

# **LOCALIZACIÓN DE DAÑO ESTRUCTURAL MEDIANTE UN ENFOQUE BASADO EN SUBESTRUCTURAS**

**Unai Ugalde Murgoitio**

*Supervisado por:*

Dr. Aitzol Iturrospe Iregui  
Dr. Javier Anduaga Salvatierra



*para la obtención del grado de Doctor  
bajo el programa de doctorado de la Universidad de Mondragon:  
Mecánica y Energía Eléctrica.*

*Febrero 2017*



# Agradecimientos

*Me gustaría agradecer en estas líneas a todas las personas que han contribuido en este trabajo.*

*Lehenik eta behin nire gainbegirale izan diren Javier Anduaga eta Aitzol Iturrosperi eskerrak ematea gustatuko litzaidake, etapa luze honetan gidatu eta sostengatu izanagatik. Zuen laguntzak asko aberastu nau, bai teknikoki eta bai pertsonalki.*

*Me gustaría mostrarles mi gratitud a los miembros del tribunal por las contribuciones realizadas y por haber aceptado la invitación de presidir la lectura de esta tesis doctoral.*

*Ikerlaneko lankide guztiei ere eskerrik asko, plazerra izan baita egunero lanera etortzea. Ezin ahaztu Komunikazio, eta batez ere PIZUko lankide ohiak, mutil gazte hura horren ondo hartu eta tratatzeagatik. Eta zer esan Sentsore Aurreratuak eta Kontrola eta Monitorizazioko lankideei buruz, bertan tesia garatzea pribilegio bat izan da. Aipamen berezia Fernando Martínezi, tesia egiteko aukera eman izanagatik eta Nerea eta Juleni, zuon onena emateagatik, gradu zein master bukaerako proiektuetan, tesi honen mesedetan.*

*Ikerlan enpresa bat baino gehiago delako, ezin ahaztu azken urteetan bertan ezagutu ditudan pertsonak, lankide soil izatetik lagun handiak izatera pasa diren horiek. Horien artean, “peña tuper” (Ana, Ekaitz, Ekhi, Erkuden, Garbiñe, Ibai, Imanol, Nerea, Peio, Urko, Zorione, Jon...), L3 ko gelakideak (Mario, Mikel, Mireia,...), kirol arloko bidelagunak (Aitor, Damian, Luis, Nico...) edo pintxopote zein beste momentu askotan hor egon diren lagunak (Fer, Gabri, Gustavo, Lucia, Paloma, Pedro...).*

*Kirkilak lagun taldeari ere eskerrak, ia jaio berriak ginean ezagutu ginelako eta ordutik hona urte asko pasa diren arren, lagun izaten jarraitzen dugulako, eta nola ez, lagun izaten jarraituko dugulako.*

*Azkenik, eskerrik beroenak etxekoei, borondate onenarekin niregatik egindako sakrifizio eta lan guztiagatik. Eskerrik asko ama, aita eta Itsaso.*



*“Sólo aquellos que se arriesgan a ir muy lejos, pueden llegar a saber lo lejos que pueden ir.”*

**Thomas Stearns Eliot**



# Resumen

El trabajo realizado en esta tesis doctoral se centra en la monitorización de estructuras, focalizándose el trabajo en la búsqueda de una forma eficaz y económica de localizar los posibles daños que puedan originarse en las mismas. Para ello se propone un método de localización de daño que aísla subestructuras dentro de la estructura, monitorizando cada una de estas subestructuras por separado. Asimismo, se propone otro método de localización de daño que monitoriza subestructuras con un número menor de sensores.

El primer método de localización de daño propuesto aísla las subestructuras y representa la dinámica de las subestructuras mediante modelos VARX, siendo el daño localizado dentro de las subestructuras mediante el análisis de estos modelos. El método propuesto se basa únicamente en la información proporcionada por acelerómetros colocados en la subestructura, no siendo necesario medir las fuerzas que se transmiten a la misma. Asimismo, no es necesario conocer el modelo del comportamiento dinámico de la estructura para localizar el daño.

A fin de disminuir el número de sensores necesarios para la localización de daño en las subestructuras aisladas, se ha propuesto un segundo método de localización de daño, que monitoriza las subestructuras con un conjunto reducido de sensores. Para localizar daño dentro una subestructura, se analizan cambios de conectividad entre sus grados de libertad medidos. La conectividad es analizada mediante la causalidad de Granger multivariable condicional.

El trabajo ha sido orientado hacia la industria eólica *offshore*, focalizándose en la monitorización de subestructuras marinas tipo *jacket*. Ambos métodos de localización de daño han sido evaluados en una estructura de dinámica unidimensional. Posteriormente, se ha evaluado el primer método de localización de daño en una estructura de celosía.





# Índice de contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice de contenido</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de acrónimos</b> .....	<b>xv</b>
<b>Lista de símbolos</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Industria eólica offshore .....	2
1.2 Estado del arte sobre la monitorización de salud estructural .....	11
1.2.1 Métodos de identificación de daño estructural .....	13
1.2.2 Métodos de posicionamiento óptimo y reducción de sensores ....	25
1.2.3 Conclusiones del estado del arte .....	27
1.3 Hipótesis.....	29
1.4 Objetivos .....	29
1.5 Contribuciones .....	30
1.6 Estructura del documento .....	30
1.7 Publicaciones .....	31
<b>2 Método de localización de daño estructural</b> .....	<b>33</b>
2.1 Introducción .....	34
2.2 Desarrollo analítico del método de localización de daño.....	35
2.3 Evaluación numérica del método de localización de daño .....	38
2.3.1 Modelado de la subestructura en VARX .....	38
2.3.2 Aplicación del método en el modelo de parámetros concentrados	42
2.3.3 Resultados numéricos .....	44
2.4 Evaluación experimental del método de localización de daño .....	45

2.4.1	Diseño y validación del banco de ensayos .....	45
2.4.2	Aplicación del método en el banco de ensayos .....	48
2.4.3	Resultados experimentales .....	50
2.5	Análisis comparativo entre el método SHM propuesto y dos métodos de substructuring de referencia.....	53
2.5.1	Método de detección de daño basado en modelos ARMAX .....	53
2.5.2	Método de localización de daño basado en observadores Bayesianos .....	56
2.5.3	Conclusiones del análisis comparativo.....	58
2.6	Conclusiones .....	58
<b>3</b>	<b>Método de localización de daño estructural con medidas incompletas.....</b>	<b>61</b>
3.1	Introducción.....	62
3.2	Monitorización de estructuras con medidas incompletas .....	63
3.2.1	Causalidad de Granger multivariable .....	63
3.2.2	Método de localización de daño con medidas incompletas .....	67
3.3	Evaluación numérica del método de localización de daño .....	68
3.3.1	Aplicación del método en el modelo de elementos finitos .....	68
3.3.2	Resultados numéricos .....	69
3.4	Evaluación experimental del método de localización de daño .....	72
3.4.1	Aplicación del método en el banco de ensayos .....	73
3.4.2	Resultados experimentales .....	73
3.5	Conclusiones .....	76
<b>4</b>	<b>Localización de daño en una estructura de celosía .....</b>	<b>77</b>
4.1	Introducción.....	78
4.2	Diseño y validación del banco de ensayos de celosía.....	79
4.2.1	Descripción del banco de ensayos .....	79
4.2.2	Validación del banco de ensayos.....	80
4.3	Evaluación numérica del método de localización de daño .....	82
4.3.1	Modelado de la subestructura en VARX .....	82
4.3.2	Aplicación del método en el modelo de elementos finitos de vigas.....	87
4.3.3	Resultados numéricos .....	88
4.4	Evaluación experimental del método de localización de daño .....	89
4.4.1	Aplicación del método en el banco de ensayos .....	89
4.4.2	Resultados experimentales .....	91
4.5	Conclusiones .....	92

<b>5</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras.....</b>	<b>93</b>
5.1	Conclusiones .....	95
5.2	Líneas futuras.....	96
<b>6</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>98</b>



## Lista de figuras

<b>Figura 1.1:</b> Inversiones anuales en energías renovables [Lins,2014].....	2
<b>Figura 1.2:</b> Crecimiento de la capacidad energética renovable instalada [Lins,2014] .....	3
<b>Figura 1.3:</b> Coste de producción de energía renovable y no renovable [Lins,2014] .....	4
<b>Figura 1.4:</b> Capacidad energética eólica anual instalada (GW) en Europa[Corbetta,2016] .....	5
<b>Figura 1.5:</b> Capacidad energética eólica onshore y offshore anual instalada (MW) en Europa...	6
<b>Figura 1.6:</b> Componentes de un aerogenerador offshore [Association,2013] .....	6
<b>Figura 1.7:</b> Principales tipos de subestructuras marinas en la actualidad [Berger,2013].....	7
<b>Figura 1.8:</b> Estructura de costes de la puesta en marcha y explotación de aerogeneradores.....	8
<b>Figura 1.9:</b> Niveles SHM propuestos por Sikorska (adaptado de [Sikorska,2011]).....	12
<b>Figura 1.10:</b> Metodología para la monitorización de un aerogenerador marino [Fritzen,2008]	13
<b>Figura 2.1:</b> Modelo 1D de parámetros concentrados y subestructura aislada.....	39
<b>Figura 2.2:</b> Error de estimación medio modelo VARX en función del número de muestras.....	43
<b>Figura 2.3:</b> Modelo EF y banco de ensayos 1D .....	46
<b>Figura 2.4:</b> Forma modal de los primeros cinco modos (modelo EF 1D) .....	47
<b>Figura 2.5:</b> Forma modal de los cinco modos experimentales (banco de ensayos 1D).....	48
<b>Figura 2.6:</b> Error de estimación medio modelo VARX en función del número de muestras.....	49
<b>Figura 2.7:</b> Error de estimación medio modelo VARX en función del número de muestras.....	50
<b>Figura 2.8:</b> Modelo 1D de parámetros concentrados y subestructuras 1.1 y 1.2.....	53
<b>Figura 2.9:</b> Resultados de detección de daño (método basado en modelos ARMAX [Xing,2012],sub 1.1) .....	55
<b>Figura 2.10:</b> Resultados de detección de daño (método basado en modelos ARMAX [Xing,2012],sub 1.2) .....	55
<b>Figura 3.1:</b> Modelo EF del banco de ensayos 1D .....	68
<b>Figura 3.2:</b> Grafo de causalidad de Granger condicional (modelo EF 1D) .....	70

<b>Figura 3.3:</b> Conectividad entre GDL $z_{3x}$ y $z_{5x}$ (sensor retirado en planta 4, daño del 50 %, modelo EF 1D).....	70
<b>Figura 3.4:</b> Conectividad entre GDL $z_{3x}$ y $z_{5x}$ (sensor retirado en planta 4, daño del 25 %, modelo EF 1D).....	71
<b>Figura 3.5:</b> Conectividad entre GDL $z_{3x}$ y $z_{5x}$ (sensor retirado en planta 4, daño del 12,5 %, modelo EF 1D).....	71
<b>Figura 3.6:</b> Banco de ensayos 1D .....	72
<b>Figura 3.7:</b> Grafo de causalidad de Granger condicional (banco de ensayos 1D) .....	73
<b>Figura 3.8:</b> Conectividad entre GDL $z_{3x}$ y $z_{5x}$ (sensor retirado en planta 4, daño del 50 %, banco de ensayos).....	74
<b>Figura 3.9:</b> Conectividad entre GDL $z_{3x}$ y $z_{5x}$ (sensor retirado en planta 4, daño del 25 %, banco de ensayos).....	74
<b>Figura 3.10:</b> Conectividad entre GDL $z_{3x}$ y $z_{5x}$ (sensor retirado en planta 4, daño del 12,5 %, banco de ensayos).....	75
<b>Figura 4.1:</b> Banco de ensayos de celosía.....	79
<b>Figura 4.2:</b> Modelo EF del banco de ensayos de celosía.....	80
<b>Figura 4.3:</b> Forma modal de los 10 primeros modos (modelo EF de barras).....	81
<b>Figura 4.4:</b> Modelo EF de celosía y subestructura aislada .....	83
<b>Figura 4.5:</b> Composición de la matriz $A_1$ .....	85
<b>Figura 4.6:</b> Composición de la matriz $B_1$ .....	85
<b>Figura 4.7:</b> Error de estimación medio modelo VARX en función del número de muestras.....	87
<b>Figura 4.8:</b> Error de estimación medio modelo VARX en función del número de muestras.....	90

