores , $F^R \approx 1.364F_{y0}$, y $\mu_k = 15$. Con dichos valores, y considerando que Δl_{y0} es la longitud del elemento en el momento de la fluencia, se establece que:

$$K_y = 0.026 K_{ini} \quad (4)$$

Con ello, el valor de K_{post} , definido como la razón entre K_y y K_{ini} , y que es usado frecuentemente en el trabajo, queda definido como $K_{post} = 0.026$.

Cabe destacar que el valor de K_y es mayor al valor que se mide en test, que se aproxima a $0.01 K_{ini}$. Pero en este modelo no hay aumento de la fluencia a medida que se entra en el rango no lineal (endurecimiento isotrópico), fenómeno observable en test de BRB.

La Tabla A.9: Modelo bilineal de brb, por piso. recoge las propiedades de los elementos bilineales, por nivel.

Nivel	Seccion	Py [ton]	K _{INI} [ton/m]	K _{Post}	K _Y [ton/m]
6	BRB10	16.3	4848	0.026	126
5	BRB10	16.3	5443	0.026	142
4	BRB125	20.4	5695	0.026	148
3	BRB10	16.3	7436	0.026	193
2	BRB10	16.3	9327	0.026	243
1	BRB125	20.4	5592	0.026	145

TABLA A.9: MODELO BILINEAL DE BRB, POR PISO.

En términos de modelo *Opensees*, se deben ingresar los parámetros de la ley Bouc Wen, adaptados a un modelo bilineal. La transición debe ajustarse para que sea similar a la bilineal. Se elige $n = 5$, considerado un buen número pues mayores valores, si bien hacen a la histéresis más bilineal, demoran e incluso inestabilizan la solución numérica.

Para ingresar el Amortiguamiento, $[C]$, se ocupan los coeficientes de Rayleigh, α_M y β_K (3) [9], proporcionales a las matrices de Masa $[M]$ y Rigidez Inicial del sistema $[K_{ini}]$. Se ajustan para que los dos primeros modos tengan una razón de amortiguamiento de 3%. Con ello α_M y β_K toman los valores 0.2448 y $2.68 \cdot 10^{-3}$, respectivamente. El resto de los modos toma la razón de amortiguamiento expuesta en la Tabla A.10.

$$[C] = \alpha_M[M] + \beta_K[K_{ini}] \quad (5)$$

	Periodos [s]	Frecuencias [Hz]	Amortiguamiento [%]
Modo 1	1.17	0.86	3.0
Modo 2	0.37	2.73	3.0
Modo 3	0.21	4.66	4.3
Modo 4	0.20	5.09	4.7
Modo 5	0.16	6.09	5.5
Modo 6	0.15	6.76	6.0
Modo 7	0.14	7.01	6.2
Modo 8	0.13	7.51	6.6
Modo 9	0.13	7.55	6.6
Modo 10	0.11	9.49	8.2

Modo 11	0.09	10.83	9.3
---------	------	-------	-----

TABLA A.10: AMORTIGUAMIENTOS RESULTANTES SEGÚN MODELO PROPORCIONAL DE RAYLEIGH

A.2.5 CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS DE LA ESTRUCTURA REDISEÑADA.

Se aplica análisis espectral a la estructura Original, se muestra Periodo Principal, Corte basal obtenido con el espectro reducido de la norma NCh2369, y Coeficiente de Corte Basal ($Q_{\text{basal}}/P_{\text{sis}}$). El peso sísmico difiere ligeramente del obtenido con la estructura original por el cambio de las diagonales.

T principal [s]	1.17
P sísmico [Ton]	1438
Q basal [Ton]	94
Q basal / P_{sis}	0.065
Q min/ P_{sis}	0.075
Q min [Ton]	108

TABLA A.11: CARACTERÍSTICAS SIMICAS ESTRUCTURA REDISEÑADA. EL CORTE BASAL ES SEGÚN ESPECTRO REDUCIDO DE NORMA NCH2369

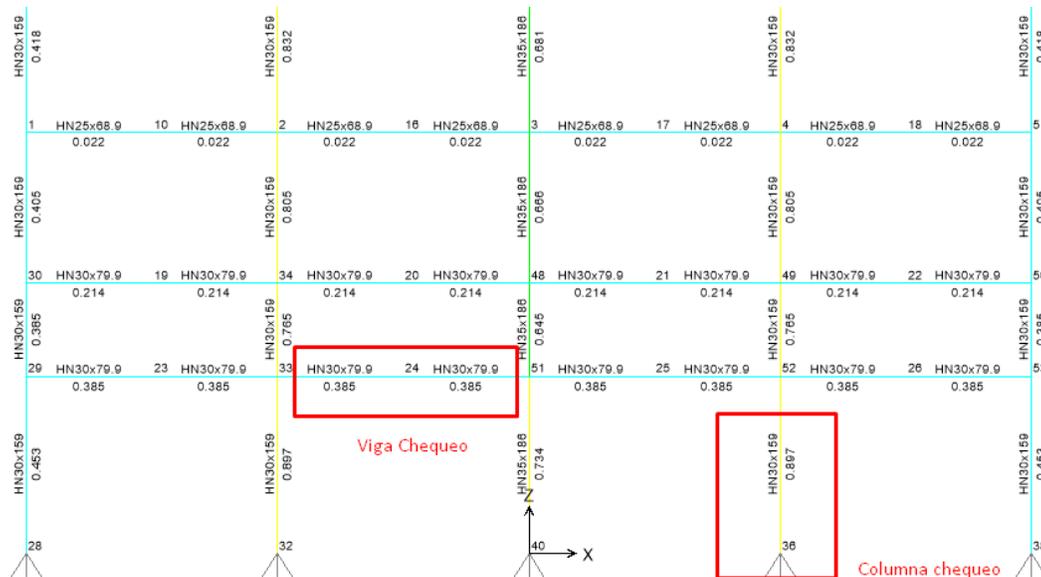
A.2.6 REQUERIMIENTOS DEL BRBF

A.2.6.1 CHEQUEO ESTÁTICO

Chequeo de siguientes combinaciones, con modelo que **no considera diagonales** (norma AISC341-10 no permite considerar BRB como sostenimiento estático):

- 1.4 D
- 1.2 D + 1.6 L

El chequeo se hizo modelando la estructura sin diagonales en SAP e ingresando las cargas CM, y SC, adicionales al peso propio PP. El resultado son factores de utilización menores a 1.



Se agrega el detalle de chequeo de la viga y columna crítica.

CHEQUEO COLUMNA

- $P_u (1.2 D + 1.6 L) = 353 \text{ Ton}$
- $H \text{ columna} = 4.32 \text{ m}$
- $k = 1.0$ (factor modificador de largo de pandeo (rotulado-rotulado))
- ($A = 202.2 \text{ cm}^2$, $r_y = 7.9 \text{ cm}$, Acero A270ES, sección compacta.)
- $\phi P_n = 399 \text{ T}$
- F.U. = 0.88
- No momento ni corte considerado.

CHEQUEO VIGA

- HN 30 x 79.9
- $M_u (1.4 D) = 8.6 \text{ T-m}$ ($q_u = 1.93 \text{ T/m}$, $l = 600 \text{ cm}$)
- $\phi M_n = 25.6 \text{ T-m}$
 - Sección con alma no compacta pero controla caso F2 por pandeo flexo torsional inelástico.
 - $\phi M_p = 28.9 \text{ T-m}$
 - $\phi M_y = 26.5 \text{ T-m}$
 - $L_p = 360 \text{ cm}$, $L_r = 1100 \text{ cm}$
- F.U. = 0.24

A.2.6.2 CHEQUEO DINÁMICO

Se realiza un dimensionamiento con el espectro de la Norma NCh2369, y análisis modal espectral, además de un análisis tiempo historia con cinco terremotos consistentes con el espectro. Con el primer análisis se ve el comportamiento general de la estructura, con el segundo se obtienen las fuerzas máximas sobre columnas y la sollicitación plástica que llega al BRB.

ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL CON ESPECTRO REDUCIDO NORMA NCh2369

El Espectro usado se muestra en la Figura A.5, consistente con las propiedades del suelo y la estructura de la Tabla A.1. La Tabla A.12 por su parte muestra los coeficientes de la estructura relacionado con los parámetros dinámicos.

El marco se modela en SAP2000, siendo éste completamente lineal y elástico, asumiendo que los BRB se comportan de esta manera según sus propiedades iniciales.

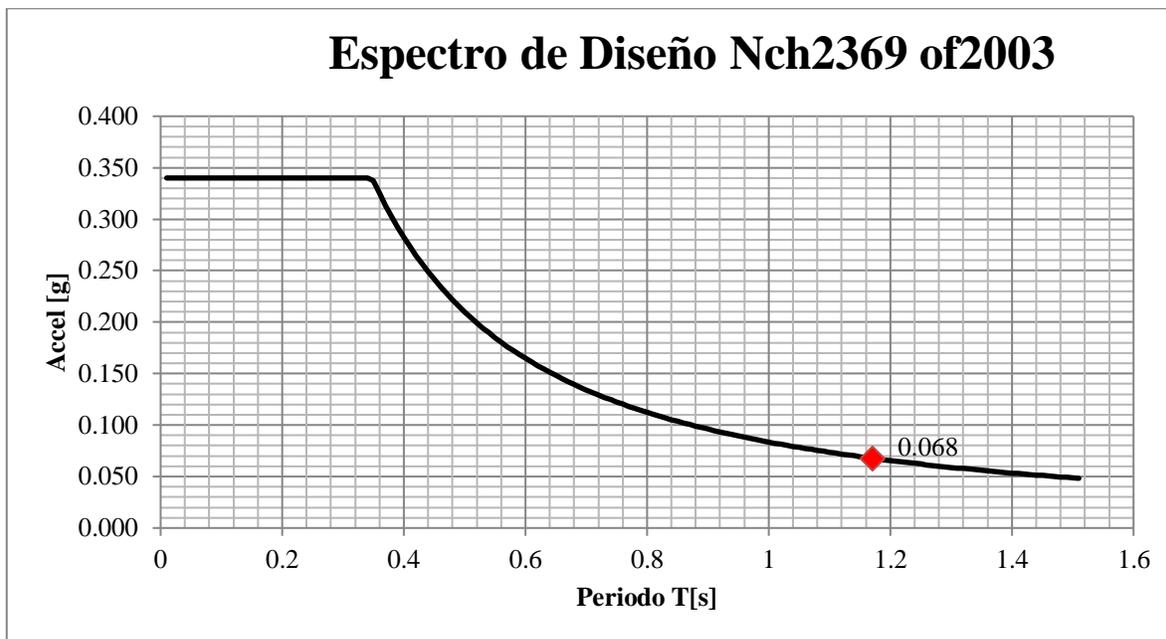


FIGURA A.5: ESPECTRO DE LA NORMA NCH2369, SUELO 2 ZONA B, AMORTIGUAMIENTO DE 3%, FACTOR DE REDUCCIÓN 3. PERIODO FUNDAMENTAL DE LA ESTRUCTURA DESTACADO COMO ROMBO SOBRE CURVA.

	Valor
N	1.33
T' [s]	0.35
I	1
Cmin	0.075
Cmax	0.34
Qmin [ton]	71
Qmax [ton]	323

TABLA A.12: COEFICIENTES PARA EL ANÁLISIS DINAMICO

La Figura A.6 muestra los esfuerzos axiales en la estructura bajo el análisis modal espectral. La Figura A.7 los momentos solicitantes. Como se puede ver las diagonales y las columnas exteriores son las que toman cargas sísmicas a manera de esfuerzo axial. Es por esto que el análisis tiempo historia no lineal se concentra en estas columnas principalmente, y bajo la carga axial. (El factor de utilización por flexión es menor a 2%).

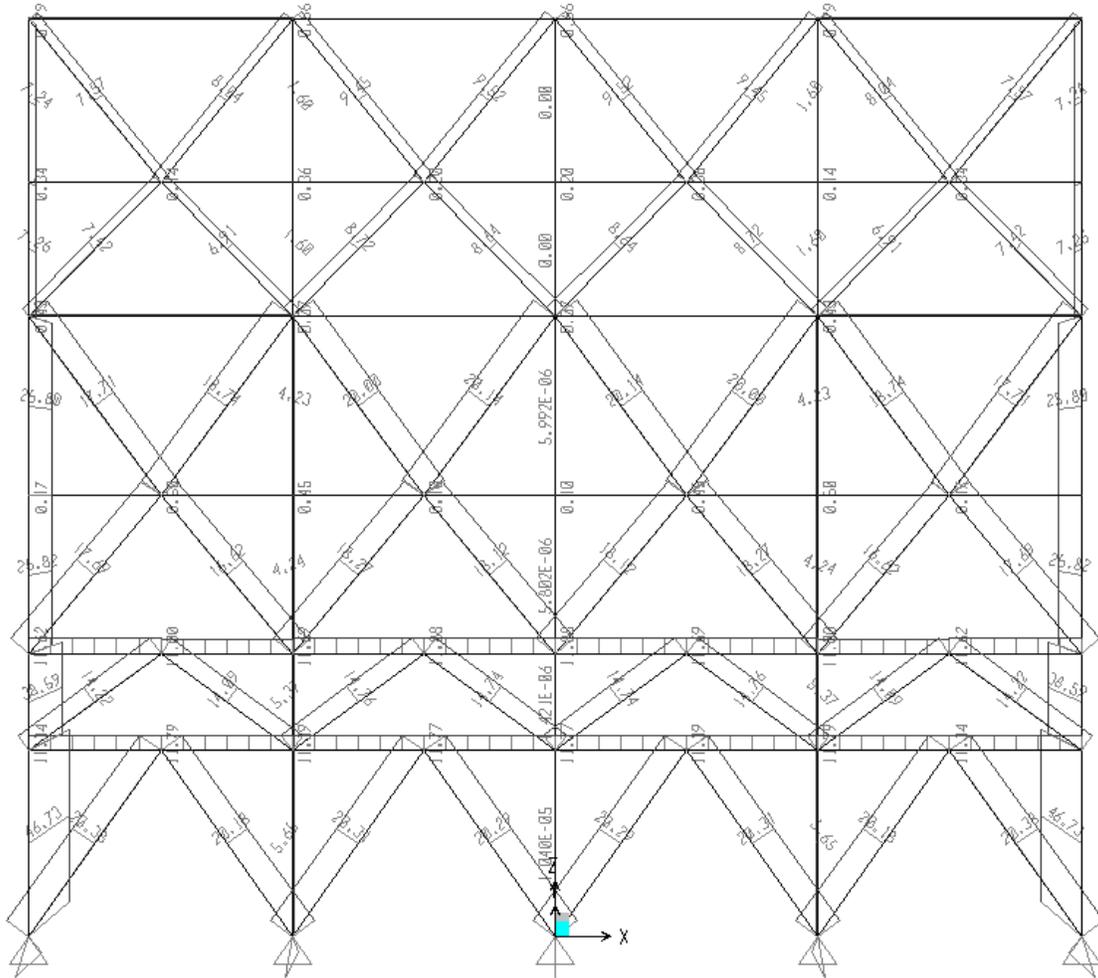


FIGURA A.6: ESFUERZOS EN BRB POR ANALISIS MODAL ESPECTRAL (SIN APLICAR CORTE MÍNIMO). CARGAS EN BRB POR PISO, DE ARRIBA HACIA ABAJO, APROX: 9.5 TON, 8.6 TON, 20.1 TON, 18.1 TON, 14.7 TON; Y 20.3TON. CARGAS AXIAL EN COLUMNAS EXTERIORES, DE ARRIBA HACIA ABAJO: 7.2 TON, 7.2 TON, 25.8 TON, 25.8 TON, 38.6 TON, 46.7 TON.

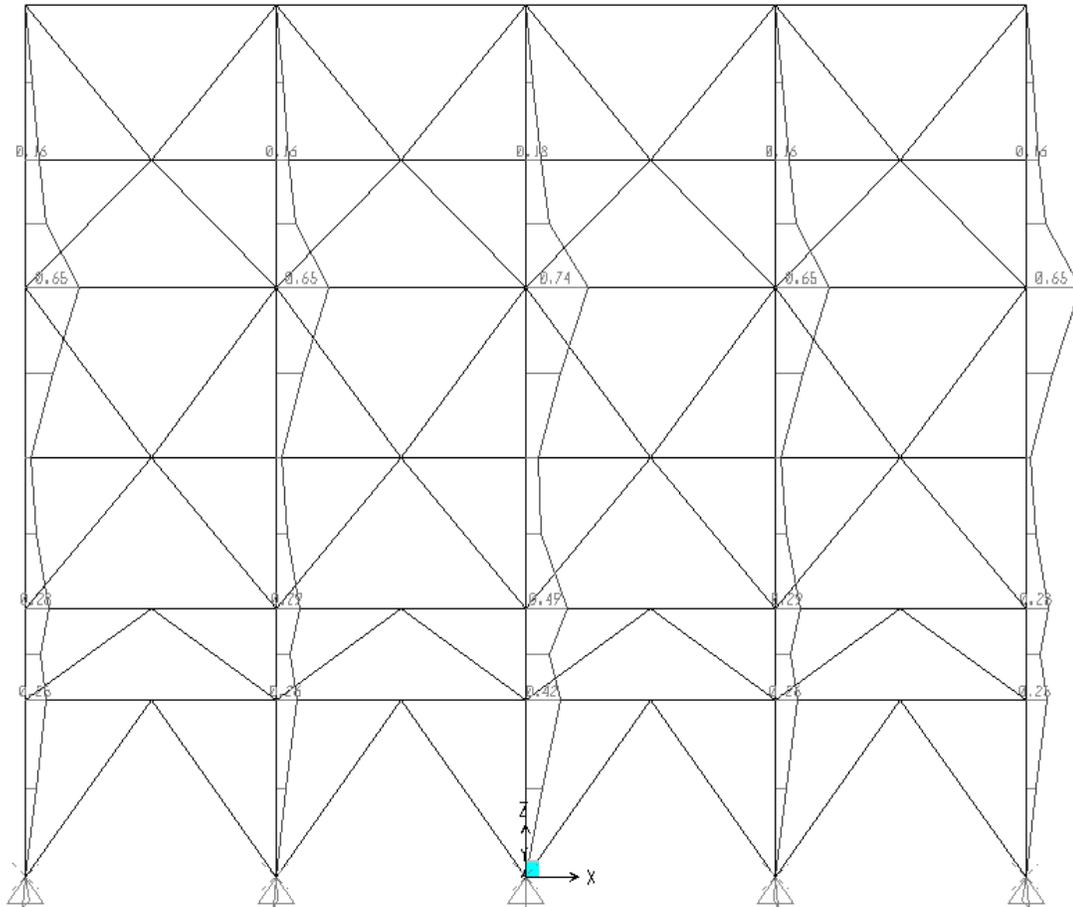


FIGURA A.7: MOMENTOS EN COLUMNAS EN EJE DEL PLANO. MAXIMO MOMENTO 0.65 TON-M EN LA COLUMNAS EXTERIORES.

ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA CON TERREMOTOS.

Se analiza la estructura con el modelo no lineal descrito anteriormente en 0. Los terremotos que se usaron se exponen en la Tabla A.13, junto con su PGA. La Figura A.8 muestra sus espectros, junto con su combinación, la raíz cuadrática media. Además, se adjunta el Espectro Reducido expuesto en la Figura A.5.

Terremoto	PGA [g]
Curicó 2010	0.48
Hualañé 2010	0.38
Mejillones 2007	0.42
Mirador 2010	0.19
Talca 2010	0.47

TABLA A.13: REGISTROS DE TERREMOTOS USADOS PARA ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA Y SU P.G.A.