## Lista de tablas

<b>Tabla 2.1:</b> Elementos de las matrices $A_1$ y $B_1$ analizados .....	41
<b>Tabla 2.2:</b> Escenarios evaluados en la localización de daño .....	43
<b>Tabla 2.3:</b> Resultados de localización de daño (modelo 1D parámetros concentrados).....	44
<b>Tabla 2.4:</b> Comparación modal (modelo EF y modelo 1D parámetros concentrados).....	46
<b>Tabla 2.5:</b> Comparación modal (banco de ensayos y modelo EF 1D) .....	48
<b>Tabla 2.6:</b> Resultados de localización de daño (modelo EF 1D).....	51
<b>Tabla 2.7:</b> Resultados de localización de daño (banco de ensayos 1D).....	52
<b>Tabla 2.8:</b> Resultados de localización de daño (método basado en EKF [Koh,1991]) .....	57
<b>Tabla 3.1:</b> Combinaciones analizadas con MVCG .....	69
<b>Tabla 3.2:</b> Resultados localización de daño (sensor retirado planta 4, modelo EF 1D).....	71
<b>Tabla 3.3:</b> Resultados localización de daño (sensor retirado planta 4, banco de ensayos 1D) ..	75
<b>Tabla 4.1:</b> Frecuencias naturales del banco de ensayos de celosía .....	81
<b>Tabla 4.2:</b> Comparación modal (banco de ensayos respecto a modelos EF de barras y vigas) ..	82
<b>Tabla 4.3:</b> Elementos de las matrices $A_1$ y $B_1$ analizados (modelo EF de celosía).....	86
<b>Tabla 4.4:</b> Escenarios evaluados en la localización de daño (modelo EF de vigas).....	88
<b>Tabla 4.5:</b> Resultados de localización de daño (modelo EF de vigas) .....	89
<b>Tabla 4.6:</b> Escenarios evaluados en la localización de daño (banco de ensayos de celosía).....	90
<b>Tabla 4.7:</b> Resultados de localización de daño (banco de ensayos de celosía) .....	91





## Lista de acrónimos

<b>AR</b>	AutoRegressive
<b>ARMA</b>	AutoRegressive Moving Average
<b>ARMAX</b>	AutoRegressive Moving Average with eXogenous inputs
<b>ARX</b>	AutoRegressive with eXogenous inputs
<b>CPSD</b>	Cross Power Spectral Density
<b>DI</b>	Damage Indicator
<b>EFI</b>	Effective Independence
<b>EFI-DPR</b>	Effective Independence Driving Point Residue
<b>EKF</b>	Extended Kalman Filter
<b>ERA</b>	Eigenvalue Realization
<b>EVP</b>	Eigenvalue Vector Product
<b>EWEA</b>	European Wind Energy Association
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FIM</b>	Fisher Information Matrix
<b>FOMI</b>	First Order Model Identification
<b>FRF</b>	Frequency Response Function
<b>GC</b>	Granger Causality
<b>GDL</b>	Grado De Libertad
<b>MAC</b>	Modal Assurance Criterion
<b>EF</b>	Elementos Finitos
<b>MI</b>	Mutual Information
<b>MLS</b>	Multivariate Least Square

<b>MSE</b>	Modal Strain Energy
<b>MU</b>	Model Updating
<b>MVGC</b>	MultiVariate Granger Causality
<b>NDT</b>	Non Destructive Testing
<b>NS</b>	Null Space
<b>OKID</b>	Observer Kalman Filter Identification
<b>OMA</b>	Operational Modal Analysis
<b>OSP</b>	Optimal Sensor Placement
<b>O&amp;M</b>	Operations and Maintenance
<b>PCA</b>	Principal Component Analysis
<b>PSD</b>	Power Spectral Density
<b>PSI</b>	Progressive Structural Identification
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>SEA</b>	Statistical Energy Analysis
<b>SHM</b>	Structural Health Monitoring
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ration
<b>SOMI</b>	Second Order Model Identification
<b>TE</b>	Transfer Entropy
<b>VAR</b>	Vector AutoRegressive
<b>VARX</b>	Vector AutoRegressive with eXogenous inputs

# Lista de símbolos

## Símbolos

$a$	Coeficiente endógeno del modelo autorregresivo
$b$	Coeficiente exógeno del modelo autorregresivo
$c$	Coeficiente de amortiguamiento viscoso (N·s/m)
$F_s$	Frecuencia de muestreo (Hz)
$F_{Y \rightarrow X}$	Causalidad de Granger de Y hacia X
$F_{Y \rightarrow X Z}$	Causalidad de Granger de Y hacia X condicionado en Z
$k$	Coeficiente de rigidez (N/m)
$m$	Masa (kg)
$T_s$	Período de muestreo (s)

## Vectores

$\mathbf{f}$	Fuerza (N)
$\boldsymbol{\omega}$	Velocidad angular (rad/s)
$\mathbf{x}$	Desplazamiento relativo (m)
$\dot{\mathbf{x}}$	Velocidad relativa (m/s)
$\ddot{\mathbf{x}}$	Aceleración relativa (m/s <sup>2</sup> )
$\mathbf{z}$	Desplazamiento absoluto (m)
$\dot{\mathbf{z}}$	Velocidad absoluta (m/s)
$\ddot{\mathbf{z}}$	Aceleración absoluta (m/s <sup>2</sup> )
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Error de predicción del modelo autorregresivo

## Matrices

- A Matriz endógena del modelo autorregresivo
- B Matriz exógena del modelo autorregresivo
- C Matriz de amortiguamiento viscoso
- K Matriz de rigidez
- M Matriz de masa
- P Matriz de covarianza del error del proceso
- R Matriz de covarianza del vector de observación de ruido

# 1

## Introducción

## 1.1 Industria eólica offshore

Se denominan energías renovables a aquellas formas de energía que se obtienen de fuentes inagotables, bien sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o por su capacidad de regeneración mediante medios naturales [Casas,2007]. Las energías renovables son fuentes de abastecimiento energético respetuosas con el medio ambiente, siendo las más relevantes la energía hidroeléctrica [Deane,2010], la geotérmica [Boyd,2016], la solar [Sahoo,2016], la eólica [Kaldellis,2011], la biomasa [Kumar,2015] y los biocarburantes [Altieri,2000].

El sector de las energías renovables comenzó a desarrollarse a mediados de la década de los 70 impulsado por países como Estados Unidos, Alemania, Dinamarca o España. Sin embargo, no ha sido hasta esta última década cuando el sector de las energías renovables se ha desarrollado y extendido ampliamente por otras regiones del planeta [Lins,2014]. Como se muestra en la Figura 1.1, Estados Unidos y Europa continúan siendo referentes del sector a nivel mundial. No obstante, China se ha consolidado en el sector de las energías renovables, y como se puede ver en la Figura 1.1, en el año 2013 fue el país que más invirtió en este sector.

Durante el período comprendido entre 2004 y 2013, las inversiones en el sector de las energías renovables pasaron de 39,5 millardos de dólares anuales a 214,4, lo cual supone un aumento de las inversiones del 542 %. Las previsiones auguran que el sector seguirá creciendo durante los próximos años y todo parece indicar que se extenderá ampliamente a otras regiones del planeta [Lins,2014].

		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
USA	billion USD	5.7	11.9	28.2	34.5	36.2	23.2	34.7	53.4	39.7	35.8
America (excl. USA and Brazil)	billion USD	1.4	3.4	3.4	5.0	5.6	5.9	11.5	8.7	9.9	12.4
Brazil	billion USD	0.5	2.2	4.2	10.3	12.5	7.9	7.7	9.7	6.8	3.1
Middle East and Africa	billion USD	0.6	0.6	1.2	1.7	2.7	1.7	4.3	3.2	10.4	9.0
Europe	billion USD	19.6	29.4	38.4	61.7	72.9	74.7	102	115	86.4	48.4
India	billion USD	2.4	3.2	5.5	6.3	5.2	4.4	8.7	12.6	7.2	6.1
China	billion USD	2.6	5.8	10.2	15.8	25.0	37.2	36.7	51.9	59.6	56.3
Asia and Oceania (excl. India and China)	billion USD	6.7	8.3	8.9	11.0	11.5	13.2	20.7	25.3	29.5	43.3
<b>Total</b>	billion USD	<b>39.5</b>	<b>64.8</b>	<b>100</b>	<b>146.3</b>	<b>171.6</b>	<b>168.2</b>	<b>226.7</b>	<b>279.6</b>	<b>249.5</b>	<b>214.4</b>

**Figura 1.1:** Inversiones anuales en energías renovables (2004-2013) [Lins,2014]

La inversión realizada en el sector de las energías renovables ha posibilitado un aumento progresivo de la capacidad energética de origen renovable instalada, pasando de los 800 GW instalados en el año 2004 a los 1560 GW del año 2013, aumentándose así la capacidad energética instalada en un 95 % [Lins,2014].

Dentro de los diferentes tipos de energía renovable, los de origen eólico y solar son los que han experimentado una mayor tasa de crecimiento durante la última década (Figura 1.2). En el año 2004 se contaba con una capacidad energética eólica de 48 GW, mientras que la capacidad instalada correspondiente a la energía solar era únicamente de 3 GW. En el año 2013 la capacidad energética eólica instalada se situaba en 318 GW, mientras que la solar en 139 GW. Atendiendo a los datos de capacidad energética instalada en el período 2004-2013, la capacidad eólica aumentó de media un 19,87 % anual, mientras que el aumento anual de la capacidad solar se situó en un 38,5 %.





		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Estimation 2013	
	Solar Photovoltaic	GW	–	35%	32%	40%	44%	36%	48%	44%	29%	28%
	Concentrating Solar Power	GW	–	5%	0%	23%	14%	24%	54%	31%	36%	26%
	Wind Power	GW	–	19%	20%	21%	22%	24%	20%	17%	16%	11%
	Bio Power	GW	–	4%	5%	6%	2%	10%	27%	7%	4%	12%
	Geothermal Power	GW	–	0%	2%	4%	3%	3%	2%	2%	2%	3%
	Hydro Power	GW	–	–	–	–	–	–	–	3%	3%	1%

Figura 1.2: Crecimiento de la capacidad energética renovable instalada (2004-2013) [Lins,2014]

Han sido varios los factores que han contribuido al desarrollo y expansión de las energías renovables. Por una parte, se encuentran las crisis energéticas sufridas desde 1970 y las posteriores recesiones económicas [Barrachina Fernández,2015]. En la década de los 70, los principales países industrializados generaban gran parte de su energía mediante la combustión de petróleo, el cual era importado principalmente desde los países del golfo pérsico. Cuando los productores árabes decidieron embargar la exportación del petróleo a los países que habían proporcionado apoyo a Israel en el conflicto árabe-israelí de 1973, en el que se incluían los Estados Unidos y Europa Occidental, la economía de estos últimos países se tambaleó. Esta crisis, así como las que se produjeron en 1979, 1990 o 2000 evidenció la necesidad de reducir la dependencia del petróleo y por tanto buscar vías alternativas para generar energía.

Por otra parte, el creciente énfasis en la mitigación del cambio climático ha contribuido también a la proliferación de las energías renovables [Lins,2014]. Las nuevas directrices europeas tratan de reducir las emisiones totales de CO<sub>2</sub> respecto a las registradas en 1990 entre un 40 % y 44 % para el año 2030, y entre un 79 % y 82 % para el 2050 [Hewicker,2011]. Para cumplir con estos objetivos será necesario seguir potenciando el sector de las energías renovables.

Durante los últimos años, el coste de producción de las energías renovables ha descendido notablemente, hasta el punto de que algunas técnicas energéticas renovables resultan competitivas en comparación con las técnicas energéticas no renovables (Figura 1.3). Debido a esto, grandes multinacionales como Google, IKEA o Berkshire Hathaway han realizado grandes inversiones en el sector, potenciando aún más su desarrollo.