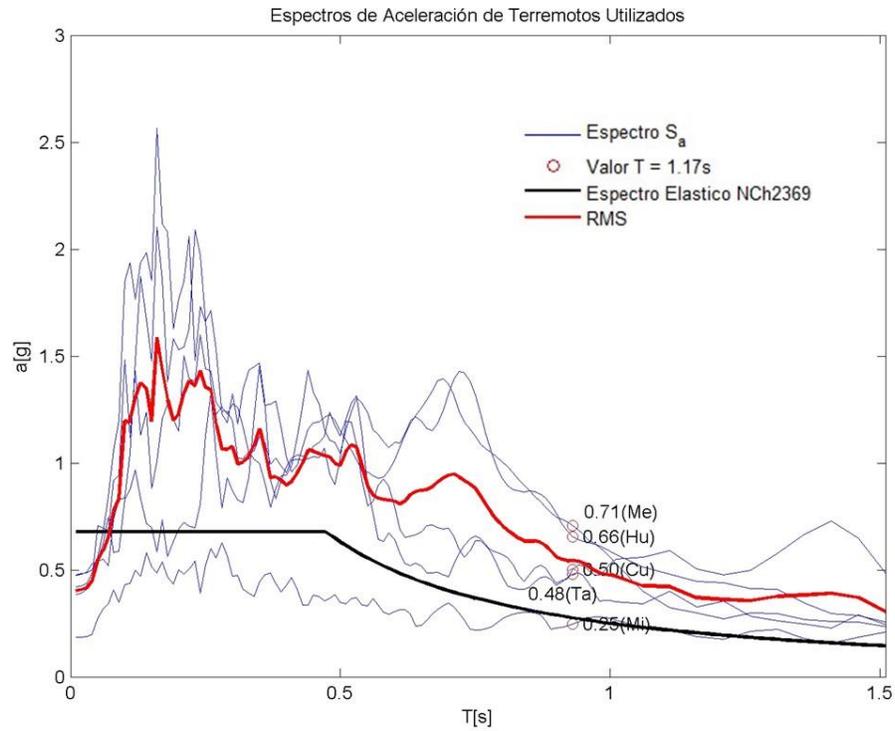


FIGURA A.8: ESPECTRO DE ACELERACIÓN DE TERREMOTOS UTILIZADOS: CURICÓ (CU), HUALAÑE (HU), MEJILLONES (ME), MIRADOR (MI), TALCA (TA); SU MEDIA CUADRÁTICA (RMS); Y EL ESPECTRO ELÁSTICO (R = 1, AMORTIGUAMIENTO 3%, ZONA 2, SUELO B)

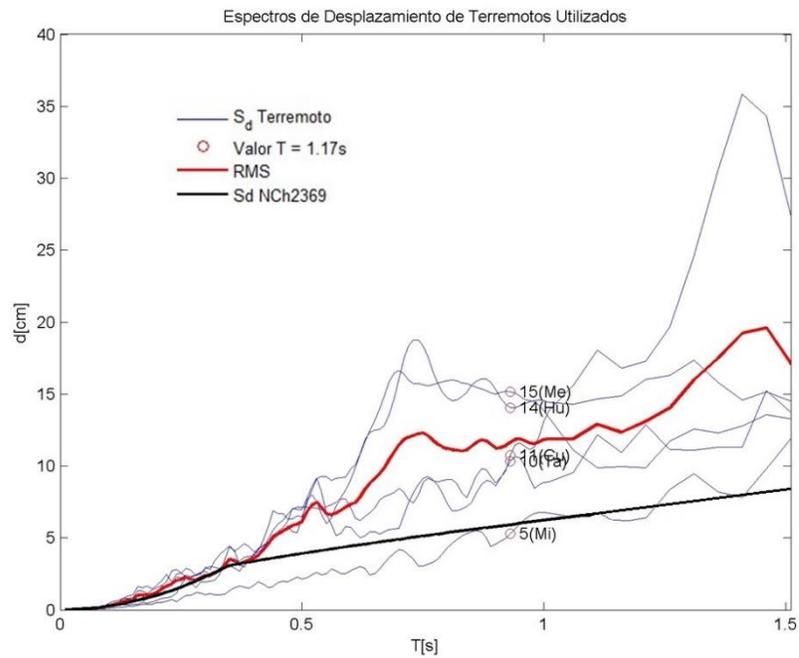


FIGURA A.9: ESPECTRO DE DESPLAZAMIENTO DE TERREMOTOS UTILIZADOS. CURICÓ (CU), HUALAÑE (HU), MEJILLONES (ME), MIRADOR (MI), TALCA (TA); Y SU MEDIA CUADRÁTICA (RMS)

Las Figura A.10 a Figura A.14 muestran las curvas de histéresis obtenidas por el análisis no lineal de respuesta en el tiempo para cada terremoto de análisis. En cada Figura, se muestran 48 curvas de histéresis: 6 filas de ocho curvas cada una, congruente con los 6 niveles de la estructura y sus ocho diagonales por nivel. **Las histéresis mantienen la misma disposición visual de las diagonales de la Figura A.3.** Todas las figuras conservan la misma escala.

De la Tabla A.14 a la Tabla A.23, se muestran los resultados de ductilidad máxima μ_{max} (13) y CPD incurridos en el análisis. Por su parte la Tabla A.24 muestra la deformación máxima entre piso. Tal como se ve, la deformación plástica acumulada no supera el límite de 200, ni la deformación entrepiso supera el $0.015h$ requerido por la norma NCh2369.

$$\mu_{max} = \frac{|u_{max}|}{u_y} \quad (6)$$

Siendo u_{max} la deformación máxima del BRB (en unidades de longitud), y u_y la deformación en la fluencia.

La fuerza en las columnas exteriores del marco está mostrada en la Tabla A.25.

Tiempo historia Curico2010 - Histeresis - Pga = 0.48

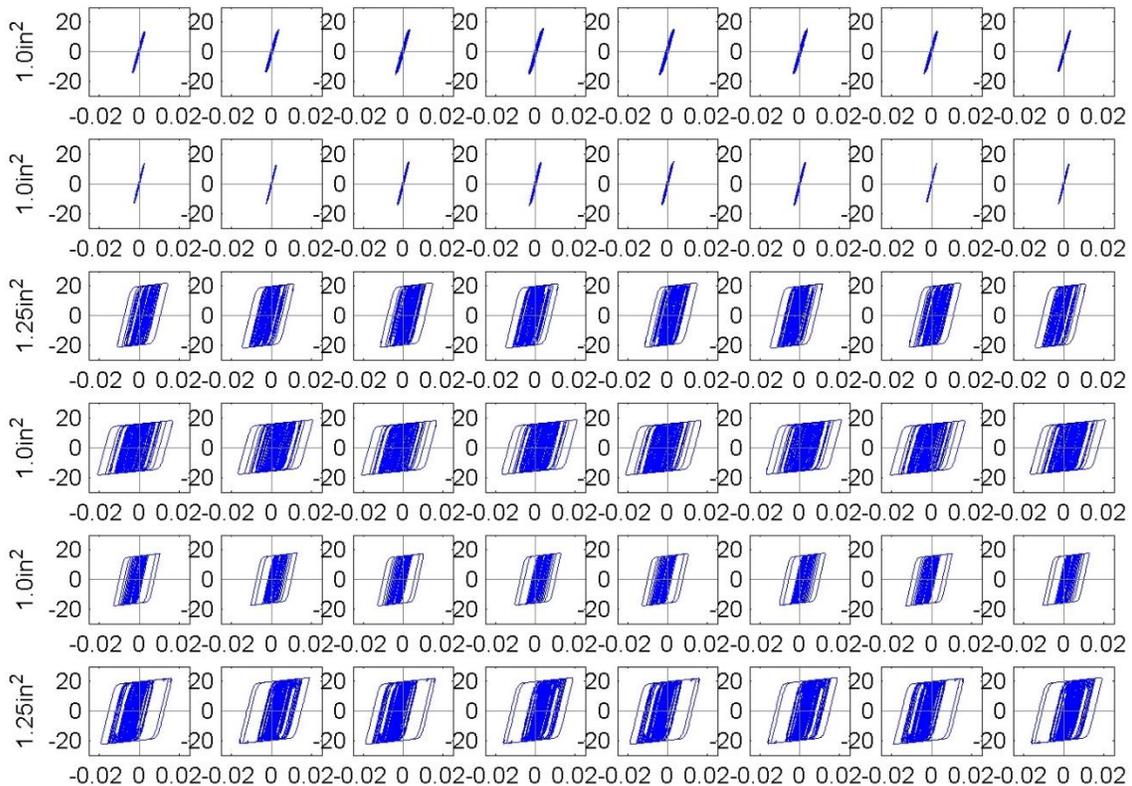


FIGURA A.10: HISTÉRESIS DE RESPUESTA ESTRUCTURAL AL REGISTRO DE CURICÓ. UNIDADES EN TON - M. LA DISPOSICIÓN ES VISUALMENTE LA MISMA QUE SE APRECIA EN LAS DIAGONALES DE LA FIGURA A.4.

Niv 6	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0
Niv 5	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9
Niv 4	4.0	4.1	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.0
Niv 3	6.3	6.3	6.4	6.4	6.4	6.4	6.3	6.3
Niv 2	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
Niv 1	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.3

TABLA A.14: FACTORES DE DUCTILIDAD MAXIMOS ALCANZADOS POR BRB EN RESPUESTA AL REGISTRO DE CURICÓ.

Niv 6	0	0	0	0	0	0	0	0
Niv 5	0	0	1	1	1	1	0	0
Niv 4	52	62	71	74	74	71	62	52
Niv 3	142	134	147	147	147	147	134	142
Niv 2	33	32	34	35	35	34	32	33
Niv 1	113	105	109	109	109	109	105	113

TABLA A.15: CPD DE LOS BRB, EN RESPUESTA AL REGISTRO DE CURICÓ.

Tiempo historia Hualañe2010 - Histeresis - Pga = 0.38

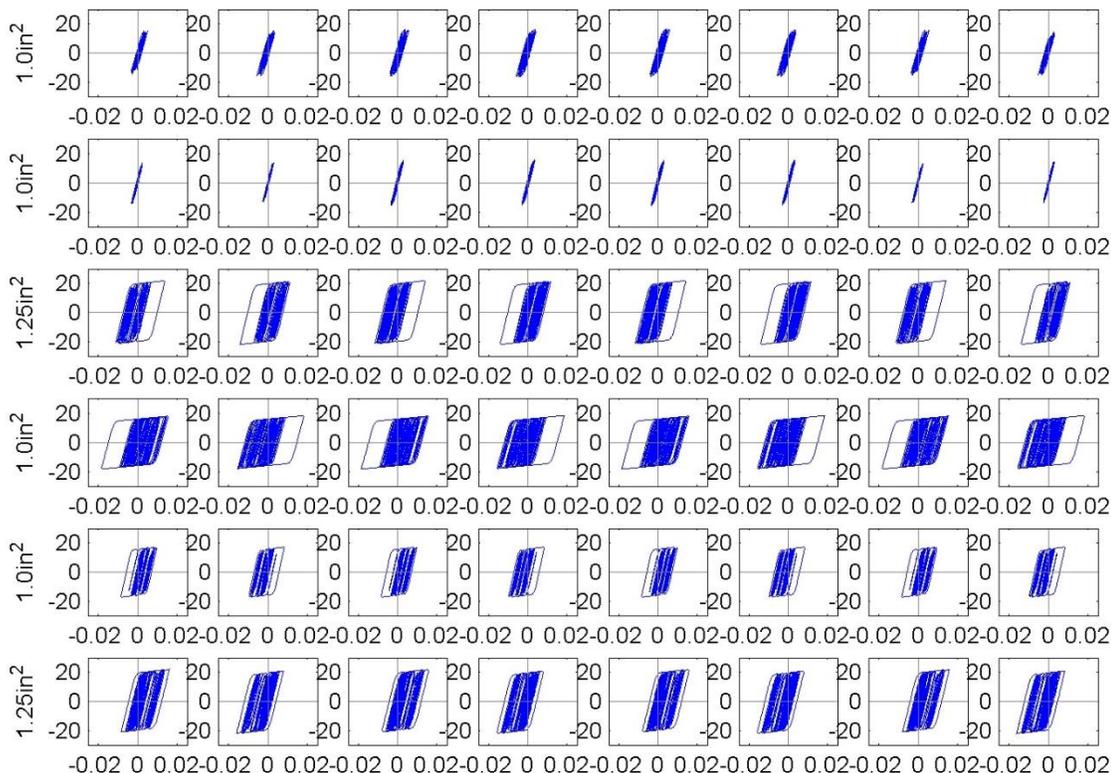


FIGURA A.11: HISTÉRESIS DE RESPUESTA ESTRUCTURA AL REGISTRO DE HUALAÑE. UNIDADES EN TON - M. LA DISPOSICIÓN ES VISUALMENTE LA MISMA QUE SE APRECIA EN LAS DIAGONALES DE LA FIGURA A.4.

Niv 6	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Niv 5	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0
Niv 4	3.8	3.9	3.9	4.0	4.0	3.9	3.9	3.8
Niv 3	5.6	5.5	5.6	5.6	5.6	5.6	5.5	5.6
Niv 2	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
Niv 1	4.4	4.3	4.4	4.3	4.3	4.4	4.3	4.4

TABLA A.16: FACTORES DE DUCTILIDAD MAXIMOS ALCANZADOS POR BRB EN RESPUESTA AL REGISTRO DE HUALAÑE.

Niv 6	0	0	1	1	1	1	0	0
Niv 5	0	0	1	1	1	1	0	0
Niv 4	26	29	36	38	38	36	29	26
Niv 3	72	64	74	74	74	74	64	72
Niv 2	10	10	10	11	11	10	10	10
Niv 1	34	30	33	32	32	33	30	34

TABLA A.17: CPD DE LOS BRB, EN RESPUESTA AL REGISTRO DE HUALAÑE.

Tiempo historia Mejillones2007 - Histeresis - Pga = 0.42

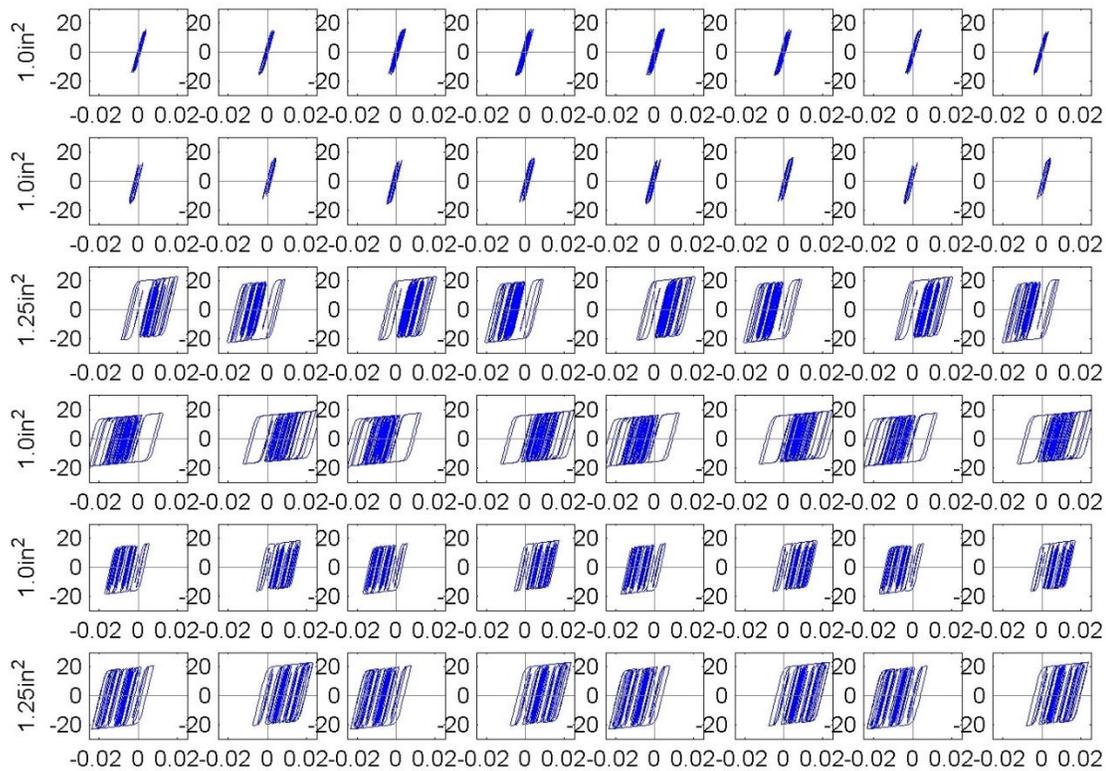


FIGURA A.12: HISTÉRESIS DE RESPUESTA ESTRUCTURAL AL REGISTRO DE MEJILLONES. UNIDADES EN TON - M. LA DISPOSICIÓN ES VISUALMENTE LA MISMA QUE SE APRECIA EN LAS DIAGONALES DE LA FIGURA A.4.

Niv 6	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2
Niv 5	1.5	1.4	1.6	1.6	1.6	1.6	1.4	1.5
Niv 4	5.6	5.7	5.8	5.8	5.8	5.8	5.7	5.6

Niv 3	8.3	8.3	8.4	8.4	8.4	8.4	8.3	8.3
Niv 2	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Niv 1	6.5	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.5

TABLA A.18: FACTORES DE DUCTILIDAD MAXIMOS ALCANZADOS POR BRB EN RESPUESTA AL REGISTRO DE MEJILLONES.

Niv 6	0	0	1	1	1	1	0	0
Niv 5	1	1	1	2	2	1	1	1
Niv 4	21	23	28	29	29	28	23	21
Niv 3	59	54	61	61	61	61	54	59
Niv 2	11	11	11	12	12	11	11	11
Niv 1	32	29	31	30	30	31	29	32

TABLA A.19: CPD DE LOS BRB, EN RESPUESTA AL REGISTRO DE MEJILLONES.

Tiempo historia Mirador2010 - Histeresis - Pga = 0.19

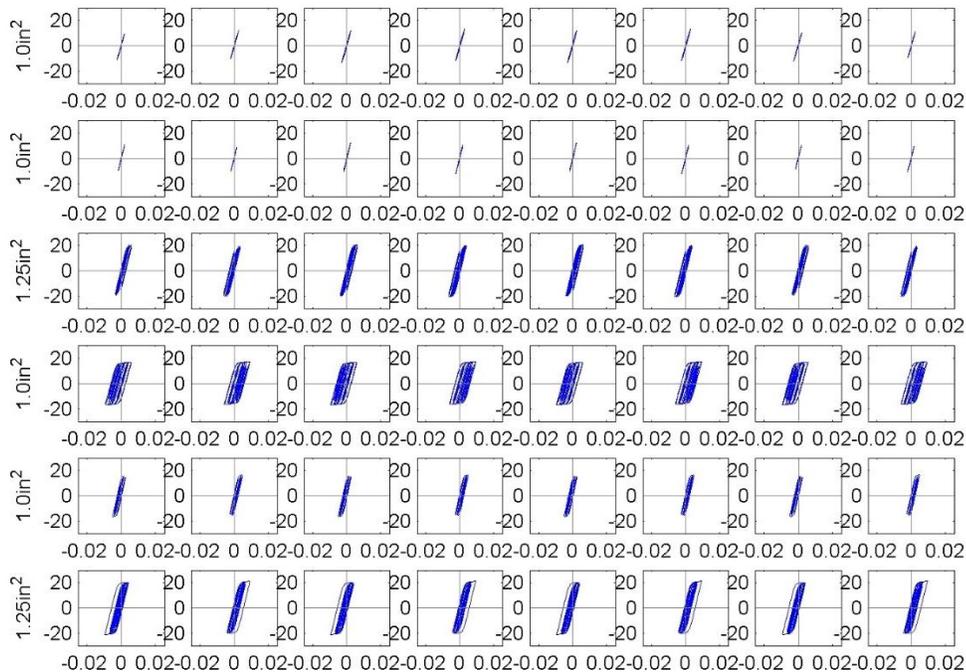


FIGURA A.13: HISTÉRESIS DE RESPUESTA ESTRUCTURAL AL REGISTRO DE METRO ESTACIÓN MIRADOR. UNIDADES EN TON - M. LA DISPOSICIÓN ES VISUALMENTE LA MISMA QUE SE APRECIA EN LAS DIAGONALES DE LA FIGURA A.4.

Niv 6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7
Niv 5	0.7	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.7
Niv 4	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6
Niv 3	2.8	2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8	2.8
Niv 2	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9

Niv 1	2.6	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.6
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

TABLA A.20: FACTORES DE DUCTILIDAD MAXIMOS ALCANZADOS POR BRB EN RESPUESTA AL REGISTRO DE METRO ESTACIÓN MIRADOR.

Niv 6	0	0	0	0	0	0	0	0
Niv 5	0	0	0	0	0	0	0	0
Niv 4	3	3	5	6	6	5	3	3
Niv 3	16	14	16	16	16	16	14	16
Niv 2	1	1	1	1	1	1	1	1
Niv 1	10	9	10	10	10	10	9	10

TABLA A.21: CPD DE LOS BRB, EN RESPUESTA AL REGISTRO DE METRO ESTACIÓN MIRADOR.