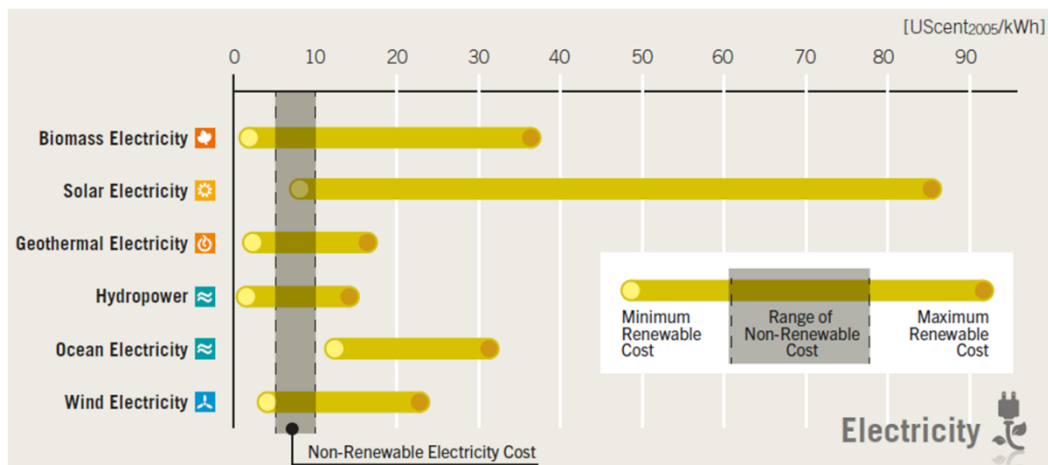


Figura 1.3: Coste de producción de energía renovable y no renovable [Lins,2014]

Analizando los datos mundiales correspondientes a la inversión realizada en las energías renovables (Figura 1.1), a la capacidad energética renovable instalada (Figura 1.2) y al coste de producción de las energías renovables (Figura 1.3), se puede concluir que la energía eólica es una de las energías renovables con mejores expectativas. En Europa, el sector eólico cobra aún un mayor protagonismo, ya que en el año 2015 el 57,5 % de la capacidad energética renovable instalada correspondía a la tecnología eólica [Corbetta,2016]. La Figura 1.4 muestra la evolución experimentada por el sector eólico europeo durante el período 2000-2015, donde se ha cuadruplicado la capacidad energética eólica anual instalada, pasando de 3,2 GW a 12,8 GW.



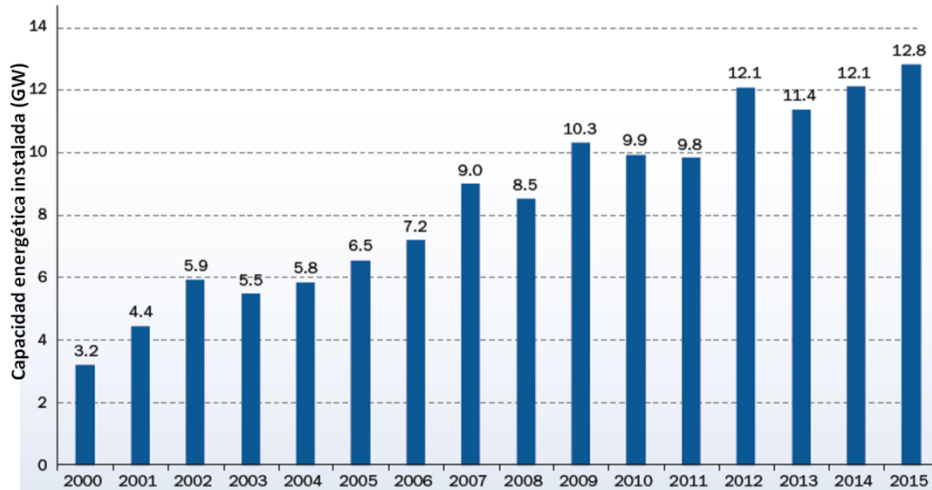
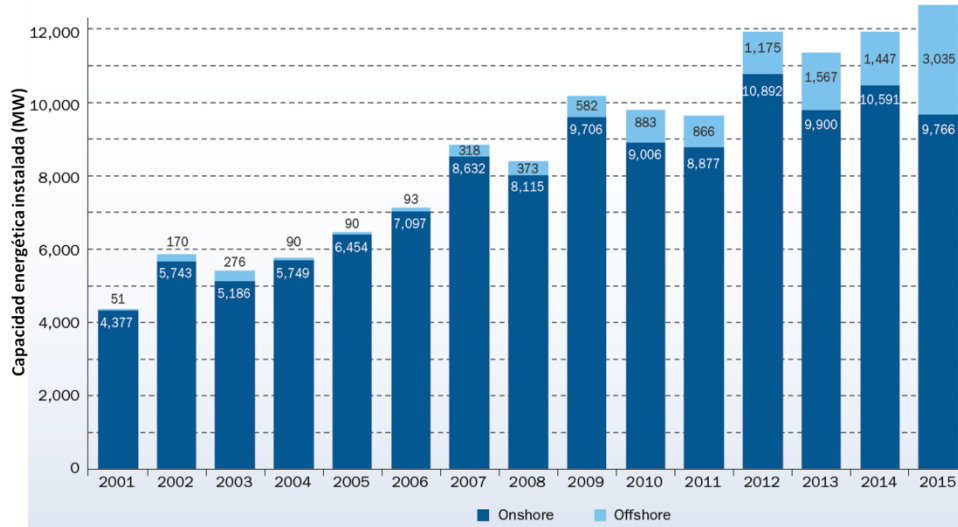


Figura 1.4: Capacidad energética eólica anual instalada (GW) en Europa (2000-2015)[Corbetta,2016]

El sector eólico actual se compone de aerogeneradores *onshore* y *offshore*. Los aerogeneradores de tierra firme (*onshore wind turbines*) comienzan a ser empleados a partir de la década de los 80 [Hemami,2011]. A principios de la década de los 90 surge la energía eólica *offshore* [Dyre,1992]. Esta se refiere a los parques eólicos construidos en el mar. En el año 2015, la capacidad energética *offshore* instalada en Europa ascendía a 11,027 GW, mientras que la *onshore* se situaba en 130,057 GW, lo cual equivale a un 7,8 % frente a un 92,2 %.

A pesar de que la mayor parte de la energía eólica se siga generando mediante aerogeneradores *onshore*, es preciso indicar que, de la nueva capacidad energética eólica instalada en Europa, una parte cada vez mayor corresponde al sector *offshore* (Figura 1.5).



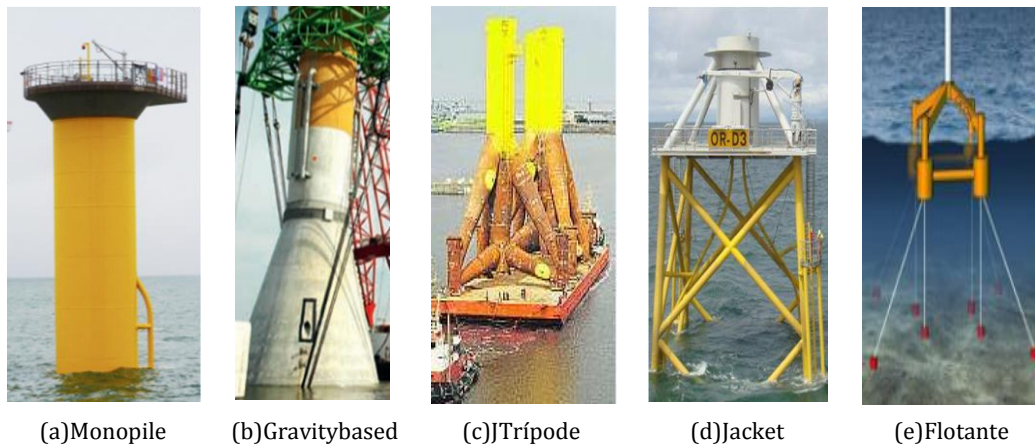
**Figura 1.5:** Capacidad energética eólica onshore y offshore anual instalada (MW) en Europa (2000-2015)[Ho,2016]

Mientras que, desde el punto de vista estructural, los aerogeneradores *onshore* están formados principalmente por una góndola, una torre y las correspondientes palas, los aerogeneradores *offshore* tienen además de los mencionados componentes, una subestructura marina (Figura 1.6).



**Figura 1.6:** Componentes de un aerogenerador offshore [Association,2013]

La Figura 1.7 muestra los principales tipos de subestructuras marinas existentes en la actualidad [Berger,2013]. Por norma general, las subestructuras tipo *monopile*, *gravity-based* y trípode suelen ser empleadas únicamente en aguas cuya profundidad no supere los 30 m. En el resto de los casos, se suelen emplear subestructuras tipo *jacket* o subestructuras flotantes.

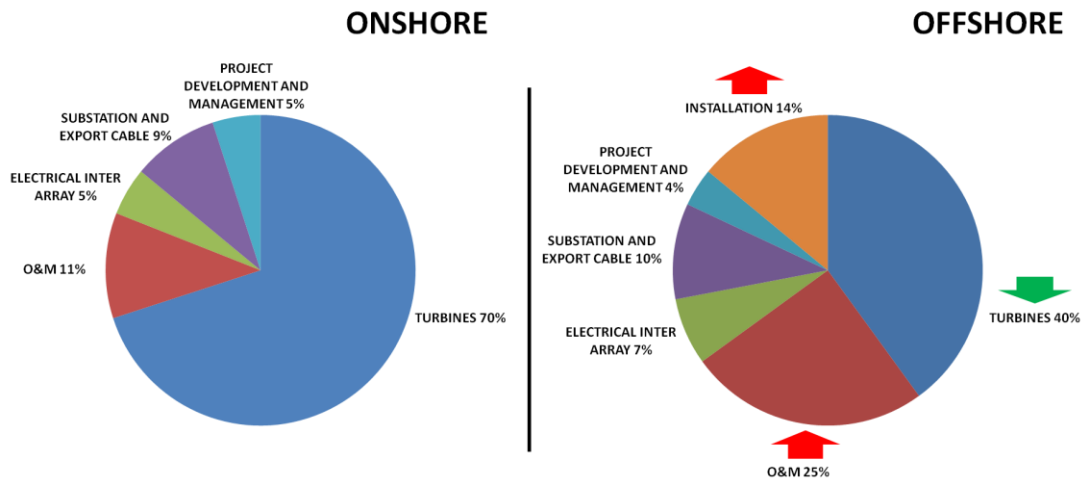


**Figura 1.7:** Principales tipos de subestructuras marinas en la actualidad [Berger,2013]

Los aerogeneradores *offshore* presentan una serie de ventajas respecto a los *onshore*. En [Haluzan,2011] se concluye que para el mismo modelo de turbina, los aerogeneradores *offshore* pueden llegar a generar hasta un 40 % más de energía que los *onshore*. Por otra parte, los parques de aerogeneradores marinos se encuentran varios kilómetros mar adentro, y por lo tanto generan un menor impacto acústico y visual para el ser humano. Otra importante ventaja de la energía eólica *offshore* está relacionada con el transporte de componentes, ya que resulta más económico y sencillo transportar componentes de aerogeneradores como la torre, góndola o palas en el mar que por tierra [Haluzan,2011].

En cuanto a desventajas de los aerogeneradores marinos, hay que mencionar el coste de su mantenimiento. La Figura 1.8 muestra la estructura de costes de la puesta en marcha y explotación de un aerogenerador en tierra firme y en el mar. Se puede apreciar que en los aerogeneradores *offshore* el coste de operación y mantenimiento (O&M) es un 14 % mayor que en los aerogeneradores *onshore* [Martínez,2015]. Esto se debe principalmente a que los aerogeneradores marinos se encuentran en un entorno más adverso, sometidos a condiciones meteorológicas y ambientales más duras. Por ello, la posibilidad de que un elemento estructural sufra

daño aumenta y, a su vez, las reparaciones resultan más complicadas de planificar y realizar.



**Figura 1.8:** Estructura de costes de la puesta en marcha y explotación de aerogeneradores *onshore* y *offshore* [Martínez,2015]

La asociación de la energía eólica europea (*EWEA, European Wind Energy Association*) prevé que los aerogeneradores marinos vayan sustituyendo poco a poco a los de tierra, y para el año 2020 prevé disponer de una capacidad energética instalada de 40 GW en los mares de Europa. Para cumplir con estas expectativas, es necesario que el coste de producción de la energía eólica *offshore* descienda aún más. Para ello, se considera que se deben cumplir los siguientes requisitos:

- En el año 2015 los aerogeneradores *offshore* estaban situados de media a una distancia de 43 km de la costa y a 27 m de profundidad. Estos aerogeneradores *offshore* estaban distribuidos entre el mar Báltico (12,9 %), el mar de Irlanda (17,6 %), el mar del Norte (69,4 %) y el océano Atlántico (0,1 %) [Corbetta,2016]. Para que el sector eólico *offshore* europeo siga creciendo, se considera necesario diseñar nuevos aerogeneradores capaces de operar en aguas más profundas para poder aprovechar el gran potencial eólico existente en el océano Atlántico y en el mar Mediterráneo.
- Aunque en la actualidad existen aerogeneradores *offshore* capaces de generar 8 MW de potencia, la capacidad energética media de los

aerogeneradores instalados en los mares europeos se sitúa en 4,2 MW [Corbetta,2016]. Aumentar la potencia de los aerogeneradores resultará crucial para el desarrollo del sector, por lo que, los principales fabricantes de turbinas están inmersos en un continuo proceso de diseño y fabricación de nuevos aerogeneradores, cada vez de mayor capacidad [Van Gemert,2015].

- A pesar de que las subestructuras tipo *monopile* dominan el mercado actual (presentes en el 80,1% de los aerogeneradores *offshore*), se espera que las subestructuras tipo *jacket* y las flotantes sean las más empleadas durante los próximos años, ya que proporcionan mejores prestaciones que los *monopile* en aerogeneradores de gran tamaño y en aguas de gran profundidad [Ho,2016]. Esto supone que será necesario rediseñar las subestructuras marinas y adaptar su modo de fabricación para poder cubrir las exigencias del mercado.
- El coste de operación y mantenimiento de un aerogenerador *offshore* durante su vida útil representa aproximadamente el 25 % de su coste total. Para garantizar la sostenibilidad del sector eólico *offshore* se considera imprescindible llevar a cabo mejoras en las estrategias O&M, tanto en mantenimiento correctivo como en preventivo [Maples,2013]. Las acciones de mantenimiento correctivo se focalizan en mejorar la metodología de reparación y sustitución de componentes una vez que dichos componentes ya están completamente dañados. Sin embargo, el mantenimiento preventivo busca observar y evaluar el estado de aerogeneradores para reparar o sustituir los componentes deteriorados antes de que su estado se agrave.

La monitorización de la salud estructural (*SHM, Structural Health Monitoring*) es un conjunto de tecnologías que tratan de diagnosticar el “estado” general de una determinada estructura y predecir su futura evolución [Balageas,2006]. El SHM ha sido empleado sobre todo en ingeniería civil y aeronáutica para evaluar el estado de puentes [Fujino,2008;Ni,2012], presas [Mazzanti,2015], edificios de un alto valor añadido [Inaudi,2011;Inaudia,2009] o componentes de aeronaves [Boller,2008;Rosiek,2012]. No obstante, durante los últimos años su uso se ha

extendido, comenzándose a utilizar en la monitorización de aerogeneradores marinos [Lu,2009;Yang,2010].

Dentro de los diferentes elementos que se pueden monitorizar en los aerogeneradores marinos, están los elementos estructurales: principalmente palas, torre y subestructura marina (Figura 1.6).

Existe un buen número de trabajos enfocados a monitorizar palas [Ghoshal,2000;Sundaresan,1999] y torre [Veljkovic,2010], pero es más difícil encontrar trabajos enfocados en la monitorización de la subestructura marina [Gomez,2013]. Esto es debido, principalmente, a que la mayor parte de los aerogeneradores instalados hasta el momento son aerogeneradores *onshore*, los cuales no tienen subestructura marina.

La subestructura marina, en su conjunto, debe soportar las cargas derivadas de la torre y de la turbina [Van Der Tempel,2006]. No obstante, existen otros tipos de cargas o factores que influyen mayormente en regiones concretas de la subestructura. La parte de la subestructura que se encuentra debajo del agua por ejemplo, está expuesta a diferentes elementos como la corrosión marina y el crecimiento marino [Heaf,1979]. Además, esta parte sumergida puede verse afectada por las corrientes marinas y por los cambios producidos en el lecho marino [Diamond,2012]. La parte de la subestructura que se encuentra sobre el nivel del mar se divide en dos zonas, la zona de *splash* y la zona que está justo por encima de ella. La zona de *splash* está sometida sobre todo a la carga debida al impacto continuo de las olas, mientras que la zona ubicada justo por encima de ella está sometida sobre todo a las cargas debidas al viento [Peeringa,2014]. La fatiga debida a estas cargas aceleran el envejecimiento de la subestructura, pudiendo incluso ocasionar la aparición repentina de daño estructural [Diamond,2012]. Monitorizar la subestructura marina de los aerogeneradores *offshore*, y más en concreto, las subestructuras tipo *jacket*, puede resultar una estrategia útil para reducir el coste de mantenimiento del aerogenerador [Zugasti,2014]. Resultaría especialmente **interesante** poder **aislar** las **zonas** de mayor peligro del *jacket* y monitorizar cada una de estas por separado, utilizando para ello un **número reducido de sensores**.

## ***1.2 Estado del arte sobre la monitorización de salud estructural***

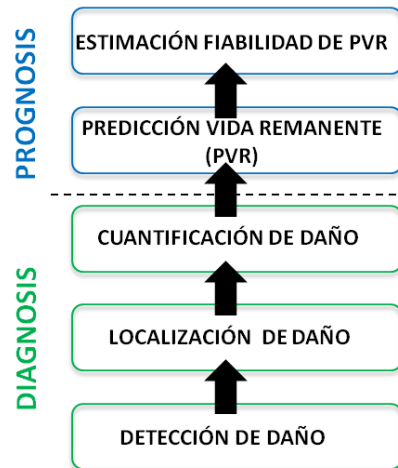
Tradicionalmente, las estructuras han sido evaluadas mediante **métodos no destructivos** (*NDT, Non-Destructive Testing*) [Van Hemelrijck,1996]. Los NDT implican la utilización de sensores específicos para cada tipo de técnica, instalados antes de cada inspección para volver a desinstalarse cuando la inspección ha finalizado. Por tanto, evalúan el estado de la estructura en un momento determinado, lo que conlleva habitualmente que la estructura deje de estar operativa durante la inspección [Hytti,2010]. En el caso específico de los aerogeneradores, estas paradas pueden generar importantes pérdidas económicas.

De lo anterior se deduce que los NDT se ejecutan en momentos discretos de tiempo. Sin embargo, los daños estructurales pueden surgir en cualquier momento, de forma inesperada y repentina. Por consiguiente, un sistema capaz de diagnosticar el estado de la estructura de forma continua presenta evidentes ventajas respecto a los métodos tradicionales de inspección puntual.

Como respuesta a esta necesidad de sistemas de monitorización continua, se plantean las técnicas de **monitorización de la salud estructural** (*SHM, Structural Health Monitoring*). El objetivo de un sistema SHM es proporcionar, en todo momento durante la vida de la estructura, el diagnóstico de la estructura [Balageas,2006]. Para ello, se han propuesto diferentes tipos de sensores, los cuales están ubicados de forma permanente en la estructura. El desarrollo y expansión de los sistemas SHM ha sido posible gracias a la aparición de nuevos materiales y tipos de sensores, así como la mejora experimentada en los sistemas de adquisición, transmisión y procesamiento de datos [Giurgiutiu,2007]. Sin embargo, queda un amplio campo de investigación en aspectos como el desarrollo de algoritmos que, analizando la información obtenida mediante los sensores, realicen un preciso diagnóstico de la estructura.

La metodología de SHM puede dividirse en diferentes niveles, asignándose a cada uno de estos niveles un objetivo particular. Una de las clasificaciones más conocidas es la propuesta por Rytter [Rytter,1993], que distingue cuatro niveles dentro de SHM: la detección de daño, la localización de daño, la cuantificación de daño y, finalmente, la prognosis. Por su parte, Sikorska *et al.* [Sikorska,2011] diferencian únicamente entre la diagnosis y prognosis (Figura 1.9), donde la diagnosis engloba a

los tres niveles de detección, localización y cuantificación de daño propuesto por Rytter en [Rytter,1993]. En la prognosis en cambio, se distingue entre la predicción de la vida remanente de la estructura y la estimación de la fiabilidad de dicha predicción.



**Figura 1.9:** Niveles SHM propuestos por Sikorska (adaptado de [Sikorska,2011])

Si nos centramos en el sector eólico, y más concretamente en el sector eólico marino, encontramos metodologías propuestas para la monitorización estructural. Una de las metodologías más conocidas es propuesta por Fritzen *et al.* [Fritzen,2008] (Figura 1.10). Esta metodología detalla todas las etapas a completar desde la captación de los datos hasta la localización de daño estructural, incluyendo la detección de fallo en sensores y la detección de daño estructural.



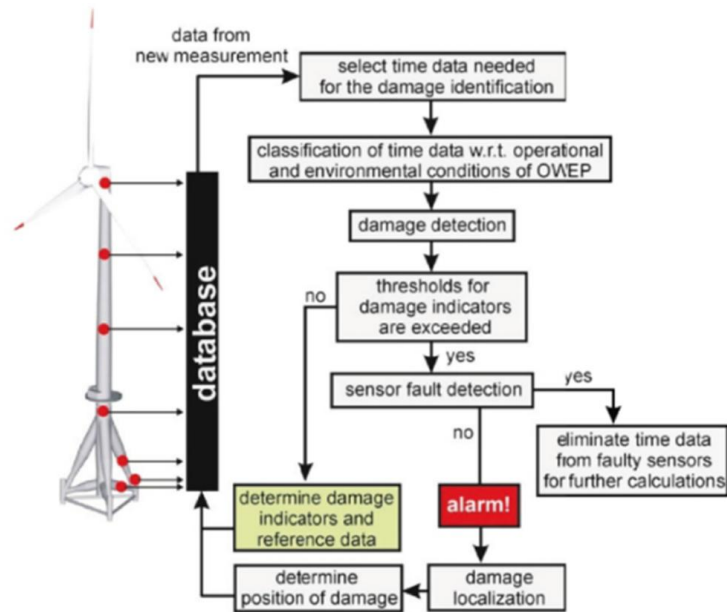


Figura 1.10: Metodología para la monitorización de un aerogenerador marino [Fritzen,2008]

Un aspecto clave en todos los sistemas de SHM es la sensorización. Este aspecto abarca desde la selección del tipo de sensor, hasta la determinación del número necesario de los mismos y su ubicación en la estructura [Worden,2004]. La sensorización, como tal, no corresponde a ningún nivel específico de SHM, pero su correcta resolución es indispensable.

A continuación se va a analizar la literatura existente sobre los métodos SHM de diagnóstico, también conocidos como métodos de identificación de daño estructural, los cuales tratan de detectar, localizar y cuantificar daño estructural [Doebbling,1998]. Además de ello, se va a analizar la literatura existente sobre los métodos de reducción y posicionamiento óptimo de sensores.

### 1.2.1 Métodos de identificación de daño estructural

Los métodos SHM de identificación de daño estructural se pueden clasificar en una de las siguientes categorías; **métodos locales** y **métodos globales** [Doebbling,1998]. Los métodos locales tratan de monitorizar pequeñas áreas de la estructura a través de las medidas realizadas localmente, posibilitando la identificación de daños leves, como por ejemplo microroturas. Los métodos globales de

identificación de daño, en cambio, sin ser tan sensibles, tratan de evaluar el estado del conjunto de la estructura.

### 1.2.1.1 Métodos locales de SHM

La mayoría de los métodos locales de identificación de daño estructural provienen del ámbito de NDT. Los métodos locales más comunes son aquellos que se basan en el análisis de **vibraciones a altas frecuencias**, análisis de las **deformaciones** del material o en las **corrientes de Eddy** [Scott,1982].

Dentro de los métodos locales de SHM que analizan las **vibraciones a altas frecuencias**, se encuentran los métodos activos basados en **ultrasonidos** [Cui,2014] y los métodos basados en la captación y análisis de las **emisiones acústicas** [Lambrighs,2009].