Tiempo historia Talca2010 - Histeresis - Pga = 0.47

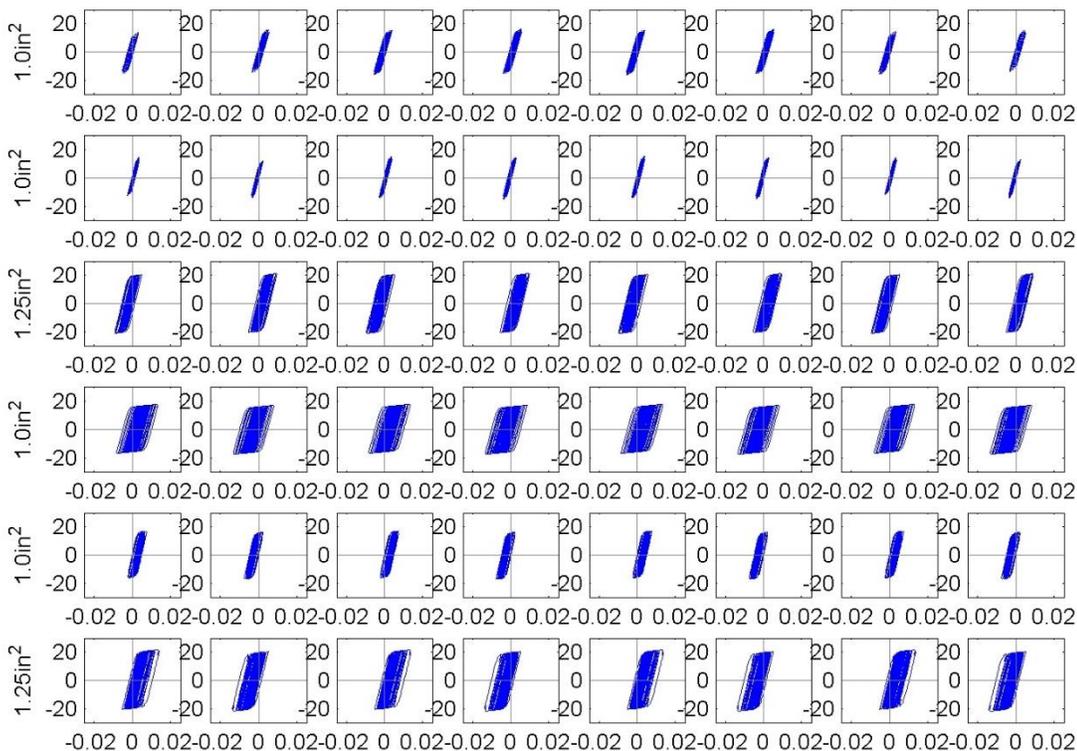


FIGURA A.14: HISTÉRESIS DE RESPUESTA ESTRUCTURAL AL REGISTRO DE TALCA. UNIDADES EN TON - M. LA DISPOSICIÓN ES VISUALMENTE LA MISMA QUE SE APRECIA EN LAS DIAGONALES DE LA FIGURA A.4.

Niv 6	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5
Niv 5	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.3
Niv 4	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6
Niv 3	4.1	4.0	4.1	4.2	4.2	4.1	4.0	4.1

Niv 2	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
Niv 1	3.9	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9

TABLA A.22: FACTORES DE DUCTILIDAD MAXIMOS ALCANZADOS POR BRB EN RESPUESTA AL REGISTRO DE TALCA.

Niv 6	0	0	1	1	1	1	0	0
Niv 5	0	0	1	1	1	1	0	0
Niv 4	25	28	37	39	39	37	28	25
Niv 3	86	77	89	89	89	89	77	86
Niv 2	8	7	8	9	9	8	7	8
Niv 1	61	55	58	58	58	58	55	61

TABLA A.23: CPD DE LOS BRB, EN RESPUESTA AL REGISTRO DE TALCA.

	Δ piso				
	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
Niv 6	0.0017*h	0.0025*h	0.0022*h	0.0013*h	0.0024*h
Niv 5	0.0015*h	0.0017*h	0.0023*h	0.0011*h	0.0019*h
Niv 4	0.0062*h	0.0058*h	0.0086*h	0.0026*h	0.0040*h
Niv 3	0.0091*h	0.0080*h	0.0120*h	0.0041*h	0.0059*h
Niv 2	0.0072*h	0.0055*h	0.0096*h	0.0028*h	0.0043*h
Niv 1	0.0079*h	0.0065*h	0.0096*h	0.0039*h	0.0057*h

TABLA A.24: DEFORMACIÓN MÁXIMA ENTREPISO PARA LOS REGISTROS ANALIZADOS, IDENTIFICADOS POR SUS DOS PRIMERAS LETRAS. "H" REPRESENTA LA ALTURA ENTREPISO POR LO QUE LOS VALORES MOSTRADOS SON ADIMENSIONALES.

	P [ton]				
	Cu	Hu	Me	Mi	Ta
Niv 6	11.3	11.2	11.1	8.9	11.9
Niv 5	11.3	11.2	11.1	8.9	11.9
Niv 4	38.1	37.3	37.2	29.7	38.8
Niv 3	38.1	37.3	37.2	29.7	38.8
Niv 2	51.4	50.5	50.4	42.0	52.2
Niv 1	61.4	60.4	60.1	49.6	61.6

TABLA A.25: FUERZA AXIAL MÁXIMA SÍSMICA (E) EN COLUMNAS EXTERIORES DEL MARCO: VALOR MÁXIMO DEL ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA. UNIDADES EN TON.

La Tabla A.26 muestra los esfuerzos últimos en las columnas exteriores del marco con la combinación "1.2D+1.0L+1.4E". Las cargas muertas (*D*) y vivas (*L*), están sacadas del modelo SAP2000 mencionado en el punto 3.6.1; la carga sísmica (*E*), está sacada de los máximos por nivel de la Tabla A.25. La capacidad reducida de las columnas a compresión por su parte (ϕP_n) está calculada a partir de la norma AISC-360 asumiendo que todas las columnas están rotuladas y arriostradas.

	D [ton]	L [ton]	E [ton]	1.2D+L+1.4E	ϕP_n [ton]	FU _{COMP}
niv6	0.5	36.8	11.9	54.1	199	0.27

niv5	1.2	36.8	11.9	54.9	209	0.26
niv4	1.9	101.8	38.8	158.4	420	0.38
niv3	2.8	101.8	38.8	159.5	436	0.37
niv2	5.7	101.8	52.2	181.7	469	0.39
niv1	10.2	101.8	61.6	200.3	417	0.48

TABLA A.26: ESFUERZOS EN COLUMNAS EXTERIORES DEL MARCO, Y FACTOR DE UTILIZACIÓN

RESISTENCIA AJUSTADA DE DIAGONALES.

La resistencia ajustada de las diagonales, o *Adjusted Brace Strength*, definida en (13), es usada para estimar esfuerzos en elementos del marco y conexiones, y depende de la deformación máxima de las diagonales, ε_{max} (13), pues los factores β , y ω dependen de este parámetros, según las expresiones en (9) y (13).²

$$\phi P_{y_{sc}} = \begin{cases} P_{comp} = \beta \omega R_y P_{y_{sc}} & \text{en compresión} \\ P_{tracc} = \omega R_y P_{y_{sc}} & \text{en tracción} \end{cases} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{max} = \mu \cdot \varepsilon_y = \frac{\mu P_{y_{sc}}}{C_m \cdot E_s} \quad (8)$$

$$\omega(\varepsilon) = 0.2949 \ln(\varepsilon) + 1.19 \quad (9)$$

$$\beta(\varepsilon) = 0.0053\varepsilon^2 + 0.0029\varepsilon + 1.026 \quad (10)$$

Siendo $P_{y_{sc}}$ el esfuerzo axial mínimo de fluencia en en núcleo de acero, R_y la razón entre la fluencia esperada y la nominal del acero, ω el factor de ajuste por endurecimiento, y β el factor de ajuste para el esfuerzo en compresión, y C_m , E_s , definidos en (2).

ε_{max} será considerada en base a la ductilidad $\mu=7.5$, de la Tabla A.18. Esta deformación corresponde a una deformación unitaria máxima $\varepsilon_{max} = 0.60\%$ según (8), que será usada conservadoramente para todas las diagonales. Con ello, se obtienen los valores de los parámetros expuestos en Tabla A.27. La Tabla A.28 muestra la resistencia ajustada de las diagonales por nivel.

ε_{max}	0.53%
B	1.03
Ω	1.00
R_y^3	1.3
ωR_y	1.30
$\beta \omega R_y$	1.34

TABLA A.27: FACTORES DE SOBRERESISTENCIA DE LA DIAGONAL.

² Datos prestados por Rodrigo Retamales Saavedra , de proveedores de BRB.

³ Norma AISC -360

Nivel	Seccion	Py [ton]	P _{comp} [ton]	P _{tracc} [ton]
6	BRB10	16.3	21.2	21.8
5	BRB10	16.3	21.2	21.8
4	BRB125	20.4	26.5	27.3
3	BRB10	16.3	21.2	21.8
2	BRB10	16.3	21.2	21.8
1	BRB125	20.4	26.5	27.3

TABLA A.28: RESISTENCIA AJUSTADA DE DIAGONALES EN COMPRESIÓN Y TRACCIÓN

VIGAS ANTE FLUENCIA DE DIAGONALES

Las vigas del primer y segundo nivel se analizarán sísmicamente para el caso de la fluencia simultánea de las diagonales en *Chevron*, asumiendo que estas últimas desarrollarán su resistencia ajustada “*adjusted brace strength*”, planteada en (7). Dada esta configuración, la carga puntual de flexión que recibe la viga, P_v , se estima con (11), y el esfuerzo axial, N_v , en compresión y tracción, se estima con (13). P_v en general es una carga baja, pues solo toma el desbalance entre la fluencia en tracción y en compresión. N_v es una mayor, que podría generar eventualmente problemas de pandeo en la viga. Esta se considera apoyada en la dirección normal al plano a media luz, debido a arriostres laterales. M_v es el momento por la carga puntual P_v , con $L = 6m$.

$$P_v = (P_{comp} - P_{tracc}) \cdot \sin \alpha = (\beta - 1) \omega R_y P_{y_{sc}} \cdot \sin \alpha \quad (11)$$

$$N_v = (P_{comp} + P_{tracc}) \frac{1}{2} \cdot \cos \alpha = \frac{1 + \beta}{2} \omega R_y P_{y_{sc}} \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

$$M_v = \frac{P_v L}{4} \quad (13)$$

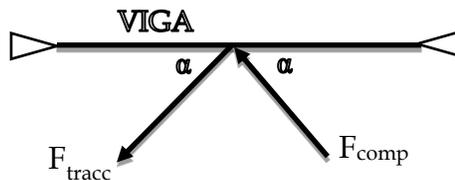


FIGURA A.15: ESFUERZOS SOBRE VIGAS DEL PRIMER Y SEGUNDO NIVEL PROVENIENTES DE LAS DIAGONALES DEL SISMO.

La Tabla A.29 muestra las sollicitaciones del sismo sobre las vigas del primer y segundo nivel.

Nivel	P _{tracc} [ton]	P _{comp} [ton]	α [deg]	P _v [ton]	N _v [ton]	M _v [t-m]
Niv2	21.2	21.8	36.6	0.38	17.3	0.57
Niv1	26.5	27.3	54.7	0.65	15.6	0.97

TABLA A.29: ESFUERZOS ACTUANTES SOBRE VIGAS DE PRIMER Y SEGUNDO NIVEL POR ACCIÓN DE LA DIAGONALES EN FLUENCIA

La viga en cuestión es una viga HN.30x79.9. Su capacidad al momento rodea los 25 ton-m y la capacidad a la compresión las 150 ton, por lo que la viga resiste la acción.

ANEXO B: TABLA DE RESULTADOS BRBF

El objetivo del presente anexo, es mostrar el resultado completo de la identificación de la unidad de varios grados de libertad, dispuesto en tablas. Se presenta primeramente un esquema con la numeración de los nodos, luego los resultados obtenidos con la identificación P.S.D, luego los resultados de SSI-COV, y finalizar con los resultados de MOESP.

B.1. NUMERACIÓN

La Figura B.1 muestra la numeración de los nodos del marco.

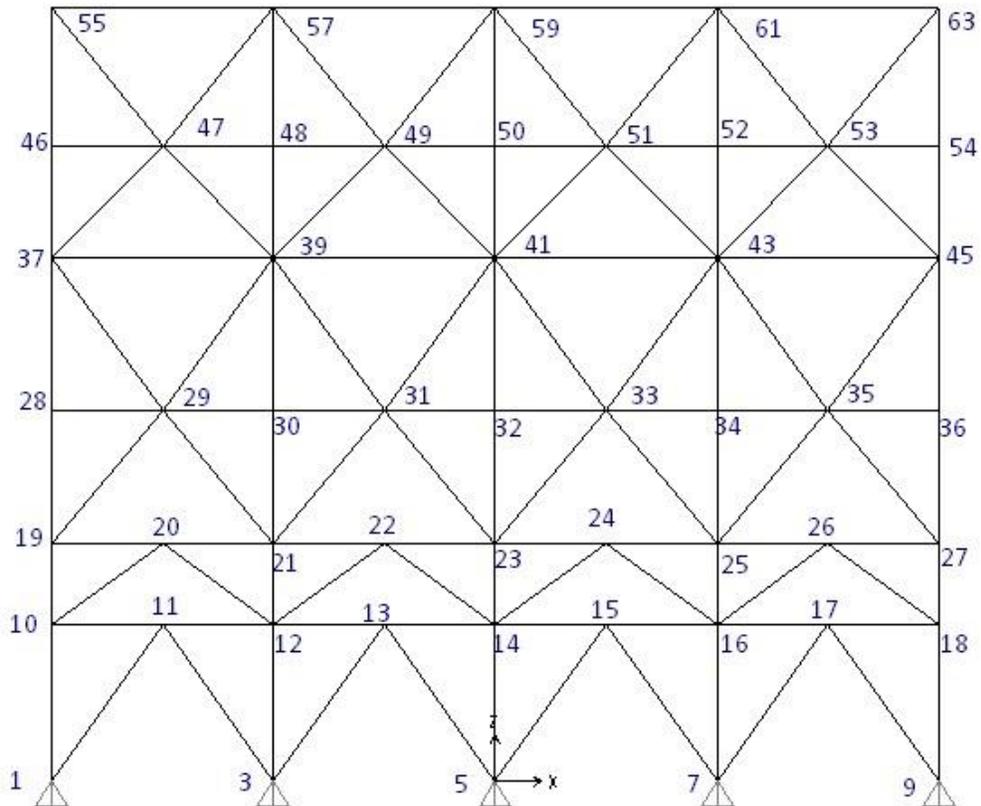


FIGURA B.1: ESQUEMA DEL MARCO A ANALIZAR, CON ETIQUETAS DE LOS NODOS.

B.2. RESULTADOS P.S.D.

Los resultados obtenidos de la identificación P.S.D. se ordenan por casos. El primero que agrupa la identificación del modelo en que los BRB están constituidos con una histéresis bilineal, y el segundo, Caso 2, con la histéresis con una transición suavizada a la fluencia.

En cada tabla se muestran las frecuencias *fid* que están relacionadas a los dos mayores máximos locales del P.S.D, tal como lo muestra la Figura B.2. Junto a cada frecuencia, se muestra el modo asociado a ella, elegido por inspección visual, y su valor normalizado a la frecuencia elástica del mismo.

Se agrupan los resultados de acuerdo a la dirección de los sensores, distinguiendo entre canales con aceleración vertical y horizontal, y ley constitutiva del BRB. Cada tabla, a su vez, agrupa los resultados por grado de libertad, y luego los ordena por incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5 y 8).

Aquellas frecuencias identificadas que no son relacionables a ningún modo, aparecen en las tablas junto a la casilla “modo” en blanco. Aquellas frecuencias que no fueron detectadas automáticamente como máximos locales pero se pueden relacionar a un modo, se disponen en caracteres cursivos en las tablas (ejemplo, los máximos locales asociados al primer modo, destacados en la Figura B.2).

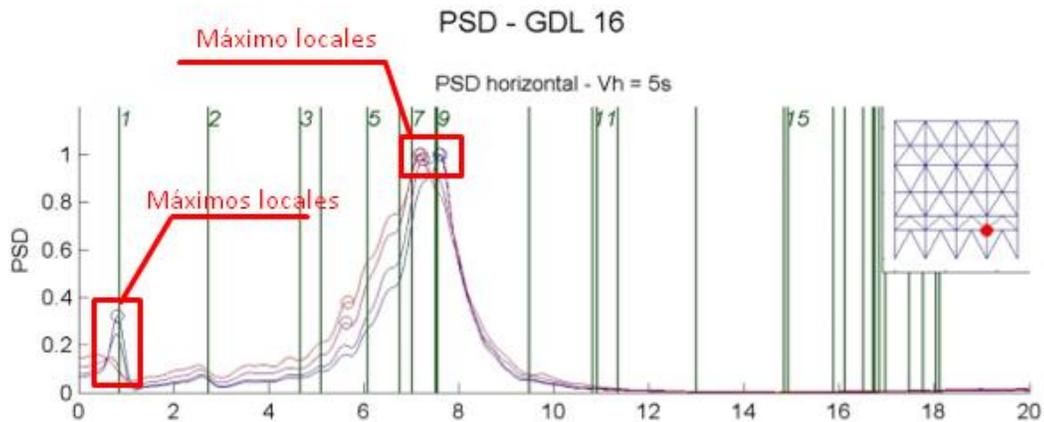


FIGURA B.2: ESQUEMA DE MÁXIMOS LOCALES ELEGIDOS EN PSD Y PRESENTADOS EN TABLAS.

B.2.1 CASO 1 – HISTÉRESIS BILINEAL.

CASO 1: ANÁLISIS BILINEAL, IDENTIFICACIÓN SOBRE SENSORES HORIZONTALES.

Gdl	R	Identificación Horizontal 1			Identificación Horizontal 2		
		Modo	fid [Hz]	fid/fel	Modo	fid [Hz]	fid/fel
16	1	9	7.62	1.01	1	0.82	0.96
	2	9	7.59	1.01	1	0.79	0.92
	5	9	7.16	0.95	1	0.67	0.78
	8	9	7.21	0.96	-	-	-
23	1	9	7.63	1.01	1	0.83	0.97
	2	9	7.61	1.01	1	0.81	0.94
	5	9	7.17	0.95	1	0.7	0.82
	8	9	7.23	0.96	1	0.43	0.50
31	1	1	0.85	0.99	9	7.63	1.01
	2	1	0.83	0.97	9	7.61	1.01
	5	1	0.76	0.89	9	7.19	0.95
	8	1	0.62	0.72	9	7.26	0.96
39	1	1	0.85	0.99	2	2.74	1.00
	2	1	0.84	0.98	2	2.73	1.00
	5	1	0.79	0.92	2	2.73	1.00
	8	1	0.7	0.82	2	2.71	0.99
55	1	1	0.85	0.99	2	2.71	0.99
	2	1	0.85	0.99	2	2.7	0.99
	5	1	0.81	0.94	2	2.68	0.98
	8	1	0.75	0.87	2	2.63	0.96

TABLA B. 1: ANÁLISIS BILINEAL, IDENTIFICACIÓN SOBRE SENSORES HORIZONTALES.

CASO 1: ANÁLISIS BILINEAL, IDENTIFICACIÓN SOBRE SENSORES VERTICALES.

Gdl	R	Identificación Vertical 1			Identificación Vertical 2		
		Modo	fid [Hz]	fid/fel	Modo	fid [Hz]	fid/fel
16	1	3	4.61	0.99		2.46	-
16	2	3	4.61	0.99		2.46	-
16	5	3	4.6	0.99		2.46	-
16	8	3	4.6	0.99		2.46	-
23	1	3	4.63	0.99		2.46	-
23	2	3	4.63	0.99		2.46	-
23	5	3	4.63	0.99		2.46	-
23	8	3	4.62	0.99		2.46	-
31	1	3	4.64	1.00		2.47	-
31	2	3	4.64	1.00		2.48	-
31	5	3	4.64	1.00		2.48	-
31	8	3	4.63	0.99		2.48	-
39	1	3	4.64	1.00	5	6.21	1.02
39	2	3	4.64	1.00	5	6.21	1.02
39	5	3	4.64	1.00	5	6.19	1.02
39	8	3	4.64	1.00	5	6.18	1.01
55	1	3	4.61	0.99	7	7.05	1.01
55	2	3	4.61	0.99	7	7.04	1.00
55	5	3	4.61	0.99	7	7.01	1.00
55	8	3	4.6	0.99	7	6.97	0.99

TABLA B. 2: ANÁLISIS BILINEAL, IDENTIFICACIÓN SOBRE SENSORES VERTICALES.

B.2.2 CASO 2 – HISTÉRESIS CON TRANSICIÓN A LA FLUENCIA SUAVIZADA.

CASO 2: ANÁLISIS BILINEAL, IDENTIFICACIÓN SOBRE SENSORES HORIZONTALES.