Los métodos activos de **ultrasonidos**, ondas mecánicas cuya frecuencia se encuentra por encima de 20 kHz, están muy extendidos en la monitorización de estructuras de reducidas dimensiones; como por ejemplo en alas de aeronaves [Zhao,2007], en palas de aerogeneradores [Park,2010] o en placas metálicas [Mirahmadi,2011]. Estos métodos se fundamentan generalmente en que las ondas generadas artificialmente viajan a través del material hasta que se encuentran con una discontinuidad, lo cual hace que parte de la onda se refleje hacia el receptor. Midiendo el tiempo transcurrido entre el envío de la señal original y la recepción de la onda reflejada, conociendo su velocidad de propagación y la ubicación de los transductores, se determina la posición de la discontinuidad [Krautkramer,2013].

Los métodos basados en las **emisiones acústicas** son otro tipo de métodos locales de identificación de daño. Estos métodos se basan en la captación y posterior análisis de ondas de alta frecuencia generadas en la estructura al producirse un daño estructural; como por ejemplo una fisura, grieta o la deformación del material [Abdelrahman,2013;Bouzid,2015].

La medición de las **deformaciones** en el material de la estructura y su posterior análisis es una estrategia frecuentemente empleada para monitorizar estructuras como puentes [Wan,2013] o aeronaves [Garcia-Martin,2011]. Estas deformaciones suelen ser medidas habitualmente mediante galgas extensiométricas

[Kang,2006] o mediante fibra óptica como redes de Bragg [Okabe,2000]. Los métodos locales de monitorización que utilizan redes de Bragg resultan especialmente interesantes debido fundamentalmente a su tamaño y peso reducidos y su inmunidad frente a interferencias electromagnéticas [Waele,2003].

Los métodos de identificación de daño estructural basados en las **corrientes de Eddy** se basan en la inducción de corrientes en la superficie del material y en la posterior observación de la conductividad eléctrica en el material. Las corrientes de Eddy son ampliamente empleadas para detectar irregularidades como grietas o porosidades en materiales como cobre, aluminio o acero [Lingvall,2000;Yusa,2007].

Monitorizar una estructura de grandes dimensiones mediante métodos locales es posible, pero suele resultar inviable desde el punto de vista económico.

#### **1.2.1.2 Métodos globales de SHM**

Dentro de los métodos globales de identificación de daño estructural, destacan los métodos basados en el análisis de **vibraciones de baja frecuencia**, es decir, ondas mecánicas cuya frecuencia está por debajo de 20 kHz [Doebbling,1998]. Se considera que los métodos globales de identificación de daño no son tan sensibles como los locales en cuanto a la magnitud del daño detectable, pero son capaces de monitorizar toda la estructura empleando un menor número de sensores.

Los métodos globales de identificación de daño estructural basados en el análisis vibratorio comparten una estrategia común: captación de las vibraciones de la estructura, obtención de características sensibles al daño y estimación del estado de la estructura, o de parte de ella.

Los métodos de monitorización basados en el análisis de vibraciones han sido ampliamente utilizados para evaluar el estado de estructuras grandes y complejas como puentes [Fujino,2008;Ni,2012], edificios de alto valor añadido [Inaudi,2011;Inaudia,2009] o aerogeneradores [Doebbling,1996].

Deraemaeker [Deraemaeker,2012] clasifica los métodos globales de identificación de daño basados en el análisis vibratorio en dos grupos. Por una parte, se encuentran los métodos que se basan en un **modelo del comportamiento**

**dinámico** del sistema, conocidos como *model-driven approaches*. En la mayoría de los casos estos modelos corresponden a modelos de elementos finitos (EF) [Spyrakos,1994]. En el segundo grupo se incluyen los métodos SHM que se basan en un **modelo empírico** del sistema. Estos últimos métodos no necesitan conocer el modelo del comportamiento dinámico del sistema y son conocidos como *data-driven approaches*.

Por lo general, los métodos basados en **modelos del comportamiento dinámico del sistema** identifican daño resolviendo el problema inverso [Tarantola,2005], es decir, relacionando los cambios en los datos medidos de la estructura con la modificación de los parámetros del modelo. Los métodos SHM más representativos de este primer grupo suelen estar basados en **observadores Bayesianos** [Bennett,1996] o suelen consistir en la **actualización del modelo** del sistema (*MU, Model Updating*) [Doebling,1998]. Los métodos SHM basados en **observadores Bayesianos** han sido propuestos a menudo para la identificación de daño estructural [Tipireddy,2009]. Hoshiya y Yang [Hoshiya,1984;Yang,2006] proponen el uso del filtro de Kalman extendido (*EKF, Extended Kalman Filter*) para estimar la matriz de masa y rigidez de la estructura analizada. Los métodos *Model Updating* se basan en la actualización de las matrices del modelo (masa, rigidez o amortiguamiento) en función de una serie de características estructurales obtenidas experimentalmente. Las características más comunes son las frecuencias naturales, las funciones de respuesta frecuencial (*FRF, Frequency Response Function*), las formas modales, la curvatura de las formas modales y la energía de la deformación modal (*MSE, Modal Strain Energy*). Cada vez que se quiera evaluar el estado de salud de la estructura se actualiza el modelo en base a las características estructurales obtenidas a partir de nuevos datos medidos. El estado de salud de la estructura será determinado en base a los cambios en los parámetros del modelo al ser actualizadas, pudiéndose localizar y cuantificar daño mediante dicho análisis.

Los métodos de identificación de daño estructural que emplean modelos del comportamiento dinámicos del sistema, son, a *priori*, capaces de detectar, localizar y cuantificar daño estructural [Doebling,1998]. No obstante, obtener un modelo preciso suele ser complicado [Jankowski,2013].

Los métodos de identificación de daño basados en **modelos empíricos** se basan en generar primero un modelo con datos experimentales obtenidos de la

estructura sana y generar después nuevos modelos con datos experimentales obtenidos en la fase de evaluación, determinándose el estado de salud de la estructura mediante la comparación de ambos modelos. Estos métodos suelen ser clasificados a su vez en dos subgrupos; análisis de **propiedades modales** y reconocimiento de **patrones estadísticos** (pattern recognition).

En cuanto a los métodos de identificación de daño basados en el análisis de las **propiedades modales** del sistema, destacar que las principales propiedades analizadas suelen ser las **frecuencias naturales**, las **formas modales**, la **curvatura de las formas modales** y la **energía de la deformación modal**.

En la literatura se pueden encontrar varias publicaciones en las que se propone la detección de daño estructural mediante la comparación de las **frecuencias naturales** de la estructura [Adams,1978;Salawu,1997]. Farrar *et al.* [Farrar,1994] concluyen que las primeras frecuencias naturales de la estructura muestran una reducida sensibilidad al daño. Doebling *et al.* [Doebling,1998] defienden que el daño estructural es un fenómeno local, el cual suele reflejarse de una forma más sensible en los modos locales. Por otra parte, afirman que el análisis de las frecuencias naturales no proporciona información espacial, por lo que no es una característica adecuada para la localización del daño.

Otros métodos se basan en el análisis de las **formas modales** de la estructura [Allemang,1982;Koh,2007]. En la mayoría de los casos, se determina el estado de la estructura en función del criterio de confianza modal (*MAC, Modal Assurance Criterion*), es decir, el grado de correlación entre las formas modales obtenidas a la hora de evaluar la estructura y las obtenidas en el estado sano. Doebling *et al.* [Doebling,1998] afirman que las formas modales son más sensibles que las frecuencias naturales a los daños locales. Además, proporcionan información espacial para la localización de daño estructural. No obstante, suele ser necesario emplear una cantidad mayor de sensores que en los métodos basados en el análisis de frecuencias naturales para obtener las formas modales [Lieven,1988].

Gunes *et al.* [Gunes,2012] defienden que la **curvatura de la forma modal**, definida como la segunda derivada espacial de la forma modal, es una característica más sensible al daño que la propia forma modal. En esta línea, Pandey *et al.* [Pandey,1991] presentan un método para localizar daño en una viga en voladizo

mediante el análisis de la curvatura de sus formas modales. De este trabajo se concluye que los cambios producidos en la curvatura de la forma modal permiten una mejor localización del daño. Sin embargo, como la curvatura de la forma modal se obtiene de la propia forma modal, el número de sensores necesarios sigue siendo elevado, al igual que en los métodos basados en el análisis de las formas modales.

Dentro de los métodos de identificación de daño basados en modelos empíricos y en el análisis de propiedades modales, se incluye también el estudio de la **energía de la deformación modal** [Li,2010]. Ésta consiste en el cálculo de la cantidad de energía cinética que posee cada uno de los modos en los puntos de medición. En los artículos [Stubbs,1992] y [Law,1998] se presentan dos métodos para localizar daño estructural analizando la MSE (Modal Strain Energy). Al tratarse de métodos que parten de las formas modales de la estructura, se necesita un número elevado de sensores. Sin embargo, en las publicaciones mencionadas se defiende que la sensibilidad al daño es superior a otros métodos basados en el análisis de las formas modales.

El segundo subgrupo dentro de los métodos de identificación de daño basados en modelos empíricos, lo conforman los métodos basados en el reconocimiento de **patrones estadísticos**. En estos se distingue entre los métodos supervisados y no supervisados. Los **métodos supervisados** necesitan datos obtenidos de la estructura sana y dañada para establecer el patrón, mientras que los métodos **no supervisados** necesitan únicamente datos de la estructura sana. Se considera que los métodos basados en el reconocimiento de patrones poseen la ventaja respecto a los métodos basados en el análisis de propiedades modales de que cada serie temporal medida puede ser analizada individualmente [Cheung,2008]. Nichols [Nichols,2006] propone un método de detección de daño no supervisado basado en el análisis de la **información mutua** (*MI, Mutual Information*) [Marinescu,2011] entre la aceleración medida de la estructura en el estado sano y en el estado a evaluar. Nichols defiende que una información mutua baja puede deberse a un daño estructural. Mújica *et al.* [Mujica,2010] proponen un método de detección de daño no supervisado basado en el **análisis de componentes principales** (*PCA, Principal Component Analysis*) y en dos indicadores estadísticos,  $T^2$  y  $Q$ . Este método de detección de daño ha sido aplicado en dos plataformas experimentales; una plancha de acero y una pala de aeronave. Fritzen *et al.* [Fritzen,2005] y Zugasti *et al.* [Zugasti,2012] proponen un método de detección de daño no supervisado basado en el cálculo y posterior comparación del

**espacio nulo** (*NS, Null Space*) de las matrices de Hankel obtenidas a partir de los datos medidos en el estado sano y en el estado a evaluar. Zugasti *et al.* [Zugasti,2012] aplican el método de detección de daño en una estructura de laboratorio que emula a un aerogenerador *offshore* a escala.

Los métodos de identificación de daño basados en **modelos autorregresivos** [Lutkepohl,2005] han sido clasificados también dentro de los métodos de reconocimiento de patrones estadísticos [Yao,2012]. Estos métodos comparten una estrategia común, la representación del sistema mediante el correspondiente modelo autorregresivo y el análisis de los parámetros del modelo. Primero se estima el modelo autorregresivo con datos del estado sano. Cada vez que se quiera conocer el estado de la estructura, se repite el mismo proceso pero con datos correspondientes a nuevas evaluaciones de la estructura, determinándose el estado de la estructura en función de la variación sufrida por los parámetros. Nair *et al.* [Nair,2006] presentan un método de monitorización no supervisado en el que se representa el sistema mediante un modelo ARMA (AutoRegressive Moving Average), y analiza cambios en sus tres coeficientes para evaluar el estado de la estructura. Joy [Joy,2014] en cambio, presenta un método no supervisado donde representa la estructura mediante modelos AR (AutoRegressive) y calcula la distancia de Mahalanobis entre los coeficientes estimados en el estado sano y en el estado a evaluar. Sakaris [Sakaris,2015] por su parte, presenta un novedoso método supervisado basado en modelos VARX (Vector AutoRegressive with eXogenous inputs) que permite localizar daño estructural. No obstante, el método propuesto por Sakaris necesita estimar modelos VARX correspondientes a varios escenarios dañados en la fase de aprendizaje, para así poder relacionar cada nuevo modelo VARX estimado en la fase de evaluación con alguno de los modelos VARX estimados en la fase de aprendizaje, localizándose de esta manera el daño estructural.