Gdl	R	Identificación Horizontal 1			Identificación Horizontal 2		
		Modo	fid [Hz]	fid/fel	Modo	fid [Hz]	fid/fel
16	1	9	7.62	1.01	1	0.82	0.96
16	2	9	7.07	0.94	1	0.65	0.76
16	5	9	6.21	0.82	-	-	-
16	8	9	6.13	0.81	-	-	-
23	1	9	7.63	1.01	1	0.83	0.97
23	2	9	7.09	0.94	1	0.7	0.82
23	5	9	6.25	0.83	1	-	0.00
23	8	9	6.23	0.83	1	-	0.00
31	1	1	0.85	0.99	9	7.63	1.01
31	2	1	0.74	0.86	9	7.09	0.94
31	5	1	0.6	0.70	9	6.3	0.83
31	8	1	--	--	9	6.25	0.83
39	1	1	0.85	0.99	2	2.74	1.00
39	2	1	0.77	0.90	2	2.65	0.97
39	5	1	0.66	0.77	2	2.58	0.95
39	8	1	0.47	0.55	2	2.53	0.93
55	1	1	0.85	0.99	2	2.71	0.99

55	2	1	0.78	0.91	2	2.57	0.94
55	5	1	0.69	0.80	2	2.47	0.91
55	8	1	0.55	0.64	2	-	-

TABLA B. 3: ANÁLISIS BILINEAL, IDENTIFICACIÓN SOBRE SENSORES HORIZONTALES.

CASO 2: ANÁLISIS BILINEAL, IDENTIFICACIÓN SOBRE SENSORES VERTICALES.

Gdl	R	Identificación Vertical 1			Identificación Vertical 2		
		Modo	fid [Hz]	fid/fel	Modo	fid [Hz]	fid/fel
16	1	3	4.61	0.99		2.46	-
16	2	3	4.6	0.99		2.46	-
16	5	3	4.59	0.99		2.46	-
16	8	3	4.58	0.98		2.46	-
23	1	3	4.63	0.99		2.46	-
23	2	3	4.62	0.99		2.46	-
23	5	3	4.61	0.99		2.46	-
23	8	3	4.6	0.99		2.46	-
31	1	3	4.64	1.00		2.47	-
31	2	3	4.63	0.99		2.48	-
31	5	3	4.62	0.99		2.48	-
31	8	3	4.62	0.99		2.48	-
39	1	3	4.64	1.00	5	6.21	1.02
39	2	3	4.63	0.99	5	6.16	1.01
39	5	3	4.63	0.99	5	6.14	1.01
39	8	3	4.62	0.99	5	6.12	1.00
55	1	3	4.61	0.99	7	7.05	1.01
55	2	3	4.6	0.99	7	6.93	0.99
55	5	3	4.59	0.99	7	6.88	0.98
55	8	3	4.58	0.98	7	6.86	0.98

TABLA B. 4: ANÁLISIS BILINEAL, IDENTIFICACIÓN SOBRE SENSORES VERTICALES.

B.3. RESULTADOS SSI-COV

Los resultados de la identificación con SSI-COV se ordenan por casos de ley constitutiva del BRB (Caso 1 y Caso 2), y luego por instrumentaciones, B, C, y D, tal como son descritas en el capítulo “Identificación sobre marcos arriostrados con diagonales de pandeo restringido”.

Se presentan tablas con las frecuencias identificadas y amortiguamientos identificados, cada una de ellas ordenada de manera que en cada columna se presenten los resultados asociados a un modo, y ordenados de acuerdo al avance en la incursión en el rango no-lineal (R = 1,2, 5 y 8). Además, se normalizan estos resultados respecto a la frecuencia elástica de cada modo para visualizar la caída en frecuencia. Los modos que no arrojan resultados tienen casillas vacías en las tablas.

Para las instrumentaciones C y D, se presenta además la comparación entre estos resultados, y los obtenidos con la instrumentación B, realizada con una mayor cantidad de sensores. Esta comparación se realiza con las frecuencias y amortiguamientos identificados.

Para cada caso, e instrumentación, se muestra también la dispersión de las formas modales identificadas, utilizando el parámetro $dispFM$, que obtiene la máxima ortogonalidad entre el conjunto de vectores que agrupan cada forma modal, medidos en términos de MAC.

Finalmente, se insertan cuatro diagramas MAC para evaluar la ortogonalidad de los modos más significativos a medida que incursionan en el rango no lineal. Para ello, se seleccionan los modos n°1, n°2, n°3, y n°9, y se hace MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal. La pérdida de consistencia de la forma modal promedio se ve en cuánto descende el mínimo valor MAC de cada modo, impreso sobre cada diagrama.

B.3.1 CASO 1 – HISTÉRESIS BILINEAL.

B.3.1.1 INSTRUMENTACIÓN B.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS.

Se presentan frecuencias absolutas fid , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo fid/fel .

B		Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
fid [Hz]	R = 1		0.86	2.71	4.65		6.11	6.70	7.03		7.52		10.84
	R = 2		0.85	2.70	4.66		6.10		6.99		7.50		10.73
	R = 5		0.82	2.63	4.65		6.08		6.95		7.42		10.69
	R = 8		0.76	2.60	4.63		6.06				7.38		
fid/fel	R = 1		1.00	0.99	1.00		1.00	0.99	1.00		1.00		1.00
	R = 2		0.99	0.99	1.00		1.00		1.00		0.99		0.99
	R = 5		0.96	0.96	1.00		1.00		0.99		0.98		0.99
	R = 8		0.89	0.95	0.99		0.99				0.98		

TABLA B. 5: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS INSTRUMENTACIÓN B

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS.

Se presentan amortiguamientos absolutos β_{id} , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo β_{id}/β_{el} .

		Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
β_{id} [%]	R = 1		3.34	2.90	4.24		5.43	6.37	6.52		6.69		9.42
	R = 2		4.32	2.94	4.51		5.50		6.38		6.72		9.01
	R = 5		15.8	3.4	4.5		5.7		7.0		8.1		9.4
	R = 8		15.4	5.5	4.7		6.1				10.4		
β_{id}/β_{el}	R = 1		1.12	0.96	0.97		0.99	1.06	1.05		1.01		1.01
	R = 2		1.45	0.98	1.04		1.01		1.03		1.01		0.97
	R = 5		5.29	1.12	1.03		1.04		1.13		1.22		1.01
	R = 8		5.15	1.84	1.07		1.12				1.57		

TABLA B. 6: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS INSTRUMENTACIÓN B

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

		Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
dispFM	R = 1		1.00	0.98	0.98		0.18	0.84	0.47		0.98		0.86

	R = 2	1.00	0.99	0.31	0.25	0.85	0.90	0.66
	R = 5	0.99	0.94	0.66	0.23	0.44	0.91	0.46
	R = 8	1.00	0.92	0.97	0.16		0.92	

TABLA B. 7: DISPERSIÓN IDENTIFICADA INSTRUMENTACIÓN B

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5, y 8).

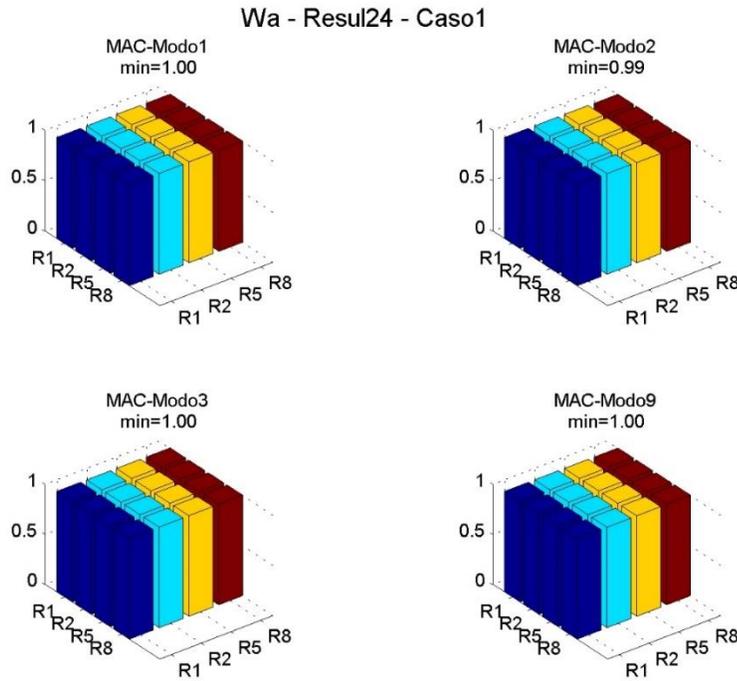


FIGURA B. 1: MAC SSI-COV INSTRUMENTACION B

B.4.1.1 INSTRUMENTACIÓN C.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS.

Se presentan frecuencias absolutas fid , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo fid/fel .

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15	16
fid [Hz]	R = 1	0.87	2.71	4.63		6.11	6.85	6.98		7.50		14.78
	R = 2	0.85	2.69	4.61		6.10	6.83	6.97		7.54		14.74
	R = 5	0.81	2.66	4.61			6.54	6.83			14.23	14.77
	R = 8	0.76	2.63	4.79				6.85				
fid/fel	R = 1	1.01	0.99	1.00		1.00	1.01	1.00		0.99		0.99
	R = 2	0.99	0.98	0.99		1.00	1.01	0.99		1.00		0.99
	R = 5	0.95	0.97	0.99			0.97	0.97			0.96	0.99
	R = 8	0.88	0.96	1.03				0.98				

TABLA B. 8: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS INSTRUMENTACIÓN C

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS.

Se presentan amortiguamientos absolutos β_{id} , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo β_{id}/β_{el} .

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15	16
β_{id} [%]	R = 1	4.70	3.02	4.94		5.29	8.51	8.49		6.88		11.42
	R = 2	5.91	3.63	5.17		6.55	8.94	8.52		6.78		11.28
	R = 5	16.41	4.27	5.12			8.63	9.92			8.57	11.35
	R = 8	31.05	6.72	9.01				9.38				11.30
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.57	1.00	1.14		0.97	1.42	1.37		1.04		0.90
	R = 2	1.98	1.21	1.19		1.20	1.49	1.38		1.02		0.89
	R = 5	5.49	1.42	1.18			1.44	1.60			0.68	0.89
	R = 8	10.38	2.23	2.07				1.52				0.89

TABLA B. 9: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS INSTRUMENTACIÓN C.

COMPARACIÓN RESPECTO A INSTRUMENTACIÓN CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

Se muestran frecuencias y amortiguamientos identificados en instrumentación C divididas por los obtenidos en instrumentación B. Solo se muestran modos que aparecen en ambas instrumentaciones.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fidC/fidB	R = 1	1.01	1.00	1.00		1.00	1.02	0.99		1.00
	R = 2	1.01	1.00	0.99		1.00		1.00		1.01
	R = 5	0.99	1.01	0.99				0.98		
	R = 8	0.99	1.01	1.03						
β_{idC}/β_{idB}	R = 1	1.41	1.04	1.17		0.98	1.34	1.30		1.03
	R = 2	1.37	1.24	1.15		1.19		1.34		1.01
	R = 5	1.04	1.26	1.15				1.42		
	R = 8	2.02	1.21	1.93						

TABLA B. 10: FRECUENCIAS Y AMORTIGUAMIENTOS NORMALIZADOS. INSTRUMENTACION B.

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
dispFM	R = 1	1.00	0.99	0.92		1.00	0.57	0.21		0.84	0.98
	R = 2	1.00	0.99	0.94		0.40	0.43	0.32		0.55	0.96
	R = 5	1.00	0.97	0.95		0.46	0.08	0.28			0.65
	R = 8	1.00	0.73	0.97		0.40		0.19			0.06

TABLA B. 11

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

La figura presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$).

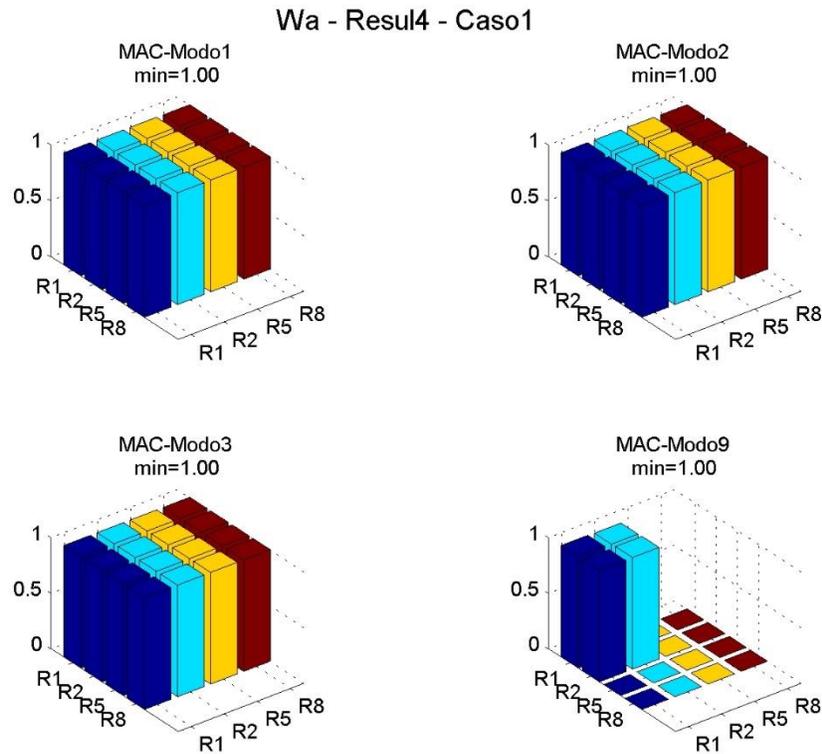


FIGURA B. 2: MAC SSI-COV INSTRUMENTACION C

B.4.1.2 INSTRUMENTACIÓN D.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS.

Se presentan frecuencias absolutas fid , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo fid/fel .

Modo:		1	2	3	4	5	6	7	8	9
fid [Hz]	R = 1	0.85	2.73	5.06			6.57			7.48
	R = 2	0.85	2.69				6.43			
	R = 5	0.82	2.68							
	R = 8	0.75	2.68	4.70						
fid/fel	R = 1	0.99	1.00				0.97			0.99
	R = 2	0.99	0.99				0.95			
	R = 5	0.95	0.98							
	R = 8	0.87	0.98							

TABLA B. 12:

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS.

Se presentan amortiguamientos absolutos β_{id} , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo β_{id}/β_{el} .

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
β_{id} [%]	R = 1	3.48	1.88	1.88			5.98			6.46
	R = 2	5.55	2.31				8.21			
	R = 5	17.48	3.48							
	R = 8	27.82	7.94	15.3						
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.16	0.63				1.00			0.98
	R = 2	1.86	0.77				1.37			
	R = 5	5.85	1.16							
	R = 8	9.31	2.64							

TABLA B. 13

COMPARACIÓN RESPECTO A INSTRUMENTACIÓN CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

Se muestran frecuencias y amortiguamientos identificados en instrumentación D divididas por los obtenidos en instrumentación B. Solo se muestran modos que aparecen en ambas instrumentaciones.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fidC/fidB	R = 1	1.00	1.01				0.98			1.00
	R = 2	1.00	1.00							
	R = 5	1.00	1.02							
	R = 8	0.98	1.03							
β_{idC}/β_{idB}	R = 1	1.04	0.65				0.94			0.97
	R = 2	1.29	0.79							
	R = 5	1.10	1.03							
	R = 8	1.81	1.44							

TABLA B. 14: : FRECUENCIAS Y AMORTIGUAMIENTOS NORMALIZADOS. INSTRUMENTACION D.

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
dispFM	R = 1	1.00	1.00	0.99						0.92
	R = 2	1.00	0.99							0.99
	R = 5	0.99	1.00				0.79			0.96
	R = 8	1.00	0.99	0.99						

TABLA B. 15

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5, y 8).

Wa - Resul2 - Caso1

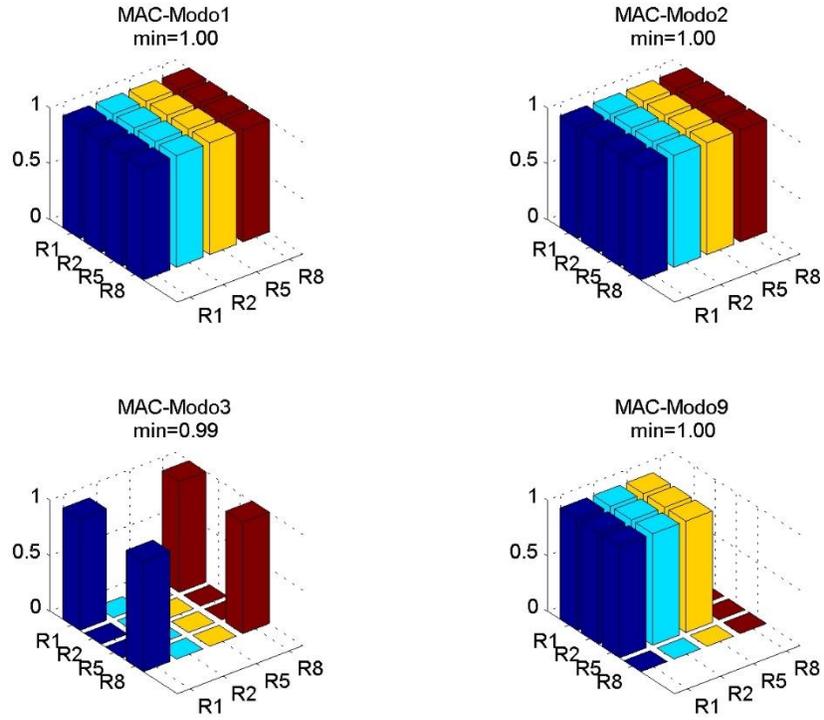


FIGURA B. 3: MAC SSI-COV INSTRUMENTACION B

B.4.2 CASO 2 – HISTÉRESIS CON TRANSICIÓN SUAVIZADA A LA FLUENCIA.

B.4.2.1 INSTRUMENTACIÓN B.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS.

Se presentan frecuencias absolutas fid , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo fid/fel .

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
fid [Hz]	R = 1	0.86	2.71	4.65		6.11	6.70	7.03		7.52		10.84
	R = 2(n)	0.80	2.54	4.62		6.05	6.54			7.32		10.68
	R = 5(n)	0.69		4.62		6.00				7.24		10.65
	R = 8(n)			4.60		5.97						10.62
fid/fel	R = 1	1.00	0.99	1.00		1.00	0.99	1.00		1.00		1.00
	R = 2(n)	0.93	0.93	0.99		0.99	0.97			0.97		0.99
	R = 5(n)	0.81		0.99		0.99				0.96		0.98
	R = 8(n)			0.99		0.98						0.98

TABLA B. 16

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS.

Se presentan amortiguamientos absolutos β_{id} , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo β_{id}/β_{el} .

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
β_{id} [%]	R = 1	3.34	2.90	4.24		5.43	6.37	6.52		6.69		9.42
	R = 2(n)	10.93	6.20	5.43		6.00	7.19			8.78		9.38
	R = 5(n)	15.50		4.73		6.50				11.20		9.34
	R = 8(n)			4.97		7.11						9.68
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.12	0.96	0.97		0.99	1.06	1.05		1.01		1.01
	R = 2(n)	3.65	2.06	1.25		1.10	1.20			1.33		1.01
	R = 5(n)	5.18		1.09		1.19				1.69		1.00
	R = 8(n)			1.14		1.30						1.04

TABLA B. 17: : AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADOS. INSTRUMENTACIÓN B.

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
dispFM	R = 1	1.00	0.98	0.98		0.18	0.84	0.47		0.98		0.86
	R = 2(n)	1.00	0.85	0.84		0.23	0.82			0.94		0.50
	R = 5(n)	1.00		0.99		0.32	0.84			0.73		
	R = 8(n)			0.98		0.35						0.70

TABLA B. 18

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5, y 8).

Wa - Resul24 - Caso2

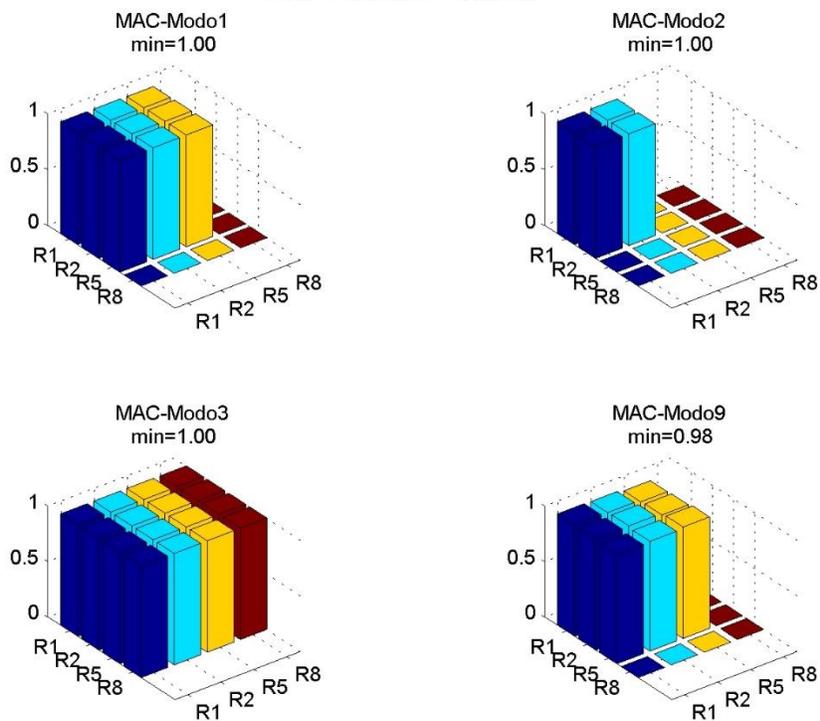


FIGURA B. 4: MAC SSI-COV INSTRUMENTACION B

B.4.2.2 INSTRUMENTACIÓN C.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS.