Los métodos de monitorización basados en modelos empíricos poseen una serie de ventajas respecto a los métodos basados en modelos del comportamiento dinámico del sistema. No obstante, se asume que el alcance de los métodos de monitorización *data-driven* es inferior al de los métodos SHM basados en modelos, resultando complicado cuantificar daño estructural mediante su aplicación.

### **Métodos de monitorización basados en subestructuras aisladas**

Jankowski [Jankowski,2013] defiende que la monitorización global de grandes estructuras mediante el análisis de las vibraciones de baja frecuencia presenta los siguientes inconvenientes:

- Baja precisión y fiabilidad de los modelos; debido a que el modelado de las cargas y de las condiciones de contorno resulta complicado, y especialmente el modelado de uniones atornilladas.
- Baja convergencia numérica; la convergencia numérica alcanzada en los métodos *model updating*, es decir, el ajuste entre las propiedades dinámicas obtenidas experimentalmente y las propiedades dinámicas obtenidas a partir del modelo actualizado, suele ser menor a medida que aumenta la complejidad del modelo y el número de parámetros a actualizar.
- Necesidad de un número elevado de sensores; debido a la baja sensibilidad que muestran los modos globales a los daños locales. Se requiere un elevado número de sensores para identificar el daño en la estructural.

Como respuesta a estos inconvenientes se han propuesto nuevos métodos SHM que se basan en aislar zonas de interés en la estructura, denominadas subestructuras. Si bien estos métodos no permiten conocer el estado de toda la estructura, su aplicación permite identificar daño estructural en las subestructuras de interés empleando un número menor de sensores. En cuanto al tamaño de estas subestructuras, se considera que puede ser considerablemente mayor que el tamaño de la área monitorizada mediante los métodos SHM locales [Jankowski,2013]. Este nuevo enfoque es conocido como **substructuring**, y está siendo motivo de estudio durante los últimos años.

Koh es considerado [Hou,2012;Jankowski,2013] como uno de los pionero en la monitorización de estructuras mediante métodos de *substructuring*. En [Koh,1991], Koh *et al.* emplean observadores Bayesianos (EKF) para identificar la matriz de rigidez y amortiguamiento de una subestructura. En el mencionado artículo la dinámica de la estructura es descrita mediante la siguiente ecuación:



$$M\ddot{\mathbf{z}}(t) + C\dot{\mathbf{z}}(t) + K\mathbf{z}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1.1)$$

donde  $\mathbf{z}(t)$  es el vector de desplazamiento de los grados de libertad (GDL) de la estructura y  $\mathbf{f}(t)$  es el vector de la fuerza aplicado en cada nodo.  $M$ ,  $C$  y  $K$  son las matrices de masa, amortiguamiento viscoso y rigidez de la estructura.

Se selecciona una subestructura para su monitorización, representándose la dinámica de dicha subestructura en forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} M_{ff} & M_{fr} & 0 \\ M_{rf} & M_{rr} & M_{rg} \\ 0 & M_{gr} & M_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{z}}_f(t) \\ \ddot{\mathbf{z}}_r(t) \\ \ddot{\mathbf{z}}_g(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ff} & C_{fr} & 0 \\ C_{rf} & C_{rr} & C_{rg} \\ 0 & C_{gr} & C_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{z}}_f(t) \\ \dot{\mathbf{z}}_r(t) \\ \dot{\mathbf{z}}_g(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fr} & 0 \\ K_{rf} & K_{rr} & K_{rg} \\ 0 & K_{gr} & K_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_f(t) \\ \mathbf{z}_r(t) \\ \mathbf{z}_g(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_f(t) \\ \mathbf{f}_r(t) \\ \mathbf{f}_g(t) \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

donde los subíndices  $f$  y  $g$  hacen referencia a los GDL de las interfaces de la subestructura, mientras que  $r$  hace referencia a los GDL internos de la subestructura.

La dinámica de los GDL internos de la subestructura se representa mediante la siguiente ecuación:

$$M_{rr}\ddot{\mathbf{z}}_r(t) + C_{rr}\dot{\mathbf{z}}_r(t) + K_{rr}\mathbf{z}_r(t) = \mathbf{f}_r(t) - M_{rf}\ddot{\mathbf{z}}_f(t) - M_{rg}\ddot{\mathbf{z}}_g(t) - C_{rf}\dot{\mathbf{z}}_f(t) - C_{rg}\dot{\mathbf{z}}_g(t) - K_{rf}\mathbf{z}_f(t) - K_{rg}\mathbf{z}_g(t) \quad (1.3)$$

Otra manera de representar la dinámica de los GDL internos de la subestructura es mediante las ecuaciones de estado:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_2 \\ -M_{rr}^{-1}(\mathbf{X}_3) [C_{rr}(\mathbf{X}_3)\mathbf{X}_2 + K_{rr}(\mathbf{X}_3)\mathbf{X}_1 + \mathbf{f}_{rf}(t) + \mathbf{f}_{rg}(t) + \mathbf{f}_r(t)] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

donde los vectores de estado  $(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3)$  y las matrices  $\mathbf{f}_{rf}(t)$  y  $\mathbf{f}_{rg}(t)$  se definen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_1 &= \langle z_{r1}, z_{r2}, \dots, z_{rm} \rangle^T \\
 \mathbf{X}_2 &= \langle \dot{z}_{r1}, \dot{z}_{r2}, \dots, \dot{z}_{rm} \rangle^T \\
 \mathbf{X}_3 &= \langle \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m \rangle^T
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{f}_{rf}(t) &= \mathbf{M}_{rf}(\mathbf{X}_3)\ddot{\mathbf{z}}_f(t) + \mathbf{C}_{rf}(\mathbf{X}_3)\dot{\mathbf{z}}_f(t) + \mathbf{K}_{rf}(\mathbf{X}_3)\mathbf{z}_f(t) \\
 \mathbf{f}_{rg}(t) &= \mathbf{M}_{rg}(\mathbf{X}_3)\ddot{\mathbf{z}}_g(t) + \mathbf{C}_{rg}(\mathbf{X}_3)\dot{\mathbf{z}}_g(t) + \mathbf{K}_{rg}(\mathbf{X}_3)\mathbf{z}_g(t)
 \end{aligned}$$

$\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m$  son los parámetros a identificar, que en el método propuesto en [Koh,1991] corresponden a los coeficientes de las matrices  $\mathbf{M}_{rf}$ ,  $\mathbf{C}_{rf}$  y  $\mathbf{K}_{rf}$ .

Koh *et al.* [Koh,1991] estiman las variables de estado aplicando EKF. En [Koh,1991] se demuestra que los métodos SHM que emplean observadores Bayesianos pueden detectar, localizar y cuantificar daño en subestructuras de varios GDL. No obstante, necesitan conocer el modelo del comportamiento dinámico de la subestructura.

Más recientemente, Koh *et al.* [Koh,2003] presentan un método llamado *progressive structural identification* (PSI). Este método identifica los parámetros estructurales (masa, rigidez y amortiguamiento) de todo el modelo, identificando progresivamente los parámetros correspondientes a las subestructuras que lo componen. El método PSI identifica los parámetros estructurales mediante algoritmos genéticos [Mares,1996], pero necesita conocer el modelo del comportamiento dinámico de la subestructura.

Tee *et al.* [Tee,2005] presentan dos métodos para identificar daño en subestructuras. El primer método, llamado *first order model identification* (FOMI), identifica las matrices de masa y rigidez de la subestructura empleando secuencialmente las técnicas *observer Kalman filter identification* (OKID) [Juang,1993] y *eigensystem realization* (ERA) [De Angelis,2002]. El segundo método, llamado *second order model identification* (SOMI), identifica los mismos parámetros que el método anterior pero utilizando estimadores basados en mínimos cuadrados. Tee *et al.* [Tee,2005] concluyen que las matrices de masa y rigidez son identificadas con mayor precisión mediante el método SOMI que mediante el método FOMI. Además, en ese mismo artículo se indica que el segundo método (SOMI) requiere el uso de menos

sensores que el primer método (FOMI). Ambos métodos necesitan disponer del modelo del comportamiento dinámico de la subestructura.

Por otra parte, Varghese *et al.* [Varghese,2011] proponen un método de *substructuring* basado en modelos empíricos en el que se emplea el concepto del equilibrio de la energía. Se trata de un método de reconocimiento de patrones no supervisado. De la energía que entra en una subestructura, la mayor parte se transmite hacia otras subestructuras. Sin embargo, una pequeña parte de la energía de entrada es disipada por la propia subestructura. Varghese propone detectar daño en subestructuras analizando la variación de la energía disipada en cada subestructura. Un método similar ha sido propuesto por López-Díez [López-Díez,2005], donde se monitorizan las subestructuras mediante el análisis estadístico de la energía asociada a estas subestructuras (*SEA, Statistical Energy Analysis*) [Lyon,1975]. Varghese y López-Díez indican que sus respectivos métodos SHM presentan una elevada sensibilidad cara a la detección de daño. No obstante, asumen que mediante sus métodos difícilmente se llegará a localizar el daño dentro de la subestructura.

Otros métodos de *substructuring* basados en modelos empíricos se centran en el dominio frecuencial. Zhang [Zhang,2012] por ejemplo, propone un método para detectar daño a nivel de subestructura analizando la variación del *cross power spectral density* (CPSD) [Verheij,1980] entre la vibración medida en la entrada y salida de dicha subestructura. Lin *et al.* [Lin,2012] presentan un método para detectar daño en subestructuras basado en el análisis de la variación de las FRFs calculadas entre vibraciones de entrada y de salida de cada subestructura. Ambos se tratan de métodos no supervisados.

En la literatura se pueden encontrar métodos de *substructuring* basados en modelos autorregresivos [Yun,1997] [Xing,2012]. Se tratan de métodos no supervisados basados en modelos empíricos, y que por tanto no necesitan disponer del modelo del comportamiento dinámico de la subestructura, ni tampoco de datos correspondientes a escenarios dañados para generar el patrón. Xing y Mita [Xing,2012] proponen un método en el que se representa la dinámica de la subestructura  $n$ , que está formado por un GDL interno y dos GDL de interfaz, mediante la siguiente ecuación:

$$m_n \ddot{x}_n(t) + (c_n + 2c_{n+1}) \dot{x}_n(t) + (k_n + 2k_{n+1}) x_n(t) = m_{n+1} \ddot{x}_{n+1}(t) + 2c_{n+1} \dot{x}_{n+1}(t) + 2k_{n+1} x_{n+1}(t) - (m_n - m_{n+1}) \ddot{z}_{n-1}(t) \quad (1.6)$$

donde  $m$ ,  $c$ , y  $k$  son la masa, el amortiguamiento viscoso y la rigidez, mientras que  $\ddot{z}_{n-1}(t)$  es la aceleración absoluta medida en el GDL  $n-1$  y  $x_n(t)$  es el desplazamiento relativo del GDL  $n$ . El desplazamiento relativo  $x_n(t)$  y  $x_{n+1}(t)$  se obtiene de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x_n(t) &= z_n(t) - z_{n-1}(t) \\ x_{n+1}(t) &= z_{n+1}(t) - z_{n-1}(t) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Discretizando de acuerdo a la diferencia central finita [Olver,2014], se obtienen las expresiones aproximadas de la velocidad ( $\dot{x}$ ) y aceleración ( $\ddot{x}$ ) de los GDL de la subestructura a partir de su desplazamiento ( $x$ ). Introduciendo estas expresiones en la ecuación (1.6), la dinámica de la subestructura es descrita de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x_n(n) + a_1 x_n(n-1) + a_2 x_n(n-2) &= b_{11} z_{n-1}(n-1) + b_{12} z_{n-1}(n-2) \\ &+ b_{21} x_{n+1}(n-1) + b_{22} x_{n+1}(n-2) \\ &+ c_{31} e(n-1) + c_{32} e(n-2) \end{aligned} \quad (1.8)$$

La ecuación (1.8) es un modelo ARMAX de dos entradas ( $x_{n+1}$  y  $z_{n-1}$ ) y una salida ( $x_n$ ), siendo  $e$  el error de predicción cometido en la estimación.