Se presentan frecuencias absolutas fid , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo fid/fel .

Modo:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
fid [Hz]	R = 1	0.87	2.71	4.63		6.11	6.85	6.98		7.50	14.78
	R = 2(n)	0.84	2.52	4.59				6.97			14.73
	R = 5(n)			4.54				6.92			14.75
	R = 8(n)			4.54				6.75			14.72
fid/fel	R = 1	1.01	0.99	1.00		1.00	1.01	1.00		0.99	0.99
	R = 2(n)	0.98	0.92	0.99				0.99			0.99
	R = 5(n)			0.98				0.99			0.99
	R = 8(n)			0.97				0.96			0.99

TABLA B. 19: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS. INSTRUMENTACIÓN C.

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS.

Se presentan amortiguamientos absolutos β_{id} , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo β_{id}/β_{el} .

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
β_{id} [%]	R = 1	4.70	3.02	4.94		5.29	8.51	8.49		6.88	11.42
	R = 2(n)	23.56	7.57	5.57				8.90			11.82
	R = 5(n)			5.87				9.30			11.53
	R = 8(n)			6.04				10.81			12.02
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.57	1.00	1.14		0.97	1.42	1.37		1.04	0.90
	R = 2(n)	7.88	2.51	1.28				1.44			0.93
	R = 5(n)			1.35				1.50			0.91
	R = 8(n)			1.39				1.75			0.94

TABLA B. 20: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS. INSTRUMENTACIÓN C.

COMPARACIÓN RESPECTO A INSTRUMENTACIÓN CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

Se muestran frecuencias y amortiguamientos identificados en instrumentación C divididas por los obtenidos en instrumentación B. Solo se muestran modos que aparecen en ambas instrumentaciones.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fidC/fidB	R = 1	1.01	1.00	1.00		1.00	1.02	0.99		1.00
	R = 2(n)	1.06	0.99	0.99						
	R = 5(n)			0.98						
	R = 8(n)			0.99						
β_{idC}/β_{idB}	R = 1	1.41	1.04	1.17		0.98	1.34	1.30		1.03
	R = 2(n)	2.16	1.22	1.03						
	R = 5(n)			1.24						
	R = 8(n)			1.21						

TABLA B. 21: FRECUENCIAS Y AMORTIGUAMIENTOS NORMALIZADOS. INSTRUMENTACIÓN C.

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
dispFM	R = 1	1.00	0.99	0.92		1.00	0.57	0.21		0.84	0.98
	R = 2(n)	1.00	0.90	0.68				0.30			0.21
	R = 5(n)			0.76				0.39			0.25
	R = 8(n)			0.94				0.19			0.19

TABLA B. 22: DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES. INSTRUMENTACIÓN

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5, y 8).

Wa - Result4 - Caso2

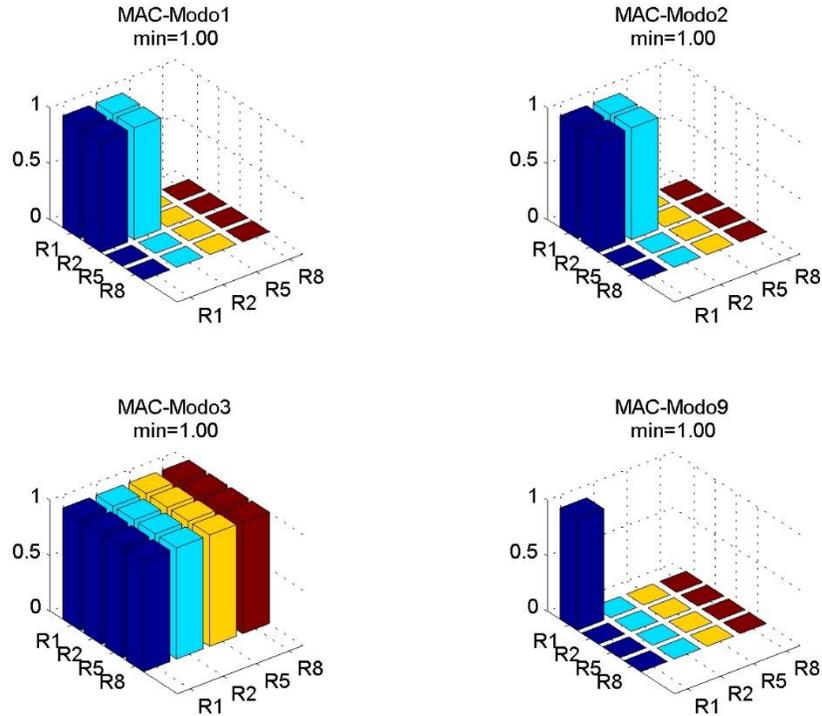


FIGURA B. 5: MAC SSI-COV INSTRUMENTACION C

B.4.2.3 INSTRUMENTACIÓN D.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS.

Se presentan frecuencias absolutas fid , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo fid/fel .

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fid [Hz]	R = 1	0.85	2.73	5.06						7.22
	R = 2(n)	0.79	2.65	4.72			6.54			7.19
	R = 5(n)	0.73	2.55	4.60			6.54			7.35
	R = 8(n)	0.70	2.55	4.25			6.38			
fid/fel	R = 1	0.99	1.00	1.09						0.96
	R = 2(n)	0.92	0.97	1.01			0.97			0.95
	R = 5(n)	0.85	0.93	0.99			0.97			0.97
	R = 8(n)	0.81	0.93	0.91			0.94			

TABLA B. 23

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS.

Se presentan amortiguamientos absolutos β_{id} , y normalizadas por la frecuencia elástica del modo β_{id}/β_{el} .

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
β_{id} [%]	R = 1	3.48	1.88	14.71						6.32

	R = 2(n)	14.78	6.07	12.56		6.83		7.74
	R = 5(n)	28.31	12.81	9.02		13.15		4.31
	R = 8(n)	42.46	22.96	13.30		16.17		
β_{id}/β_{el}	R = 1	1.16	0.63	3.38				0.95
	R = 2(n)	4.94	2.02	2.89		1.14		1.17
	R = 5(n)	9.47	4.26	2.07		2.19		0.65
	R = 8(n)	14.20	7.63	3.06		2.70		

TABLA B. 24

COMPARACIÓN RESPECTO A INSTRUMENTACIÓN CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

Se muestran frecuencias y amortiguamientos identificados en instrumentación D divididas por los obtenidos en instrumentación B. Solo se muestran modos que aparecen en ambas instrumentaciones.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fidD/fidB	R = 1	1.00	1.01				0.98			1.00
	R = 2(n)	0.99	1.05				1.00			0.97
	R = 5(n)	1.05								1.02
	R = 8(n)									
β_{idD}/β_{idB}	R = 1	1.04	0.65				0.94			0.97
	R = 2(n)	1.35	0.98				0.95			0.93
	R = 5(n)	1.83								0.38
	R = 8(n)									

TABLA B. 25

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
dispFM	R = 1	1.00	1.00	0.99						0.92
	R = 2(n)	1.00	0.99	1.00			0.96			0.97
	R = 5(n)	1.00	0.99	0.97			0.98			0.99
	R = 8(n)	1.00	0.99	0.99			0.98			

TABLA B. 26: : DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES. INSTRUMENTACIÓN D.

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5, y 8).

Wa - Result2 - Caso2

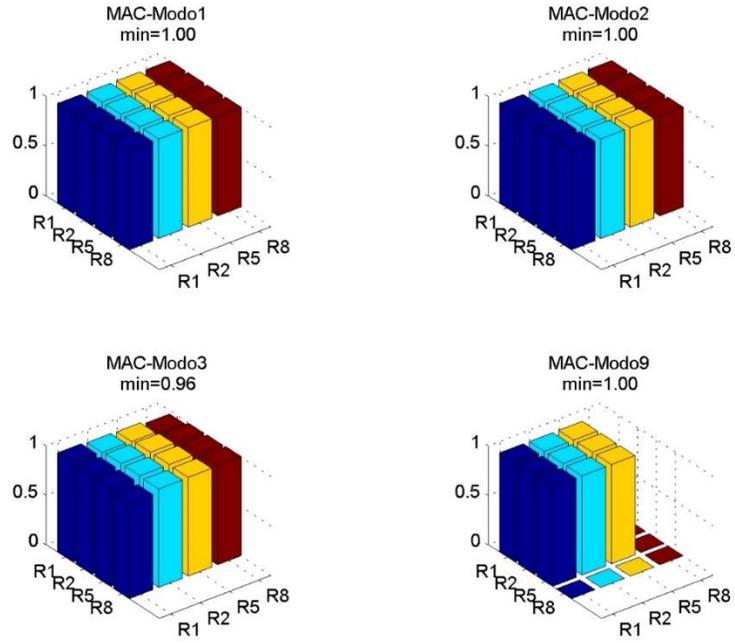


FIGURA B. 6: MAC SSI-COV INSTRUMENTACION D

B.5. RESULTADOS MOESP

Los resultados de la identificación con MOESP se ordenan por casos de ley constitutiva del BRB (Caso 1 y Caso 2), y luego por instrumentaciones, A, B, C, y D, tal como son descritas en el capítulo “Identificación sobre marcos arriostrados con diagonales de pandeo restringido”.

Se presentan tablas con las frecuencias identificadas y amortiguamientos identificados para cada uno de los registros utilizados, identificados con el código introducido en la Tabla 11 del capítulo “Identificación sobre marcos arriostrados con diagonales de pandeo restringido”. Cada uno de los resultados, está ordenado de manera que cada columna de la tabla esté asociada a un modo, y ordenados de acuerdo con el avance en la incursión en el rango no-lineal ($R = 1, 2, 5$ y 8). Adicionalmente, se muestran tablas con la normalización de estos resultados respecto a la frecuencia y amortiguamiento elástico de cada modo. Los modos que no arrojan resultados tienen casillas vacías en las tablas.

Para las instrumentaciones B, C y D, se presenta además la comparación entre estos resultados, y los obtenidos con la instrumentación A, realizada con una mayor cantidad de sensores. Esta comparación se realiza con las frecuencias y amortiguamientos identificados.

Para cada caso, e instrumentación, se muestra también la dispersión de las formas modales identificadas, utilizando el parámetro $dispFM$, que obtiene la máxima ortogonalidad entre el conjunto de vectores que agrupan cada forma modal, medidos en términos de MAC.

Finalmente, se insertan diagramas MAC para evaluar la ortogonalidad de los modos más significativos a medida que incursionan en el rango no lineal. Para ello, se seleccionan un modo, y se hace MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal, agrupados por registro. La pérdida de consistencia de la forma modal promedio se ve en cuánto descende el mínimo valor MAC de cada modo, impreso sobre cada diagrama.

B.5.1 CASO 1: HISTÉRESIS BILINEAL.

B.5.1.1 INSTRUMENTACIÓN A.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS.

fid [Hz]	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	0.86	2.73	4.65	5.08	6.07	6.73	6.98		7.51
	Cu	0.86	2.73	4.65	5.08	6.07	6.73	6.98		7.51
	Hu	0.86	2.73	4.65	5.08	6.07	6.73	6.98		7.51
	Me	0.86	2.73	4.65	5.08	6.07	6.73	6.98		7.51
	Mi	0.86	2.73	4.65	5.08	6.07	6.73	6.98		7.51
	Ta	0.86	2.73	4.65	5.08	6.07	6.73	6.98		7.51
R = 2	Ah	0.85	2.71	4.64		6.05	6.63			7.46
	Cu	0.85	2.72	4.65						7.98
	Hu	0.85	2.71	4.65			6.52			7.80
	Me	0.86	2.70	4.64						7.61
	Mi	0.85	2.70	4.65						7.69
	Ta	0.85	2.72	4.65						7.93

R = 5	Ah			4.62						7.61
	Cu	0.85	2.69	4.63						8.02
	Hu	0.87	2.70	4.64						8.00
	Me	0.85	2.69							
	Mi	0.87	2.70	4.63						7.63
	Ta	0.86	2.72	4.64						7.59
R = 8	Ah			4.59						8.61
	Cu	0.83		4.63						7.76
	Hu	0.89	2.69	4.63						7.86
	Me	0.85								
	Mi	0.83	2.66	4.63						6.95
	Ta	0.85	2.70	4.63			6.43			7.66

TABLA B. 27: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS PARA MOESP. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN A.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR FRECUENCIA ELÁSTICA

fid/fel	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	0.99	0.99	1.00		0.99	0.98			0.99
	Cu	0.99	1.00	1.00						1.06
	Hu	1.00	0.99	1.00			0.96			1.03
	Me	1.00	0.99	1.00						1.01
	Mi	0.99	0.99	1.00						1.02
	Ta	0.99	1.00	1.00						1.05
R = 5	Ah			0.99						1.01
	Cu	0.99	0.99	1.00						1.06
	Hu	1.01	0.99	1.00						1.06
	Me	0.99	0.99							
	Mi	1.02	0.99	0.99						1.01
	Ta	1.00	1.00	1.00						1.01
R = 8	Ah			0.98						1.14
	Cu	0.97		0.99						1.03
	Hu	1.03	0.99	0.99						1.04
	Me	0.99								
	Mi	0.97	0.97	0.99						0.92
	Ta	1.00	0.99	0.99			0.95			1.02

TABLA B. 28: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS PARA MOESP. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN A.

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS.

β_{id} [%]	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
------------------	-------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

R = 1	Ah	3.00	3.01	4.33	4.66	5.42	5.94	6.14	6.56
	Cu	3.00	3.02	4.33	4.66	5.42	5.94	6.14	6.56
	Hu	3.00	3.01	4.33	4.66	5.42	5.94	6.14	6.56
	Me	3.00	3.01	4.33	4.66	5.42	5.94	6.14	6.56
	Mi	2.99	3.01	4.33	4.66	5.42	5.94	6.14	6.56
	Ta	2.99	3.01	4.33	4.66	5.42	5.95	6.14	6.56
R = 2	Ah	9.73	4.10	4.52		5.65	6.70		8.51
	Cu	5.81	2.40	4.34					7.08
	Hu	4.96	2.66	4.34			6.61		5.99
	Me	7.05	2.64	4.39					5.86
	Mi	5.51	3.09	4.34					6.69
	Ta	5.98	2.98	4.36					6.55
R = 5	Ah			4.97					7.46
	Cu	14.30	2.38	4.44					4.48
	Hu	10.50	2.88	4.43					4.53
	Me	12.38	4.26						
	Mi	15.66	3.49	4.46					4.63
	Ta	15.16	3.17	4.44					5.64
R = 8	Ah			5.32					7.37
	Cu	20.18		4.50					4.19
	Hu	19.60	3.48	4.52					4.16
	Me	16.14							
	Mi	20.54	3.67	4.58					5.84
	Ta	23.15	3.99	4.55			5.97		4.88

TABLA B. 29: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS PARA MOESP. CASO I. INSTRUMENTACIÓN A.

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADOS POR AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO.

β_{id}/β_{el}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99		0.99
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2	Ah	3.25	1.36	1.04		1.04	1.12			1.28
	Cu	1.94	0.80	1.00						1.07
	Hu	1.66	0.88	1.00			1.10			0.90
	Me	2.36	0.88	1.01						0.89
	Mi	1.84	1.03	1.00						1.01
	Ta	2.00	0.99	1.00						0.99
R = 5	Ah			1.14						1.13
	Cu	4.78	0.79	1.02						0.68
	Hu	3.51	0.96	1.02						0.68

	Me	4.14	1.42						
	Mi	5.24	1.16	1.03					0.70
	Ta	5.07	1.05	1.02					0.85
R = 8	Ah			1.22					1.11
	Cu	6.75		1.03					0.63
	Hu	6.56	1.16	1.04					0.63
	Me	5.40							
	Mi	6.87	1.22	1.05					0.88
	Ta	7.74	1.32	1.05			1.00		0.74

TABLA B. 30: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS PARA MOESP. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN A.

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

dispFM	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00		1.00	
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	0.95	0.83	0.97		0.21	0.96			0.91	
	Cu	1.00	0.99	0.84						0.58	
	Hu	1.00	1.00	1.00			0.82			0.93	
	Me	1.00	1.00	0.27						0.94	
	Mi	1.00	0.99	0.99						0.91	
	Ta	1.00	0.99	0.65						0.56	
R = 5	Ah			0.38						0.96	
	Cu	0.97	0.95	0.24						0.90	
	Hu	1.00	0.98	0.99						0.94	
	Me	0.99	0.95								
	Mi	0.98	0.94	0.74						0.97	
	Ta	0.98	0.97	0.95						0.69	
R = 8	Ah		0.92	0.35						0.95	
	Cu	0.98		0.24						0.93	
	Hu	1.00	0.98	1.00						0.89	
	Me	0.99									
	Mi	0.95	0.88	0.99						0.93	
	Ta	0.99	0.85	0.85			0.93			0.85	

TABLA B. 31: DISPERSIÓN DE LAS FORMAS MODALES IDENTIFICADAS. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN A.

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5, y 8), para el modo n°1.

Modo 1 - Result - Caso1

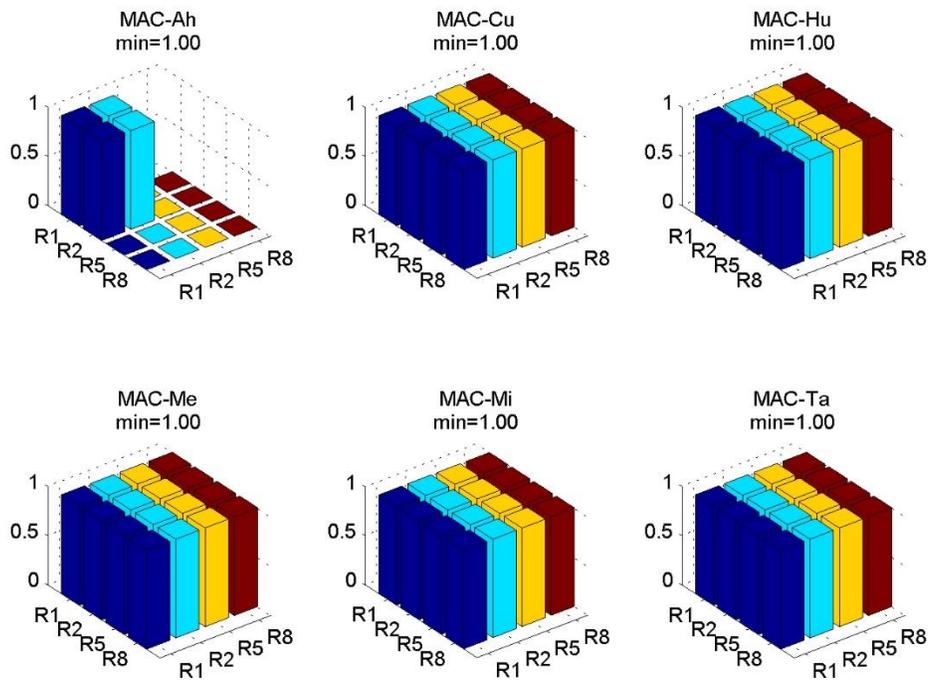


FIGURA B. 7: MAC INSTRUMENTACIÓN A – MODO 1

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$), para el modo $n^{\circ}2$.