Se representa la subestructura  $n$  mediante un modelo ARMAX (ver ecuación (1.8)) y se obtiene de dicho modelo la frecuencia natural de la subestructura:

$$\omega = \left| \log \left( \text{roots}(a_1, a_2) \right) \times F_s \right| \quad (1.9)$$

donde  $a_1$  y  $a_2$  son los coeficientes AR del modelo ARMAX y  $F_s$  la frecuencia de muestreo.

En el método propuesto en [Xing,2012] se estima primero el modelo ARMAX del estado sano y posteriormente el del estado a evaluar. Después, se obtiene la frecuencia natural de ambos modelos, sano ( $\omega_s$ ) y estado a evaluar ( $\omega_e$ ), y se calcula el siguiente indicador de daño ID1, el cual será utilizado para determinar el estado de salud de la subestructura:

$$ID1 = |\omega_e^2 - \omega_s^2| \quad (1.10)$$

El método propuesto en [Xing,2012], permite detectar daño en subestructuras de un único GDL interno.

### 1.2.2 Métodos de posicionamiento óptimo y reducción de sensores

La viabilidad económica de un sistema SHM depende en gran medida del número de sensores necesarios. Los métodos de posicionamiento óptimo de sensores (*OSP, Optimal Sensor Placement*) tratan de optimizar el uso de los sensores en un sistema SHM, determinando cual es el número mínimo de sensores a emplear, así como su ubicación, garantizando una correcta monitorización de la estructura [Heo,1997].

A continuación se presentan una serie de métodos propuestos de posicionamiento óptimo de sensores basados en los parámetros modales de la estructura. Kammer [Kammer,1996] presenta un método llamado *effective independence* (EFI), que determina la posición óptima de  $M$  sensores para que  $N$  formas modales seleccionadas previamente sean extraídas de la mejor manera posible. Los modos a extraer se determinan a partir del modelo de la estructura y los sensores son ubicados en aquellos puntos que proporcionen un valor MAC mayor entre los modos teóricos y experimentales. Meo y Zumpano [Meo,2005] afirman que este método no tiene en cuenta la energía de los modos, tratando a todos los modos por igual, lo cual puede conllevar a que las señales medidas sean más vulnerables al ruido. El método *effective independence driving point residue* (EFI-DPR) [Imamovic,1998] es similar al método propuesto por Kammer, pero incorpora un factor de ponderación para cada modo en función de su contenido energético. Este método trata de solventar las limitaciones atribuidas al método EFI. No obstante, ambos métodos requieren de un modelo del comportamiento dinámico de la estructura.

En el artículo [Udwadia,1994] se presenta un método OSP en el que los sensores son distribuidos a lo largo de la estructura con el fin de optimizar la identificación de ciertos parámetros estructurales de interés. Este método está basado

en el análisis de la matriz de información de Fisher (FIM). Al igual que en el caso anterior, exige un modelo que represente la dinámica del sistema.

Wouwer *et al.* [Wouwer,2000] presentan un método basado en observadores no lineales que selecciona el número y ubicación de los sensores en función de su capacidad para la estimación de estados y de parámetros del modelo del sistema. En el caso de la estimación de los parámetros del modelo, se selecciona la configuración de sensores que maximiza la independencia entre las funciones de sensibilidad de los parámetros. En ambos casos, la independencia es calculada mediante el determinante de Gram [Akhiezer,2013]. El método propuesto por Wouwer *et al.* requiere también disponer de un modelo del sistema a monitorizar.

El método *eigenvalue vector product* (EVP) calcula cuales son los puntos de la estructura de mayor amplitud vibratoria y determina la posición óptima de sensores en función de ello [Doebeling,1995;Zimmerman,1994]. Estos métodos suelen concentrar los sensores en una zona reducida de la estructura, que normalmente suele coincidir con el punto de excitación. Debido a ello, es preferible aplicarlo en escenarios donde la fuerza de excitación sea uniforme a lo largo de toda la estructura [Meo,2005].

Guestrin *et al.* [Guestrin,2005] proponen un método OSP en el que se busca la configuración de sensores con la mínima información mutua entre la aceleración medida. Los resultados obtenidos son prometedores, habiéndose aplicado en casos univariable.

La causalidad de Granger [Granger,1969] ha sido aplicada en varios campos como la econometría [Mosedale,2006], la climatología [Mosedale,2006] o la neurociencia [Seth,2015] para analizar la conectividad entre los diferentes procesos que conforman un sistema. En los mencionados artículos se reduce la dimensión del sistema en función de los resultados obtenidos en el análisis de la conectividad. En [Barnett,2014] se presenta la causalidad de Granger para el caso multivariable (*MVGC, MultiVariate Granger Causality*). Al igual que los métodos OSP basados en el cálculo de la información mutua no quiere ni el modelo del comportamiento dinámico del sistema a monitorizar, ni el conocimiento previo de su dinámica.

### 1.2.3 Conclusiones del estado del arte

Tal y como se ha indicado anteriormente, los métodos de identificación de daño estructural se pueden clasificar en **métodos locales** y **métodos globales**. Los sensores empleados en los **métodos locales** inspeccionan el estado de partes de la estructura que se encuentran cerca de estos sensores, resultando inviable desde el punto de vista económico la monitorización de estructuras de grandes dimensiones mediante este tipo de métodos. Dentro de los **métodos globales** destacan los métodos basados en el análisis de **vibraciones de baja frecuencia**. Se considera que estos métodos no son tan sensibles como los locales, pero emplean un menor número de sensores. Los métodos globales de identificación de daño se pueden dividir en dos grupos, métodos basados en un **modelo del comportamiento dinámico** del sistema (model-driven) y métodos basados en un **modelo empírico** del sistema (data-driven).

Los métodos de identificación de daño **model-driven** más representativos están basados en la **actualización del modelo** o en **observadores Bayesianos**. Son, *a priori*, capaces de detectar, localizar y cuantificar daño estructural, pero su uso se ve limitado a estructuras cuyo comportamiento dinámico es conocido.

Los métodos **data-driven** más representativos están basados en el análisis de las **propiedades modales** y en el **reconocimiento de patrones**. Los métodos de identificación de daño *data-driven* que analizan las **propiedades modales**, se centran en el análisis de las **frecuencias naturales**, las **formas modales**, la **curvatura de la forma modal** o la **energía de la deformación modal**. Estas características son obtenidas de forma empírica sin la necesidad de un modelo del comportamiento dinámico de la estructura. Sin embargo, se considera complicado localizar daño mediante este tipo de métodos utilizando un número razonable de sensores. En los métodos de identificación de daño *data-driven* basados en el reconocimiento de **patrones estadísticos** los patrones estadísticos son generados directamente a partir de los datos medidos, sin la necesidad de ningún modelo del comportamiento dinámico de la estructura. Dentro de los métodos de reconocimiento de patrones estadísticos se distingue entre los métodos **supervisados** y los **no supervisados**. Los métodos supervisados permiten detectar, localizar y cuantificar daño estructural, aunque para generar el patrón necesitan disponer de datos correspondientes tanto al estado sano y como a los estados dañados. Los métodos no supervisados en cambio,

permiten detectar, y en algunos casos localizar daño, generándose el patrón únicamente con datos del estado sano.

Se considera que la monitorización global de grandes estructuras mediante el análisis de las vibraciones presenta una serie de inconvenientes como la **baja precisión** y **fiabilidad** de los **modelos** o la necesidad de un número **elevado** de **sensores**. Como respuesta a estos problemas han surgido nuevos métodos SHM, conocidos como **substructuring**. Estos nuevos métodos tratan de identificar daños en una zona reducida de la estructura. Dentro de los métodos de *substructuring* se encuentran los propuestos por Koh [Koh,1991] y Xing y Mita [Xing,2012]. En el primero de ellos se presenta un método basado en observadores Bayesianos que no solo permite detectar daño en subestructuras de varios grados de libertad, sino que también permite localizar y cuantificar daño dentro de ellas. No obstante, es necesario disponer del modelo del comportamiento dinámico de la estructura a monitorizar. El segundo método en cambio, se basa en modelos empíricos y se trata de un método no supervisado. La subestructura es representada mediante un modelo ARMAX, y dicho modelo es reestimado y analizado lo largo del tiempo. El daño es detectado en función de los cambios observados en el modelo. El método propuesto por Xing y Mita permite detectar daño en subestructuras de un único grado de libertad.

Para que un sistema SHM sea viable desde el punto de vista económico, es necesario minimizar el número de sensores, lo cual se consigue mediante la aplicación de los métodos de **posicionamiento óptimo y reducción de sensores**.

En la literatura se pueden encontrar métodos OSP que analizan la precisión con la que se extraen los **parámetros modales** de interés en diferentes configuraciones de sensores, seleccionado al final aquella configuración con la que los parámetros modales extraídos sean lo más parecidos a los parámetros modales teóricos. Otros métodos posicionan los sensores a lo largo de la estructura en función de los resultados que ofrecen en cuanto a identificación de **parámetros estructurales** de interés, seleccionándose la configuración de sensores más apropiada mediante el cálculo y posterior análisis de la **matriz de información de Fisher**. Similarmente, se pueden encontrar métodos basados en **observadores no lineales** que seleccionan el número y ubicación de los sensores en función de su capacidad para la **estimación** tanto de **estados** como de **parámetros del modelo**. Se considera que los métodos OSP mencionados hasta ahora requieren el **conocimiento del modelo del**



**comportamiento dinámico** de la estructura o al menos el conocimiento de la **dinámica** que rige el **sistema**.

Los métodos OSP *eigenvalue vector product* calculan cuales son los puntos de la estructura de **mayor amplitud vibratoria** y determinan la posición óptima de sensores en función de ello. Se considera que este tipo de métodos son **aplicables únicamente** en casos donde la **excitación** de la estructura es **uniforme**. Otros métodos buscan la configuración de sensores que posea la mínima **información mutua** en común. Un concepto similar es el de la **causalidad de Granger**, que aunque su uso no está tan extendido, permite ser **utilizado** en escenarios con **múltiples sensores**. Se considera que los métodos de posicionamiento óptimo y reducción de sensores descritos en esta última sección **no requieren** el **conocimiento del modelo del comportamiento dinámico** de la estructura **ni** de la **dinámica** que rige el sistema.

### **1.3 Hipótesis**

*Es posible minimizar el número de sensores necesarios para localizar daño en una estructura aislando las subestructuras de interés, representando la dinámica de las subestructuras mediante modelos VARX y midiendo únicamente algunas de sus variables endógenas y exógenas.*

### **1.4 Objetivos**

Para demostrar la hipótesis se plantearon los siguientes objetivos operativos:

- a) Desarrollar un método que permita aislar una subestructura y localizar daño dentro de ella empleando únicamente acelerómetros.
- b) Desarrollar un método para minimizar el número de sensores necesarios a instalar en la subestructura.
- c) Evaluar experimentalmente en estructuras de laboratorio los métodos propuestos.

## **1.5 Contribuciones**

La primera contribución de esta tesis es la **extensión del método** propuesto por **Xing** en [Xing,2012], representándose las subestructuras mediante modelos VARX en lugar de modelos ARMAX. Por ello, se propone un **método** que permite **localizar** daño **dentro de diferentes** tipos de subestructuras, ya sean 1D, 2D o 3D y utilizando únicamente acelerómetros.

La segunda contribución de esta tesis es la aplicación de la **causalidad de Granger multivariable condicional** propuesta por Barnett y Seth [Barnett,2014] para analizar la **conectividad** entre los **GDL** de las **subestructuras**. Los cambios de conectividad son empleados para **localizar daño** dentro de las subestructuras.

## **1.6 Estructura del documento**

El documento está estructurado en cinco capítulos. El **Capítulo 2** describe el primer método de localización de daño propuesto, así como su evaluación en un banco de ensayos de dinámica unidimensional. Al final del capítulo, se compara el método de localización de daño propuesto con otros dos métodos de *substructuring* ([Xing,2012] y [Koh,1991]). El **Capítulo 3** describe el método propuesto para localizar daño mediante un conjunto reducido de sensores, así como su evaluación en un banco de ensayos de dinámica unidimensional. En el **Capítulo 4** se monitoriza un banco de ensayos de celosía utilizando el primer método de localización de daño propuesto. En el **Capítulo 5** se exponen las conclusiones y líneas futuras de trabajo.

## 1.7 Publicaciones

Parte de los resultados obtenidos durante esta tesis han sido publicados en un artículo y presentados en conferencias. Asimismo, se han enviado dos artículos a revista.