Modo 2 - Result - Caso1

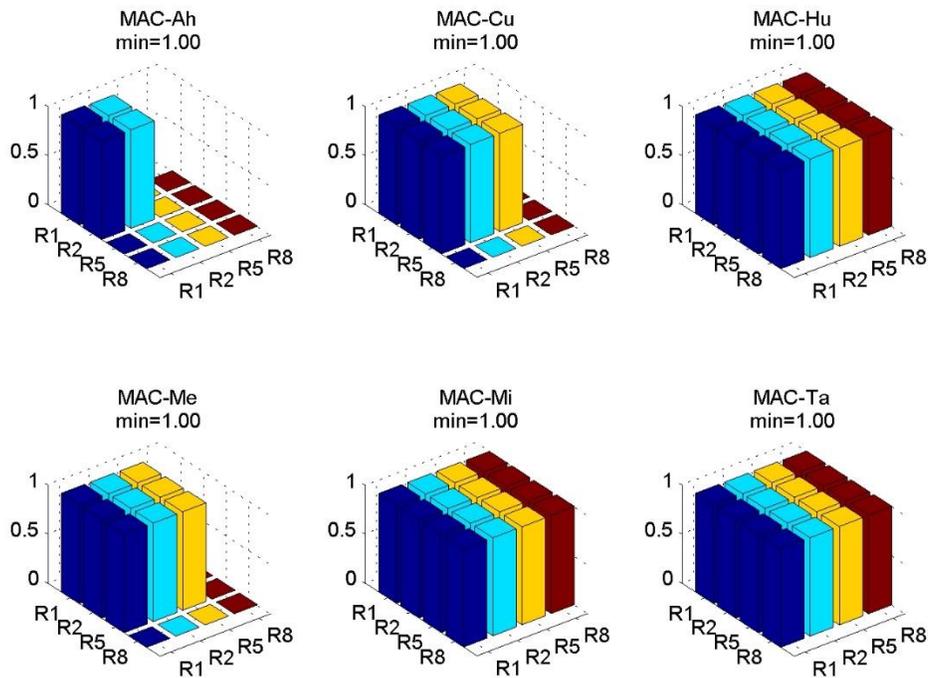


FIGURA B. 8: MAC INSTRUMENTACIÓN A – MODO 1

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$), para el modo n°3.

Modo 3 - Result - Caso1

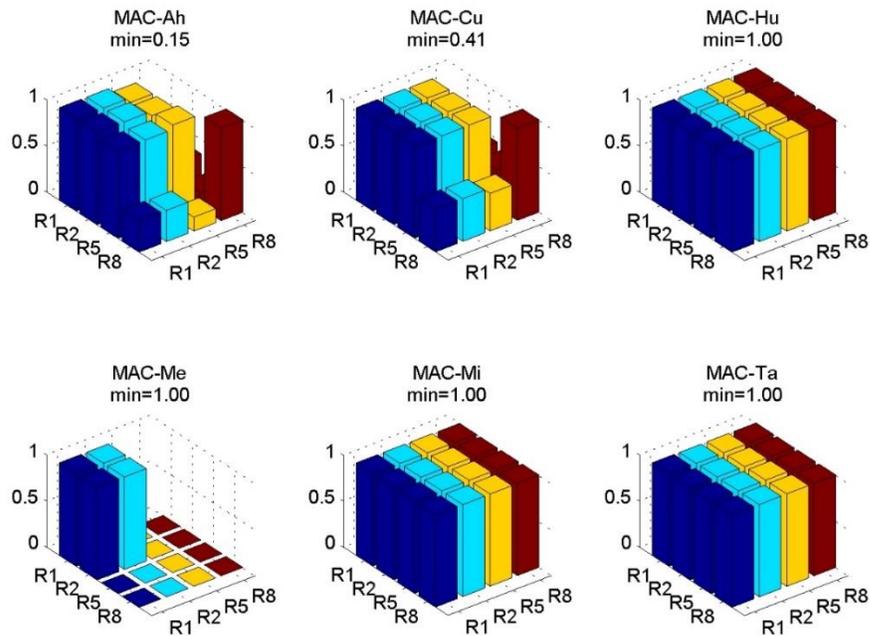


FIGURA B. 9: MAC INSTRUMENTACIÓN A – MODO 9

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$), para el modo n°9.

Modo 9 - Result - Caso1

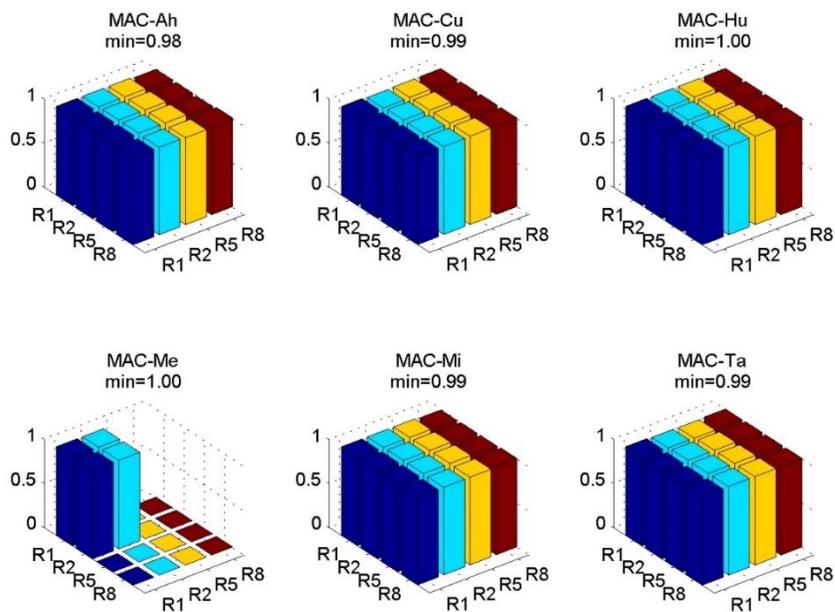


FIGURA B. 10: MAC INSTRUMENTACIÓN A – MODO D

B.5.1.2 INSTRUMENTACIÓN B.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR LA FRECUENCIA IDENTIFICADA EN INSTRUMENTACIÓN A.

fidB/fidA	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	1.01	1.01	1.00						1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00						1.01
	Hu	1.00	1.00	1.00						1.01
	Me	0.99	1.00	1.00						0.99
	Mi	1.00	1.00	1.00						1.01
	Ta	1.00	1.00	1.00						0.99
R = 5	Ah			1.00						
	Cu	1.00	1.00	1.00						0.99
	Hu	0.99	1.00	1.00						0.98
	Me	1.00	0.99							
	Mi	0.96	1.00	1.00						1.01
	Ta	1.00	1.00	1.00						1.00
R = 8	Ah			1.00						
	Cu	1.02		1.00						1.04
	Hu	0.98	1.00	1.00						1.04
	Me	0.98								
	Mi	1.02	1.00	1.00						1.11
	Ta	1.01	1.00	1.00						1.00

TABLA B. 32: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS MOESP. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN B.

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADAS POR LOS IDENTIFICADOS EN INSTRUMENTACIÓN A.

βidB/βidA	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	1.40	1.05	1.01						0.95
	Cu	0.97	1.06	1.15						0.83
	Hu	0.97	1.02	1.00						1.06
	Me	0.89	1.01	1.01						0.97

	Mi	0.94	1.00	1.00						0.93
	Ta	0.96	1.01	1.00						1.02
R = 5	Ah				1.04					
	Cu	0.92	0.96	1.00						0.78
	Hu	1.06	1.05	1.00						1.08
	Me	0.98	0.90							
	Mi	0.92	1.02	1.00						1.01
	Ta	0.86	0.96	1.00						0.80
R = 8	Ah				1.03					
	Cu	0.94			1.00					0.93
	Hu	0.89	1.12	1.00						1.12
	Me	1.16								
	Mi	1.05	1.10	1.01						0.64
	Ta	0.88	0.97	1.01						0.98

TABLA B. 33: AMORTIGUAMOESE. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN B.

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

DispFM	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	
R = 2	Ah	0.96	0.95	0.35						0.91
	Cu	1.00	1.00	0.48			0.90			0.87
	Hu	1.00	1.00	0.89						0.91
	Me	1.00	1.00	0.28						0.83
	Mi	1.00	0.99	0.87						0.92
	Ta	1.00	0.99	0.64			0.84			0.59
R = 5	Ah			0.27						
	Cu	0.99	0.95	0.16						0.82
	Hu	1.00	0.98	0.69						0.93
	Me	1.00	0.84	0.79						0.98
	Mi	0.95	0.91	0.42						0.91
	Ta	0.99	0.97	0.65						0.61
R = 8	Ah			0.25						
	Cu	0.97	0.95	0.28						0.93
	Hu	0.99	0.98	0.70						0.81
	Me	0.99		0.26						
	Mi	0.94	0.94	0.46						0.85
	Ta	0.94	0.94	0.19						0.84

TABLA B. 34: DISPERSIÓN FORMAS MODALES. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN B.

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5, y 8), para el modo n°9.

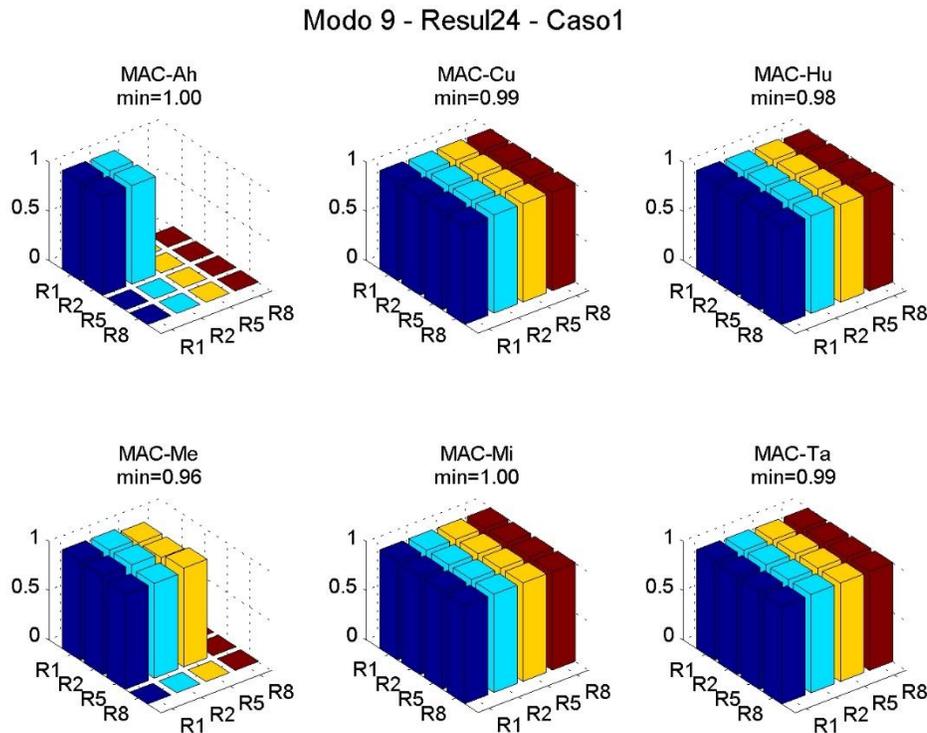


FIGURA B. 11: MAC INSTRUMENTACIÓN B – MODO 1

B.5.1.3 INSTRUMENTACIÓN C.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR FRECUENCIA ELÁSTICA

fid/fel	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00		1.00				1.00	
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98
R = 2	Ah		1.01	1.00						0.99	
	Cu	0.99	1.00	1.00			0.97	0.99		1.09	0.98
	Hu	1.00	1.00	1.00		1.00		0.99		1.05	0.98
	Me	0.99	0.98	1.00		1.00		1.00		1.01	0.98

	Mi	0.99	1.00	1.00	1.00	0.97	0.99	1.00	0.98
	Ta	0.99	1.00	1.00				1.06	0.98
R = 5	Ah			0.99					
	Cu	0.97	1.00	1.00				1.07	
	Hu	0.99	0.98	1.00		0.89	1.00	1.01	0.98
	Me	1.00	0.97	0.99	1.01		0.99		0.98
	Mi	0.99	0.98	1.00	1.00			1.02	0.98
	Ta	0.99	1.01	1.00				1.13	
R = 8	Ah			1.00					
	Cu	0.98	0.97	0.99				1.08	0.98
	Hu	1.01	0.97	1.00				1.02	0.98
	Me	0.96	0.96	0.99	1.03				
	Mi	0.98	0.97	0.99				1.02	0.98
	Ta	1.00	0.97	1.00				1.17	

TABLA B. 35: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS MOESP. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN C.

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADOS POR AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO.

β_{id}/β_{el}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	Ah	1.01	1.00	0.99		0.99				0.99	
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.96
	Hu	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99		0.99	0.97
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.97
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.96
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.97
R = 2	Ah		1.87	0.99						0.93	
	Cu	1.97	1.02	1.02			0.93	0.97		0.87	0.93
	Hu	1.52	1.14	1.00		1.00		1.00		0.73	0.93
	Me	1.98	1.72	1.13		1.00		0.94		0.67	0.93
	Mi	1.64	1.45	0.99		0.98	1.01	0.99		0.78	0.93
	Ta	1.92	1.49	0.98						0.73	0.93
R = 5	Ah			1.24							
	Cu	4.30	1.23	0.99						0.57	
	Hu	2.72	1.21	1.01			0.97	0.97		0.60	0.93
	Me	3.70	1.46	1.10		1.11		0.92			0.93
	Mi	4.00	1.28	1.03		1.07				0.59	0.92
	Ta	4.18	1.66	1.01						0.45	
R = 8	Ah			1.38							
	Cu	5.34	1.53	1.02						0.57	0.90
	Hu	4.36	1.43	1.12						0.53	0.93
	Me	4.76	1.59	1.09		1.22					
	Mi	5.46	1.80	1.07						0.53	0.92
	Ta	5.57	1.50	1.05						0.46	

TABLA B. 36: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS MOESP. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN C.

COMPARACIÓN FRECUENCIA IDENTIFICADA EN ESTE INSTRUMENTACIÓN RESPECTO A LA CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

Se muestran frecuencias identificadas en instrumentación C divididas por los obtenidas en instrumentación A. Solo se muestran modos que aparecen en ambas instrumentaciones.

fidC/fidA	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00		1.00				1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah		1.02	1.00						1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00						1.03
	Hu	1.00	1.01	1.00						1.01
	Me	0.99	0.98	1.00						1.00
	Mi	1.01	1.01	1.00						0.98
	Ta	1.00	1.01	1.00						1.01
R = 5	Ah			1.00						
	Cu	0.98	1.02	1.00						1.00
	Hu	0.98	0.99	1.00						0.95
	Me	1.01	0.99							
	Mi	0.97	0.99	1.00						1.00
	Ta	0.99	1.01	1.00						1.12
R = 8	Ah			1.01						
	Cu	1.02		1.00						1.05
	Hu	0.98	0.98	1.00						0.98
	Me	0.98								
	Mi	1.01	0.99	1.00						1.10
	Ta	1.00	0.98	1.00						1.15

TABLA B. 37: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS MOESP. CASO I. INSTRUMENTACIÓN C.

COMPARACIÓN AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO EN ESTE INSTRUMENTACIÓN RESPECTO AL IDENTIFICADO CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

Se muestran frecuencias identificadas en instrumentación C divididas por los obtenidas en instrumentación A. Solo se muestran modos que aparecen en ambas instrumentaciones.

βidC/βidA	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.01	1.00	1.00		1.00				1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00

	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
R = 2	Ah		1.37	0.96						0.72
	Cu	1.01	1.28	1.03						0.81
	Hu	0.92	1.29	1.00						0.80
	Me	0.84	1.96	1.12						0.76
	Mi	0.89	1.41	1.00						0.77
	Ta	0.96	1.51	0.98						0.74
R = 5	Ah			1.09						
	Cu	0.90	1.56	0.97						0.85
	Hu	0.78	1.26	0.99						0.88
	Me	0.89	1.03							
	Mi	0.76	1.11	1.00						0.85
	Ta	0.82	1.58	0.99						0.52
R = 8	Ah			1.13						
	Cu	0.79		0.99						0.90
	Hu	0.67	1.24	1.08						0.85
	Me	0.88								
	Mi	0.79	1.48	1.02						0.60
	Ta	0.72	1.13	1.01						0.63

TABLA B. 38: AMORTIGUAMIENTO NORMALIZADOS, MOESP. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN C.

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

DispFM	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00		1.00				1.00	
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
R = 2	Ah		0.88	0.88						0.77	
	Cu	1.00	0.99	0.84			0.74	0.33		0.74	0.73
	Hu	1.00	0.94	0.93		0.63		0.81		0.21	0.91
	Me	1.00	0.96	0.67		0.50		0.19		0.51	0.19
	Mi	1.00	0.98	1.00		0.29	0.52	0.17		0.90	0.60
	Ta	1.00	0.97	0.99						0.75	0.63
R = 5	Ah			0.69							
	Cu	1.00	0.93	0.22						0.80	
	Hu	1.00	0.91	0.99			0.39	0.32		0.79	0.39
	Me	1.00	0.98	0.78		0.27		0.21			0.60
	Mi	1.00	0.94	0.28		0.18				0.90	0.62
	Ta	0.98	0.85	0.56						0.94	
R = 8	Ah			0.70							
	Cu	0.98	0.87	0.53						0.86	0.30
	Hu	1.00	0.98	0.45						0.67	0.33

	Me	0.99	0.94	0.30	0.45		
	Mi	0.99	0.87	0.54		0.84	0.33
	Ta	1.00	0.94	0.83		0.79	

TABLA B. 39: FRECUENCIAS FORMAS MODALES IDENTIFICADAS MOESP. CASO 1. INSTRUMENTACIÓN C.

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5, y 8), para el modo n°16.

Modo 16 - Result4 - Caso1

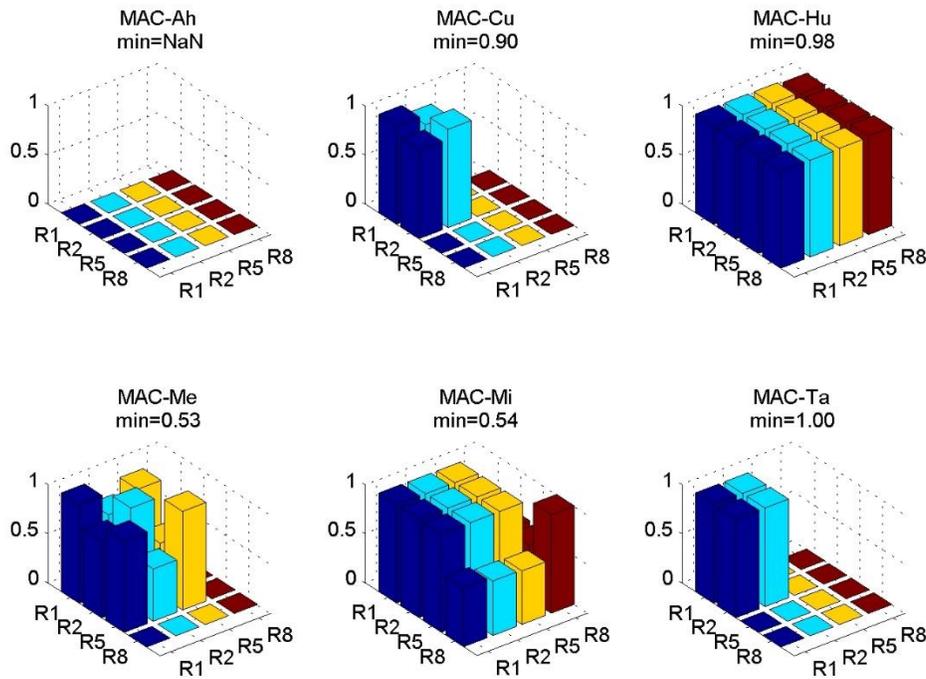


FIGURA B. 12: MAC INSTRUMENTACIÓN C – MODO 16

B.5.1.4 INSTRUMENTACIÓN D.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR FRECUENCIA ELÁSTICA

fid/fel	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00			1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	1.01	0.99				0.99			0.98
	Cu	1.00	0.98				1.00			0.99

	Hu	1.00	1.00	0.99						1.03
	Me	0.99	1.00	1.00						0.99
	Mi	0.99	0.99	0.99						0.98
	Ta	0.99	1.00	1.00			1.03			0.98
R = 5	Ah		0.98							0.99
	Cu	0.97	0.98				0.99			1.06
	Hu	0.98	0.98				0.92			0.97
	Me	0.97	0.97				0.80			
	Mi	0.97	0.97				0.91			0.95
	Ta	0.98	0.98				1.00			0.99
R = 8	Ah						0.96			
	Cu	0.96	0.99				0.95			1.04
	Hu	0.97	0.97				0.90			0.93
	Me	0.95	0.98				0.90			
	Mi	0.94	0.96				0.88			1.02
	Ta	0.98	0.98				1.00			1.05

TABLA B. 40: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS. CASO 1 INSTRUMENTACIÓN D.

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADOS POR AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO.

β_{id}/β_{el}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	0.99			0.99	0.98		0.99
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2	Ah	2.51	1.17				1.29			1.25
	Cu	2.02	1.07				0.93			0.79
	Hu	1.34	1.09	1.00						0.61
	Me	1.82	1.43	1.31						0.82
	Mi	1.71	1.27	1.07						0.92
	Ta	1.75	1.84	1.42				1.06		0.83
R = 5	Ah		2.36							1.31
	Cu	3.40	1.07				0.87			0.69
	Hu	2.49	1.51				0.74			0.75
	Me	3.31	1.21				0.74			
	Mi	3.16	1.36				0.78			0.81
	Ta	3.78	1.21				1.07			0.63
R = 8	Ah						1.47			
	Cu	4.28	1.35				0.63			0.56
	Hu	3.50	1.40				0.95			0.99
	Me	4.06	1.17				0.78			
	Mi	4.58	1.43				0.75			0.55

	Ta	5.08	1.39			0.93			0.64
--	----	------	------	--	--	------	--	--	------

TABLA B. 41: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS. CASO 1 INSTRUMENTACIÓN D.

COMPARACIÓN FRECUENCIA IDENTIFICADA EN ESTE INSTRUMENTACIÓN RESPECTO A LA IDENTIFICADA CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

fidD/fidA	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00			1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	1.01	1.00				1.01			0.99
	Cu	1.00	0.98							0.94
	Hu	1.00	1.01	0.99						1.00
	Me	0.99	1.01	1.00						0.98
	Mi	1.01	0.99	0.99						0.96
	Ta	1.00	1.01	1.00						0.94
R = 5	Ah									0.99
	Cu	0.98	1.00							0.99
	Hu	0.97	1.00							0.91
	Me	0.99	0.99							
	Mi	0.95	0.99							0.94
	Ta	0.98	0.99							0.99
R = 8	Ah									
	Cu	0.99								1.01
	Hu	0.94	0.99							0.90
	Me	0.97								
	Mi	0.96	0.99							1.11
	Ta	0.98	0.99				1.05			1.03

TABLA B. 42: FRECUENCIAS NORMALIZADAS IDENTIFICADAS. CASO 1 INSTRUMENTACIÓN D.

COMPARACIÓN AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO EN ESTA INSTRUMENTACIÓN RESPECTO AL IDENTIFICADO CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

βidD/βidA	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00			1.00	0.99		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	0.77	0.86				1.15			0.98
	Cu	1.04	1.34							0.74

	Hu	0.81	1.24	1.01					0.68
	Me	0.77	1.63	1.30					0.92
	Mi	0.93	1.24	1.08					0.91
	Ta	0.88	1.86	1.42					0.84
R = 5	Ah								1.16
	Cu	0.71	1.35						1.02
	Hu	0.71	1.58						1.10
	Me	0.80	0.86						
	Mi	0.60	1.18						1.16
	Ta	0.75	1.15						0.73
R = 8	Ah								
	Cu	0.63							0.88
	Hu	0.53	1.21						1.58
	Me	0.75							
	Mi	0.67	1.17						0.62
	Ta	0.66	1.05				0.93		0.86

TABLA B. 43: AMORTIGUAMIENTOS NORMALIZADOS. CASO 1 INSTRUMENTACIÓN D.

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

DispFM	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00			1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	1.00	1.00				0.94			0.95
	Cu	1.00	0.99				0.82			0.95
	Hu	1.00	0.98	0.98						0.87
	Me	1.00	0.95	0.85						0.51
	Mi	1.00	0.99	0.83						0.94
	Ta	1.00	0.92	0.93				0.90		0.96
R = 5	Ah		0.96							0.96
	Cu	1.00	0.82				0.81			0.79
	Hu	1.00	0.87				0.86			0.73
	Me	1.00	0.89				0.77			
	Mi	1.00	0.95				0.90			0.76
	Ta	0.99	0.95				0.83			0.95
R = 8	Ah						0.94			
	Cu	1.00	0.78				0.56			0.79
	Hu	1.00	0.94				0.76			0.36
	Me	1.00	0.98				0.98			
	Mi	1.00	0.90				0.78			0.94
	Ta	1.00	0.84				0.84			0.42

TABLA B. 44: DISPERSIÓN FORMA MODAL IDENTIFICADAS. CASO 1 INSTRUMENTACIÓN D.

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$), para el modo $n^{\circ}1$.

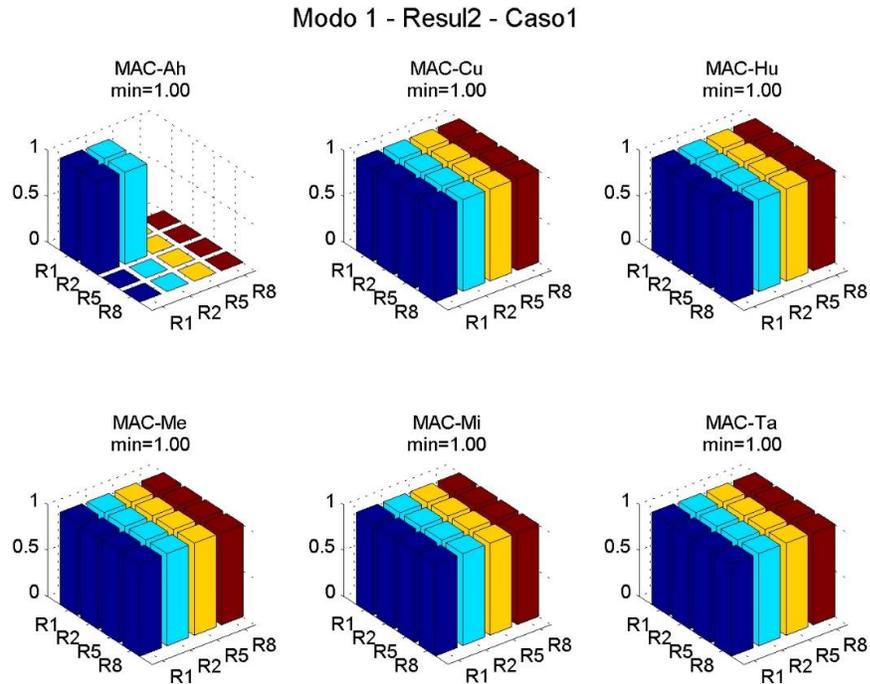


FIGURA B. 13: MAC INSTRUMENTACIÓN D – MODO 1

B.5.2 CASO 2 – HISTÉRESIS CON TRANSICIÓN SUAVIZADA A LA FLUENCIA.

B.5.2.1 INSTRUMENTACIÓN A.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR FRECUENCIA ELÁSTICA.

fid/fel	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2 (n)	Ah	0.97		0.99		0.98	0.96			0.98
	Cu	0.97	0.95	0.99						0.95
	Hu	0.95	0.97	0.99		0.99				1.01
	Me	0.96	0.96			0.99				0.97
	Mi	0.94	0.96	0.99						0.98
	Ta	0.96	0.96	0.99						1.04
R = 5 (n)	Ah			0.98						0.91
	Cu	0.99	0.94	0.99						0.99
	Hu	0.95	0.95	0.99						1.09
	Me	0.91	0.93							0.87
	Mi	0.91	0.93	0.99						0.95
	Ta	0.95	0.95	0.99						1.04
R = 8 (n)	Ah			0.98						1.12
	Cu	1.02	0.95							0.89
	Hu	0.96	0.94	0.99				0.97		1.07
	Me	0.85		0.98				0.96		0.72
	Mi	0.96	0.90							0.90
	Ta	0.88	0.94	0.99						0.97

TABLA B. 45

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADOS POR AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO.

β_{id}/β_{el}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99		0.99
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2 (n)	Ah	10.07		1.11		1.13	1.09			1.57
	Cu	5.38	1.68	1.03						1.04
	Hu	4.32	1.66	1.03		1.04				0.96
	Me	5.09	2.20			1.06				1.09
	Mi	4.80	1.73	1.03						1.02
	Ta	4.96	1.84	1.03						1.04
R = 5 (n)	Ah			1.20						1.45
	Cu	9.51	2.16	1.05						1.16
	Hu	7.86	2.52	1.07						1.54
	Me	6.51	3.32							1.53
	Mi	9.33	2.44	1.06						1.26
	Ta	9.52	2.65	1.07						1.14
R = 8 (n)	Ah			1.25						1.45
	Cu	9.35	2.72							0.96
	Hu	10.17	3.19	1.10				1.06		1.09
	Me	8.42		1.16				1.09		1.90
	Mi	11.36	2.73							0.89
	Ta	10.76	3.38	1.10						0.67

TABLA B. 46: AMORTIGUAMIENTO NORMALIZADO. CASO 1 INSTRUMENTACIÓN D.

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

DispFM	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00		1.00	
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2 (n)	Ah	0.97		0.69		0.29	0.91			0.93	
	Cu	0.97	0.96	0.16						0.58	
	Hu	1.00	0.98	0.99		0.34				0.71	
	Me	0.92	0.95			0.16				0.73	
	Mi	1.00	0.99	0.89						0.68	
	Ta	0.99	0.99	0.98						0.60	
R = 5 (n)	Ah			0.15						0.19	
	Cu	0.99	0.41	0.21						0.50	
	Hu	0.70	0.81	0.85						0.60	

	Me	1.00	0.89			0.93
	Mi	0.99	0.41	0.80		0.74
	Ta	0.95	0.93	0.25		0.63
R = 8 (n)	Ah			0.21		0.95
	Cu	0.90	0.75			0.51
	Hu	1.00	0.91	0.99	0.87	0.89
	Me	1.00		0.97	0.67	0.92
	Mi	0.97	0.35			0.06
	Ta	0.97	0.73	0.97		0.80

TABLA B. 47: DISPERSIÓN FORMAS MODALES. CASO 1 INSTRUMENTACIÓN D.

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$), para el modo $n^{\circ}1$.

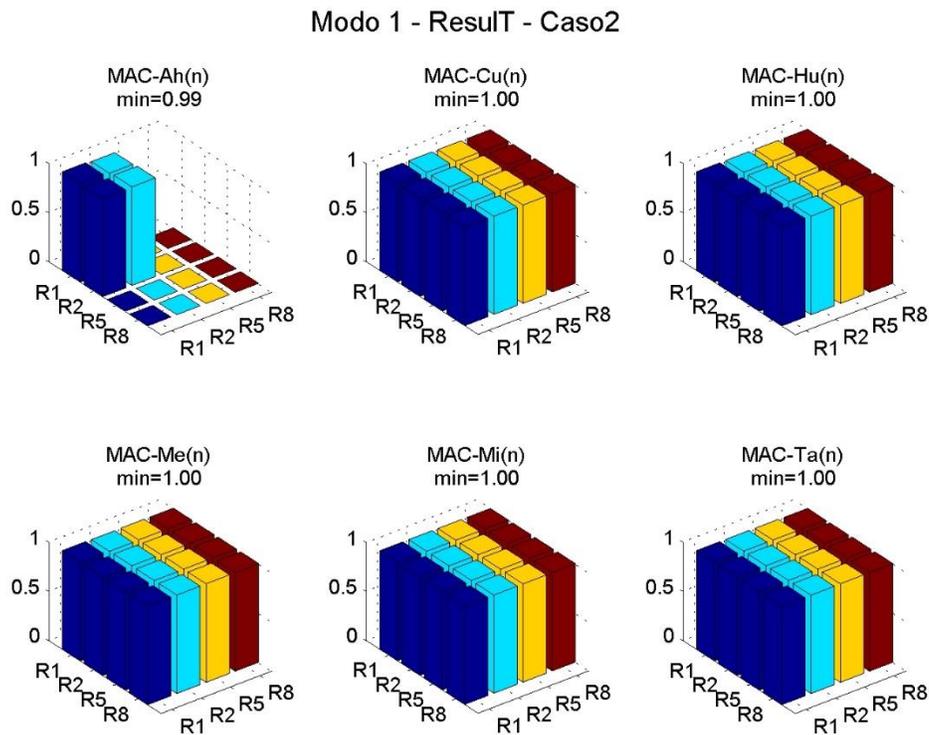


FIGURA B. 14: MAC INSTRUMENTACIÓN A – MODO 1

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$), para el modo $n^{\circ}2$.

Modo 2 - Result - Caso2

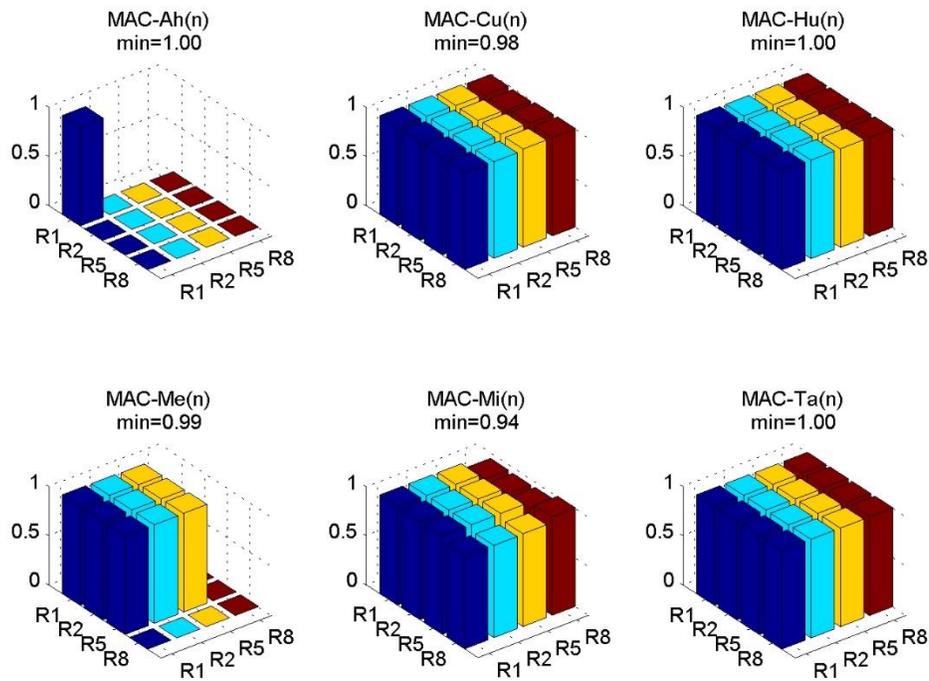


FIGURA B. 15: MAC INSTRUMENTACIÓN A – MODO 2

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, y 8$), para el modo $n^{\circ}3$.

Modo 3 - Result - Caso2

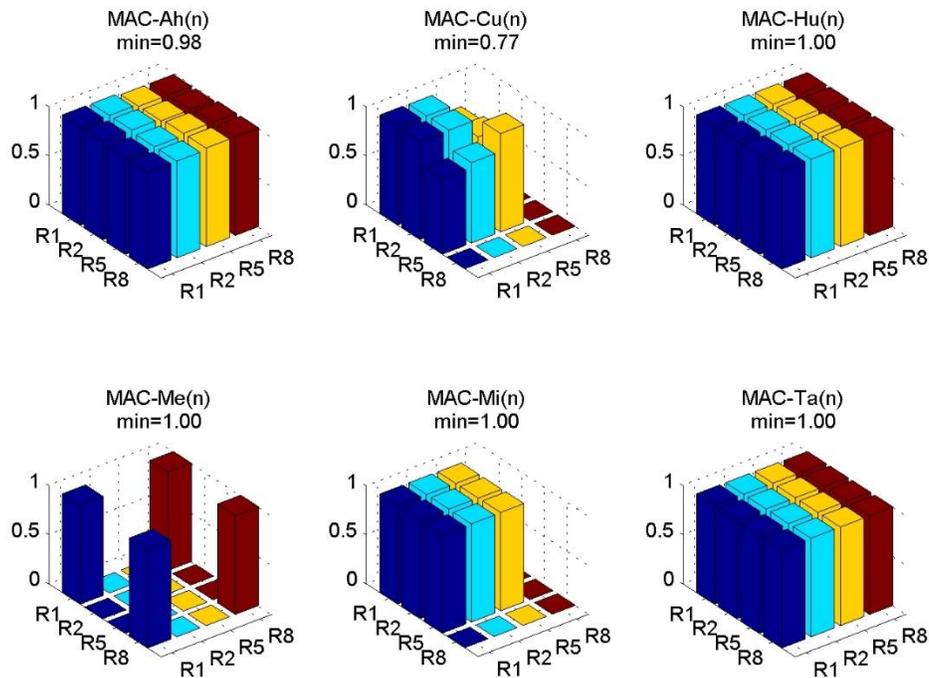


FIGURA B. 16: MAC INSTRUMENTACIÓN A – MODO 3

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$), para el modo n°9.

Modo 9 - Result - Caso2

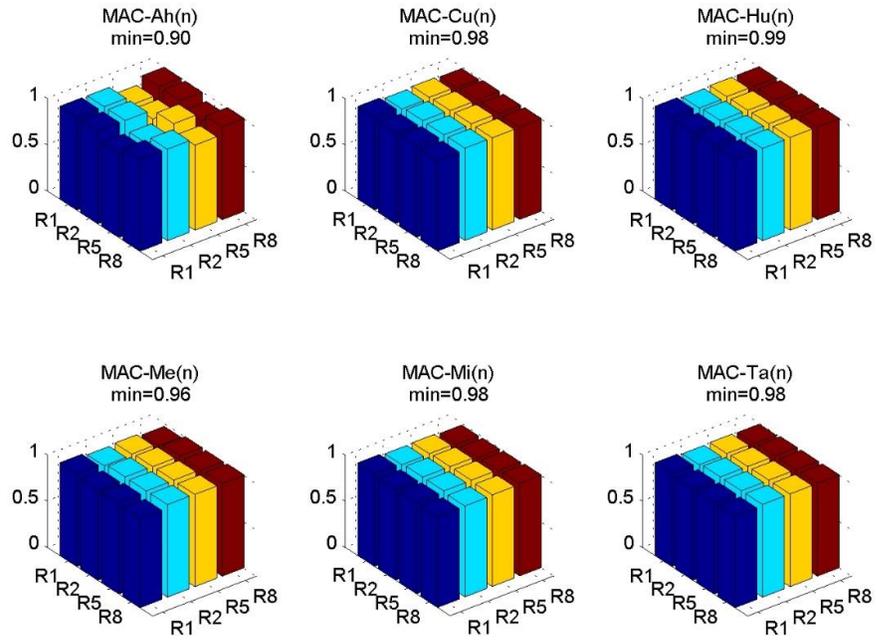


FIGURA B. 17: MAC INSTRUMENTACIÓN A – MODO 9

B.5.2.2 INSTRUMENTACIÓN B.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR FRECUENCIA ELÁSTICA.

fid/fel	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah			0.99						0.96
	Cu	0.96	0.95	0.99						0.97
	Hu	0.96	0.97	0.99						1.00
	Me	0.97	0.95	0.99						1.11
	Mi	0.97	0.96	0.99						1.02
	Ta	0.97	0.96	0.99						1.06
R = 5	Ah			0.99						
	Cu	1.05	0.93	0.99						0.95
	Hu	0.96	0.95	0.99						1.04
	Me	0.96	0.94	0.99						0.85
	Mi	1.03	0.94	0.99						0.96
	Ta	1.02	0.95	0.99						0.98
R = 8	Ah			0.98						0.93
	Cu	1.07	0.93	0.99						0.91
	Hu	0.99	0.94	0.99						0.95
	Me	0.87		0.98						0.73
	Mi	1.02	0.91	0.99						0.90
	Ta	0.96	0.94	0.99						0.83

TABLA B. 48: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN A

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADOS POR AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO.

β_{id}/β_{el}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2	Ah			1.12						1.69
	Cu	5.07	1.74	1.02						1.01
	Hu	4.74	1.74	1.03						1.09
	Me	5.09	2.22	1.06						1.17
	Mi	4.71	1.75	1.03						1.12

	Ta	5.01	1.83	1.03	1.10
R = 5	Ah			1.22	
	Cu	7.75	2.23	1.05	0.96
	Hu	8.45	2.61	1.06	0.91
	Me	8.53	3.27	1.11	1.26
	Mi	7.54	2.55	1.08	1.12
	Ta	9.86	2.70	1.07	0.99
R = 8	Ah			1.27	1.75
	Cu	9.87	2.85	1.07	1.13
	Hu	11.64	3.44	1.09	1.48
	Me	9.52		1.17	1.98
	Mi	9.21	3.00	1.11	1.34
	Ta	12.11	3.48	1.10	1.22

TABLA B. 49: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN A

COMPARACIÓN FRECUENCIA IDENTIFICADA EN ESTE INSTRUMENTACIÓN RESPECTO A LA IDENTIFICADA CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

fidB/fidA	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
R = 2	Ah			1.00						0.98
	Cu	0.99	1.00	1.00						1.02
	Hu	1.01	1.00	1.00						0.99
	Me	1.01	1.00							1.14
	Mi	1.03	1.00	1.00						1.04
	Ta	1.01	1.00	1.00						1.03
R = 5	Ah			1.00						
	Cu	1.07	0.99	1.00						0.95
	Hu	1.02	1.00	1.00						0.95
	Me	1.05	1.01							0.98
	Mi	1.13	1.00	1.00						1.01
	Ta	1.08	1.00	1.00						0.94
R = 8	Ah			1.00						0.84
	Cu	1.04	0.98							1.03
	Hu	1.03	1.01	1.00						0.89
	Me	1.03		1.00						1.01
	Mi	1.06	1.01							1.00
	Ta	1.09	1.00	1.00						0.86

TABLA B. 50: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN A

COMPARACIÓN AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO EN ESTA INSTRUMENTACIÓN RESPECTO AL IDENTIFICADO CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

β_{idB}/β_{idA}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah			1.01						1.08
	Cu	0.94	1.03	1.00						0.97
	Hu	1.10	1.04	1.00						1.13
	Me	1.00	1.01							1.08
	Mi	0.98	1.01	1.00						1.10
	Ta	1.01	1.00	1.00						1.06
R = 5	Ah			1.02						
	Cu	0.81	1.03	1.00						0.83
	Hu	1.07	1.04	1.00						0.59
	Me	1.31	0.99							0.82
	Mi	0.81	1.05	1.02						0.89
	Ta	1.04	1.02	1.00						0.87
R = 8	Ah			1.02						1.21
	Cu	1.06	1.05							1.18
	Hu	1.14	1.08	1.00						1.36
	Me	1.13		1.01						1.04
	Mi	0.81	1.10							1.49
	Ta	1.13	1.03	1.00						1.81

TABLA B. 51: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN A

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

DispFM	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	
R = 2	Ah			0.35						0.95
	Cu	1.00	0.98	0.53						0.61
	Hu	1.00	0.99	0.99						0.68
	Me	1.00	0.99	0.73						0.90
	Mi	1.00	0.98	0.44						0.59

	Ta	1.00	0.99	0.48	0.64
R = 5	Ah			0.50	
	Cu	0.90	0.75	0.39	0.51
	Hu	0.99	0.96	0.80	0.77
	Me	0.99	0.51	0.37	0.81
	Mi	0.97	0.74	0.74	0.73
	Ta	0.96	0.86	0.47	0.68
R = 8	Ah			0.37	0.94
	Cu	0.93	0.52	0.46	0.73
	Hu	0.95	0.18	0.55	0.51
	Me	0.98		0.20	0.92
	Mi	0.91	0.55	0.50	0.80
	Ta	0.93	0.58	0.19	0.57

TABLA B. 52: DISPERSIÓN FORMAS MODALES. CASO 2. INSTRUMENTACIÓN A

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL.

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$), para el modo $n^{\circ}1$.

Modo 1 - Resul24 - Caso2

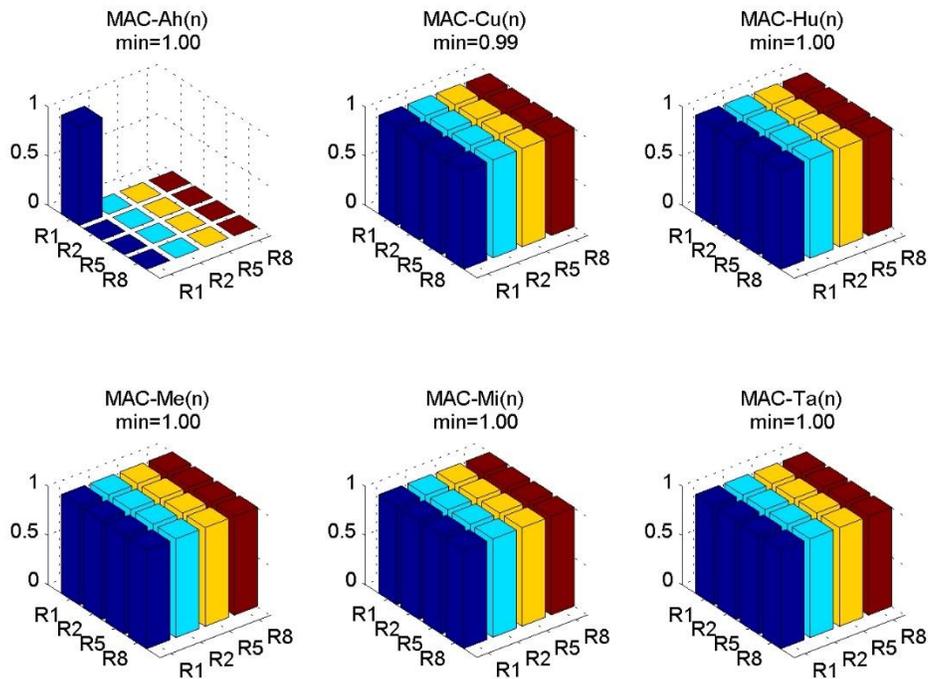


FIGURA B. 18: MAC INSTRUMENTACIÓN B – MODO 1

B.5.2.3 INSTRUMENTACIÓN C.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR FRECUENCIA ELÁSTICA.

fid/fel	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00		1.00				1.00	
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	0.98
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	0.98
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	0.98
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	0.98
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	0.98
R = 2	Ah			0.98						0.97	
	Cu	0.95	0.93	0.99			0.94			0.96	0.98
	Hu	0.96	0.98	0.99		0.98				1.08	0.98
	Me	0.95	0.98	0.99		0.98		0.98			0.98
	Mi	0.95	0.97	0.99						1.08	
	Ta	0.96	0.96	0.99			0.90			1.02	0.98
R = 5	Ah			0.98							
	Cu	0.94	0.91	0.99						0.81	
	Hu	0.98	0.94	0.99							0.98
	Me	0.94	0.92	0.99			0.95	0.98			0.98
	Mi	0.96	0.92	0.99						0.91	
	Ta	0.98	0.94	0.99			0.95			0.74	0.98
R = 8	Ah			0.98			0.92				
	Cu	0.98	0.91	0.99			0.92			0.84	0.98
	Hu	0.99	0.92	1.00							
	Me	0.82	0.88	0.98				0.97		0.71	
	Mi	1.02	0.88	0.99						0.65	
	Ta	1.01	0.92	0.99						0.62	

TABLA B. 53: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN B

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADOS POR AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO.

β_{id}/β_{el}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16
R = 1	Ah	1.01	1.00	0.99		0.99				0.99	
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.96
	Hu	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99		0.99	0.97
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.97
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.96
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99	0.97
R = 2	Ah			1.12						1.26	
	Cu	4.45	1.68	1.04			0.90			0.69	0.94
	Hu	3.95	1.87	1.02		1.14				0.41	0.95

	Me	4.41	2.24	1.06	1.11	0.97			0.93
	Mi	4.28	2.03	1.04				0.51	
	Ta	4.76	1.83	1.02		0.90		0.64	0.93
R = 5	Ah			1.29					
	Cu	7.42	2.09	1.04				0.78	
	Hu	6.36	2.40	1.04					0.95
	Me	6.12	2.64	1.30		1.10	0.84		0.93
	Mi	6.66	2.60	1.08				0.56	
	Ta	8.15	2.29	1.06		0.74		0.66	0.93
R = 8	Ah			1.39		1.62			
	Cu	8.32	2.48	1.05		0.75		0.60	0.92
	Hu	8.18	2.76	1.12					
	Me	8.10	3.27	1.18			1.00	0.89	
	Mi	7.67	2.83	1.08				0.39	
	Ta	9.48	2.72	1.08				0.79	

TABLA B. 54: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADAS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN B

COMPARACIÓN FRECUENCIA IDENTIFICADA EN ESTE INSTRUMENTACIÓN RESPECTO A LA IDENTIFICADA CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

fidC/fidA	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00		1.00				1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
R = 2	Ah			0.99						0.99
	Cu	0.97	0.98	1.00						1.01
	Hu	1.01	1.01	1.00		1.00				1.07
	Me	0.99	1.02			0.99				
	Mi	1.01	1.01	1.00						1.10
	Ta	1.00	1.00	1.00						0.98
R = 5	Ah			1.00						
	Cu	0.96	0.96	1.00						0.82
	Hu	1.03	0.99	1.00						
	Me	1.04	0.99							
	Mi	1.06	0.99	1.00						0.95
	Ta	1.04	0.99	1.00						0.72
R = 8	Ah			1.01						
	Cu	0.96	0.96							0.94
	Hu	1.04	0.98	1.01						
	Me	0.97		1.00				1.01		0.99
	Mi	1.06	0.98							0.72
	Ta	1.15	0.98	1.00						0.64

TABLA B. 55: FRECUENCIAS NORMALIZADAS IDENTIFICADAS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN B

COMPARACIÓN AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO EN ESTA INSTRUMENTACIÓN RESPECTO AL IDENTIFICADO CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

β_{idC}/β_{idA}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.01	1.00	1.00		1.00				1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah			1.01						0.81
	Cu	0.83	1.00	1.02						0.67
	Hu	0.91	1.12	0.99		1.10				0.43
	Me	0.87	1.02			1.05				
	Mi	0.89	1.17	1.01						0.50
	Ta	0.96	1.00	0.99						0.61
R = 5	Ah			1.08						
	Cu	0.78	0.97	0.99						0.67
	Hu	0.81	0.95	0.98						
	Me	0.94	0.80							
	Mi	0.71	1.07	1.01						0.44
	Ta	0.86	0.86	0.99						0.57
R = 8	Ah			1.11						
	Cu	0.89	0.91							0.63
	Hu	0.80	0.87	1.02						
	Me	0.96		1.02				0.92		0.47
	Mi	0.68	1.04							0.43
	Ta	0.88	0.80	0.99						1.17

FIGURA B. 19: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN B

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

dispFM	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16	
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00		1.00				1.00		
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00
R = 2	Ah			0.99							0.80	
	Cu	1.00	0.62	0.24			0.87			0.00	0.41	
	Hu	1.00	0.82	0.86		0.35				0.78	0.94	
	Me	1.00	0.82	0.54		0.18		0.16			0.33	
	Mi	1.00	0.85	0.38						0.82		

	Ta	1.00	0.91	0.91	0.08	0.15	0.47	
R = 5	Ah			0.79				
	Cu	1.00	0.79	0.66		0.07		
	Hu	1.00	0.88	0.77			0.38	
	Me	1.00	0.96	0.75	0.16	0.18	0.27	
	Mi	0.99	0.76	0.73			0.35	
	Ta	1.00	0.88	0.18	0.85		0.42	0.20
R = 8	Ah			0.90	0.81			
	Cu	0.99	0.88	0.19	0.75		0.20	0.67
	Hu	0.99	0.94	0.20				
	Me	0.98	0.87	0.77		0.16	0.71	
	Mi	0.98	0.75	0.81			0.78	
	Ta	0.98	0.87	0.80			0.68	

FIGURA B. 20: DISPERSIÓN FORMAS MODALES. INSTRUMENTACIÓN B.

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal (R = 1, 2, 5, y 8), para el modo n°1.

Modo 16 - Result4 - Caso2

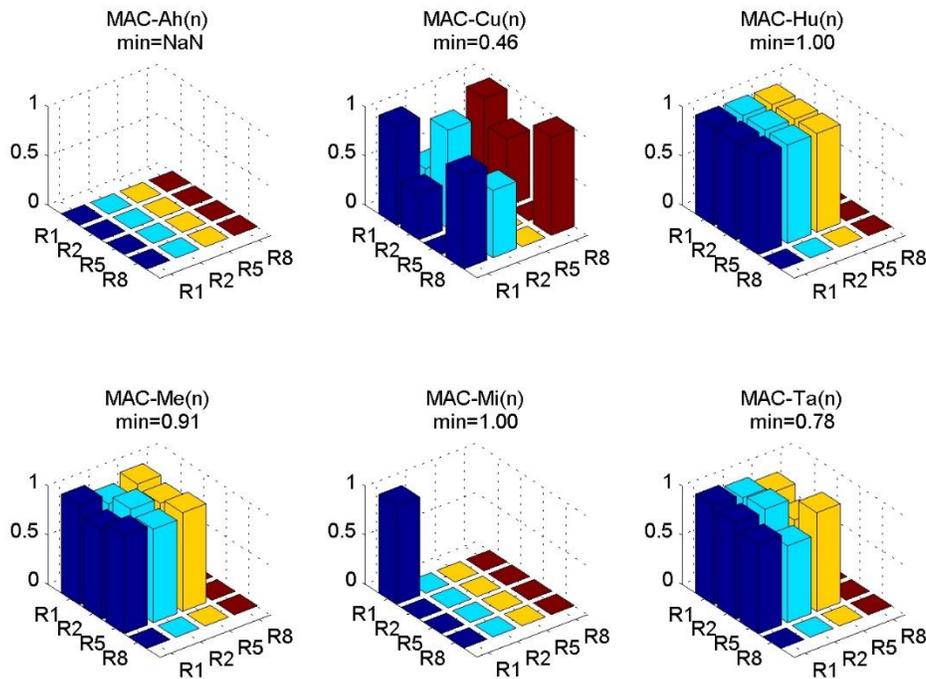


FIGURA B. 21: MAC INSTRUMENTACIÓN C – MODO 16

B.5.2.4 INSTRUMENTACIÓN D.

FRECUENCIAS IDENTIFICADAS NORMALIZADAS POR FRECUENCIA ELÁSTICA.

fid/fel	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00			1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	0.99	0.96				0.96			0.96
	Cu	0.93	0.95				0.96			0.98
	Hu	0.95	0.96	1.00			0.95			0.95
	Me	0.94	0.94				0.95			0.96
	Mi	0.93	0.94				0.94			1.01
	Ta	0.94	0.94				0.93			1.01
R = 5	Ah						0.91			1.04
	Cu	0.90	0.93				0.98			1.09
	Hu	0.93	0.94				0.94			0.94
	Me	0.91	0.94				0.84			
	Mi	0.87	0.92				0.85			
	Ta	0.92	0.93				0.97			1.02
R = 8	Ah			0.91			0.89			1.07
	Cu	0.88	0.91				0.98			
	Hu	0.91	0.93				0.92			
	Me	0.85	0.91				0.80			
	Mi	0.81	0.90				0.88			1.02
	Ta	0.91	0.93				0.98			

TABLA B. 56: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN D

AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS NORMALIZADOS POR AMORTIGUAMIENTO ELÁSTICO.

β_{id}/β_{el}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	0.99			0.99	0.98		0.99
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99		0.99
R = 2	Ah	8.83	3.16				1.32			1.89
	Cu	4.29	1.92				0.97			0.69
	Hu	3.50	1.78	1.53			0.98			0.82

	Me	4.31	2.77		0.94	0.72
	Mi	4.06	1.91		0.94	0.57
	Ta	4.30	1.81		0.96	0.72
R = 5	Ah				2.06	1.36
	Cu	6.52	1.99		0.99	0.43
	Hu	5.42	2.35		0.95	1.04
	Me	5.52	2.24		0.74	
	Mi	6.42	2.08		0.72	
	Ta	7.28	2.26		0.93	0.60
R = 8	Ah			3.43	1.98	1.14
	Cu	7.11	2.03		1.05	
	Hu	7.15	2.53		0.90	
	Me	7.04	2.34		0.69	
	Mi	7.94	2.57		0.81	0.58
	Ta	8.89	2.37		0.96	

TABLA B. 57: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADAS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN D

COMPARACIÓN FRECUENCIA IDENTIFICADA EN ESTE INSTRUMENTACIÓN RESPECTO A LA IDENTIFICADA CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

fidD/fidA	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00			1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	1.02					1.00			0.98
	Cu	0.96	1.00							1.03
	Hu	0.99	0.99	1.00						0.94
	Me	0.98	0.98							0.99
	Mi	1.00	0.98							1.04
	Ta	0.98	0.98							0.97
R = 5	Ah									1.14
	Cu	0.91	0.98							1.10
	Hu	0.98	0.99							0.86
	Me	1.00	1.01							
	Mi	0.96	0.99							
	Ta	0.97	0.98							0.98
R = 8	Ah			0.93						0.96
	Cu	0.86	0.96							
	Hu	0.95	0.99							
	Me	1.01								
	Mi	0.85	1.00							1.13
	Ta	1.03	0.99							

TABLA B. 58: FRECUENCIAS IDENTIFICADAS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN D

COMPARACIÓN AMORTIGUAMIENTO IDENTIFICADO EN ESTA INSTRUMENTACIÓN RESPECTO AL IDENTIFICADO CON MAYOR CANTIDAD DE SENSORES.

β_{idD}/β_{idA}	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00			1.00	0.99		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	0.88					1.21			1.20
	Cu	0.80	1.14							0.66
	Hu	0.81	1.07	1.49						0.85
	Me	0.85	1.26							0.67
	Mi	0.85	1.10							0.56
	Ta	0.87	0.98							0.69
R = 5	Ah									0.93
	Cu	0.69	0.92							0.38
	Hu	0.69	0.93							0.67
	Me	0.85	0.68							
	Mi	0.69	0.85							
	Ta	0.77	0.85							0.53
R = 8	Ah			2.74						0.79
	Cu	0.76	0.75							
	Hu	0.70	0.79							
	Me	0.84								
	Mi	0.70	0.94							0.65
	Ta	0.83	0.70							

TABLA B. 59: AMORTIGUAMIENTOS IDENTIFICADOS. CASO 2 INSTRUMENTACIÓN D

DISPERSIÓN DE FORMAS MODALES.

dispFM	Modo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R = 1	Ah	1.00	1.00	1.00			1.00	1.00		1.00
	Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Hu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Me	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Mi	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	Ta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
R = 2	Ah	1.00	0.96				0.98			0.80
	Cu	1.00	0.91				0.95			0.54
	Hu	1.00	0.90	0.68			0.69			0.73
	Me	1.00	0.88				0.97			0.36
	Mi	1.00	0.91				0.81			0.93

	Ta	1.00	0.96	0.93	0.76
R = 5	Ah			0.87	0.79
	Cu	1.00	0.69	0.72	0.90
	Hu	1.00	0.92	0.84	0.66
	Me	1.00	0.96	0.93	
	Mi	1.00	0.93	0.92	
	Ta	1.00	0.98	0.77	0.84
R = 8	Ah		0.98	0.80	0.77
	Cu	1.00	0.83	0.78	
	Hu	1.00	0.98	0.84	
	Me	0.99	0.89	0.92	
	Mi	1.00	0.91	0.92	0.99
	Ta	1.00	0.88	0.85	

TABLA B. 60: DISPERSIÓN FORMAS MODALES. CASO 2. INSTRUMENTACIÓN D.

PERDIDA DE CONSISTENCIA DE FORMA MODAL PROMEDIO AL INCURSIONAR EN RANGO NO LINEAL

El diagrama presenta el valor de la función MAC entre las formas modales promedio de cada proceso con distinta incursión en el rango no lineal ($R = 1, 2, 5, \text{ y } 8$), para el modo $n^{\circ}9$.

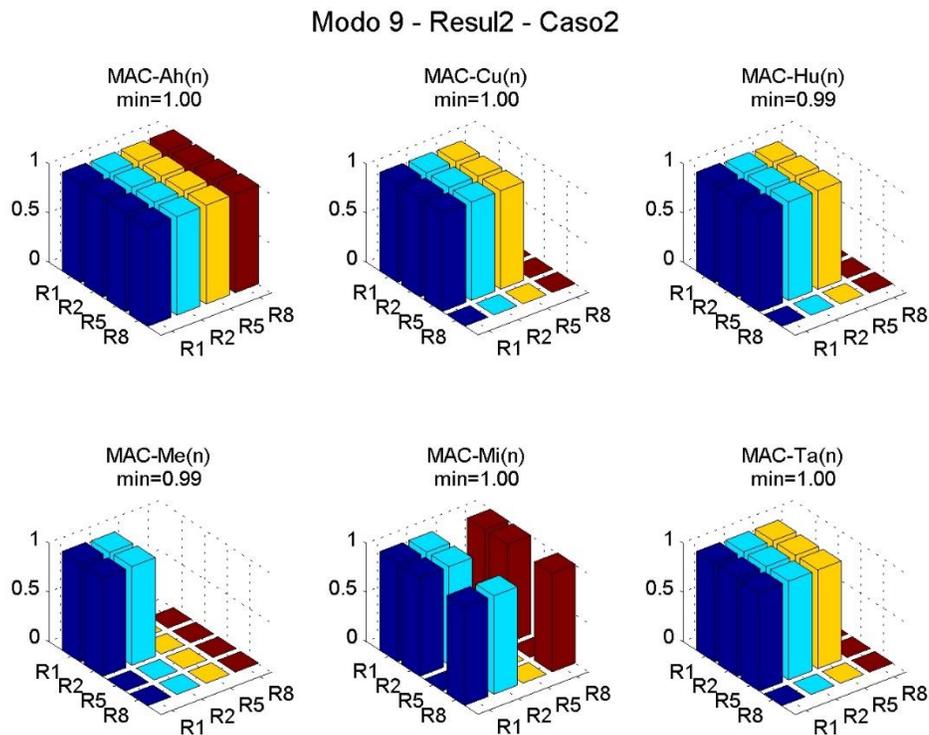


FIGURA B. 22: MAC INSTRUMENTACIÓN D – MODO 9