- U. Ugalde, E. Zugasti, J. Anduaga and F. Martínez. Damage Localization in a Simulated Offshore Wind Turbine using Model Updating Method. In *Proceeding of the 6<sup>th</sup> World Conference on Structural Control and Monitoring, 6WCSCM, Barcelona, Spain, July 15-17, 2014*
- U. Ugalde, J. Anduaga, F. Martínez and A. Iturrospe. SHM method for damage localization based on substructuring and VARX models. *arXiv preprint arXiv:1501.01905*, 2015.
- U. Ugalde, J. Anduaga, F. Martínez and A. Iturrospe. Novel SHM method to locate damages in substructures based on VARX models. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, p. 012013.
- U. Ugalde, J. Anduaga, F. Martínez and A. Iturrospe. A SHM method for detecting damage with incomplete observations based on VARX modelling and Granger causality. *Structural Health Monitoring*, 2016 (enviado).
- U. Ugalde, J. Anduaga, F. Martínez and A. Iturrospe. A SHM method for identifying damage based on VARX modelling and substructuring approach. In *Proceeding of the 8<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2016, Bilbao, Spain July 5-8, 2016*.
- U. Ugalde, J. Anduaga, O. Salgado and A. Iturrospe. A SHM methodology for damage localization in truss structures based on substructuring and VARX models. *Smart Materials and Structures*, 2016 (enviado).



# 2

## **Método de localización de daño estructural**

## 2.1 Introducción

En este capítulo se presenta un método para la localización de daño en subestructuras. El método emplea la técnica *substructuring* para aislar la subestructura midiendo únicamente desplazamiento en sus grados de libertad, y representa la dinámica de la subestructura aislada mediante un modelo *Vector Autoregressive with exogenous inputs* (VARX) [Lutkepohl,2005]. Primero se estima un modelo VARX de la subestructura aislada con la estructura sana. Posteriormente, cada vez que se realiza una evaluación de la subestructura se vuelve a estimar un nuevo modelo VARX. La comparación entre ambos modelos, sano y evaluado, permite determinar si la subestructura ha sufrido algún daño, indicando en ese caso la ubicación del daño dentro de la subestructura. El método propuesto no necesita conocer el modelo del comportamiento dinámico de la estructura.

Por otra parte, en este segundo capítulo se realiza la comparación entre el método de localización de daño propuesto y dos métodos de *substructuring* analizados en el estado del arte. El primero de ellos, representa la dinámica de la subestructura mediante modelos *Autoregressive Moving Average with exogenous inputs* (ARMAX) y detecta daño analizando cambios en los parámetros de dichos modelos [Xing,2012]. El segundo método identifica daño en las subestructuras mediante observadores Bayesianos [Koh,1991].

El método de localización de daño propuesto ha sido evaluado numérica y experimentalmente en un banco de ensayos de dinámica unidimensional. Los dos métodos de *substructuring* replicados han sido evaluados numéricamente.

## 2.2 Desarrollo analítico del método de localización de daño

Sea un sistema mecánico de varios GDL cuyas ecuaciones dinámicas se pueden expresar de la siguiente manera:

$$M\ddot{\mathbf{z}}(t) + C\dot{\mathbf{z}}(t) + K\mathbf{z}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2.1)$$

donde  $\mathbf{z}(t)$  es el vector de desplazamiento de los GDL del sistema y  $\mathbf{f}(t)$  recoge el vector de fuerza aplicado en cada GDL del sistema.  $M$ ,  $C$  y  $K$  son las matrices de masa, amortiguamiento viscoso y rigidez del sistema respectivamente.

El sistema puede dividirse en  $q$  diferentes subestructuras, estando cada una formada por  $n$  GDL internos y  $m$  GDL de interfaz.

Podemos representar la ecuación dinámica del GDL interno  $l$  de la subestructura  $k$  de la siguiente manera:

$$M_{il}\ddot{\mathbf{z}}_{il}(t) = -\sum_{p=1}^N \left( \mathbf{f}_p \left\{ \mathbf{z}_i(t), \dot{\mathbf{z}}_i(t), \mathbf{z}_j(t), \dot{\mathbf{z}}_j(t) \right\} \right) + \mathbf{f}_{il}(t) \quad (2.2)$$

donde  $M_{il}$  es la matriz de masa del cuerpo interno  $l$  y  $\ddot{\mathbf{z}}_{il}(t)$  es su correspondiente vector de aceleración en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .  $\mathbf{f}_p$  es una función que determina las fuerzas aplicadas sobre el GDL interno  $l$ .  $\mathbf{z}_i(t)$  y  $\mathbf{z}_j(t)$  son los vectores de desplazamiento de los GDL internos y de interfaz conectados al GDL interno  $l$ . Finalmente,  $\mathbf{f}_{il}(t)$  es el vector de fuerzas externas aplicado en el GDL interno  $l$ , con componentes en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Expandiendo la función  $\mathbf{f}_p$  de la ecuación (2.2) en series de Taylor [Zhao,2008] y seleccionando únicamente el primer término, la ecuación dinámica para el GDL interno  $l$  es la siguiente:

$$M_{il}\ddot{\mathbf{z}}_{il}(t) = -\sum_{p=1}^N \left( \mathbf{K}_{il-p} \left( \mathbf{z}_{il}(t) - \mathbf{z}_p(t) \right) + \mathbf{C}_{il-p} \left( \dot{\mathbf{z}}_{il}(t) - \dot{\mathbf{z}}_p(t) \right) \right) + \mathbf{f}_{il}(t) \quad (2.3)$$

donde  $\mathbf{z}_{il}(t)$  es el vector de desplazamiento del GDL interno  $l$  y  $\mathbf{z}_p(t)$  es el vector de desplazamiento de los  $N$  GDL, bien internos o bien de interfaz, conectados al GDL interno  $l$ .  $\mathbf{K}_{il-p}$  y  $\mathbf{C}_{il-p}$  son matrices de rigidez y amortiguamiento.

Discretizando según [Olver,2014], la ecuación dinámica del GDL interno  $l$  se puede representar tal que:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{il} \left( \frac{\mathbf{z}_{il}(n) - 2\mathbf{z}_{il}(n-1) + \mathbf{z}_{il}(n-2)}{\mathbf{T}_s^2} \right) = & \quad (2.4) \\ = - \sum_{p=1}^N \left( \mathbf{K}_{il-p} (\mathbf{z}_{il}(n-1) - \mathbf{z}_p(n-1)) + \mathbf{C}_{il-p} \left( \frac{\mathbf{z}_{il}(n) - \mathbf{z}_{il}(n-2)}{2\mathbf{T}_s} - \frac{\mathbf{z}_p(n) - \mathbf{z}_p(n-2)}{2\mathbf{T}_s} \right) \right) + \mathbf{f}_{il}(n-1) \end{aligned}$$

Despejando  $\mathbf{z}_{il}(n)$  de la ecuación (2.4), la ecuación dinámica en tiempo discreto del GDL interno  $l$  se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_{il}(n) = & \left[ \frac{\mathbf{M}_{il}}{\mathbf{T}_s^2} + \sum_{p=1}^N \frac{\mathbf{C}_{il-p}}{2\mathbf{T}_s} \right]^{-1} \left( \left[ \frac{2\mathbf{M}_{il}}{\mathbf{T}_s^2} - \sum_{p=1}^N \mathbf{K}_{il-p} \right] \mathbf{z}_{il}(n-1) + \left[ -\frac{\mathbf{M}_{il}}{\mathbf{T}_s^2} + \sum_{p=1}^N \frac{\mathbf{C}_{il-p}}{2\mathbf{T}_s} \right] \mathbf{z}_{il}(n-2) \right. \\ & \left. + \left[ \sum_{p=1}^N \frac{\mathbf{C}_{il-p}}{2\mathbf{T}_s} \right] \mathbf{z}_p(n) + \left[ \sum_{p=1}^N \mathbf{K}_{il-p} \right] \mathbf{z}_p(n-1) - \left[ \sum_{p=1}^N \frac{\mathbf{C}_{il-p}}{2\mathbf{T}_s} \right] \mathbf{z}_p(n-2) + \mathbf{f}_{il}(n-1) \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Considerando todos los GDL internos, la dinámica de la subestructura puede ser representada mediante la siguiente ecuación:



(2.6)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i1}(n) \\ \mathbf{z}_{i2}(n) \\ \dots \\ \mathbf{z}_{in-1}(n) \\ \mathbf{z}_{in}(n) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i1}(n-1) \\ \mathbf{z}_{i2}(n-1) \\ \dots \\ \mathbf{z}_{in-1}(n-1) \\ \mathbf{z}_{in}(n-1) \end{bmatrix} + \mathbf{A}_2 \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i1}(n-2) \\ \mathbf{z}_{i2}(n-2) \\ \dots \\ \mathbf{z}_{in-1}(n-2) \\ \mathbf{z}_{in}(n-2) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{10} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{j1}(n) \\ \mathbf{z}_{j2}(n) \\ \dots \\ \mathbf{z}_{jm-1}(n) \\ \mathbf{z}_{jm}(n) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{11} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{j1}(n-1) \\ \mathbf{z}_{j2}(n-1) \\ \dots \\ \mathbf{z}_{jm-1}(n-1) \\ \mathbf{z}_{jm}(n-1) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{12} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{j1}(n-2) \\ \mathbf{z}_{j2}(n-2) \\ \dots \\ \mathbf{z}_{jm-1}(n-2) \\ \mathbf{z}_{jm}(n-2) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{21} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{i1}(n-1) \\ \mathbf{f}_{i2}(n-1) \\ \dots \\ \mathbf{f}_{in-1}(n-1) \\ \mathbf{f}_{in}(n-1) \end{bmatrix}$$

$\mathbf{z}_{i1}, \dots, \mathbf{z}_{inz}$  corresponden al desplazamiento de los  $n$  GDL internos y  $\mathbf{z}_{j1}, \dots, \mathbf{z}_{jm}$  al desplazamiento de los  $m$  GDL de interfaz, en los ejes  $x, y, z$ . Por otra parte,  $\mathbf{f}_{i1}, \dots, \mathbf{f}_{in}$  son las fuerzas externas aplicadas en los GDL de la subestructura en los ejes  $x, y, z$ .

Se observa que la ecuación (2.6) toma la forma de un modelo VARX [Lutkepohl,2005]. Podemos diferenciar dos partes en esta ecuación: la parte correspondiente a la respuesta natural (variables endógenas) y la parte correspondiente a la respuesta forzada (variables exógenas). Las variables endógenas del modelo VARX de la ecuación (2.6) corresponden al desplazamiento de los  $n$  GDL internos de la subestructura, mientras que las variables exógenas corresponden al desplazamiento de los  $m$  GDL de interfaz.

Los elementos de las matrices  $\mathbf{A}_1$  y  $\mathbf{A}_2$ , dependen de la masa de los GDL internos de la subestructura y de las propiedades físicas de los resortes y amortiguadores viscosos (coeficiente de rigidez y amortiguamiento) ubicados entre dichos GDL internos. Los elementos de las matrices  $\mathbf{B}_{10}$ ,  $\mathbf{B}_{11}$  y  $\mathbf{B}_{12}$  en cambio, dependen de la masa de los GDL de interfaz y de las propiedades físicas de los resortes y amortiguadores viscosos ubicados entre dichos GDL de interfaz y los GDL internos de la subestructura.

En el método de localización de daño propuesto se estima primero un modelo VARX de la subestructura en un estado sano. Posteriormente, cada vez que se quiera evaluar el estado de dicha subestructura, se vuelve a estimar otro modelo VARX con nuevos datos.

Con el fin de determinar el estado de salud de los elementos de la subestructura (resortes y amortiguadores viscosos) se calcula un indicador de daño para cada uno de ellos. En el caso de los elementos que se encuentran ubicados entre GDL internos, en el indicador de daño se comparan las nuevas matrices  $\mathbf{A}_1$  y  $\mathbf{A}_2$  respecto a las del estado sano. El contenido de cada elemento de estas matrices está relacionado con

las propiedades físicas de uno o varios elementos de la subestructura. Analizando qué elementos de dichas matrices son las que cambian, deducimos cuales son los elementos de la subestructura que han variado su comportamiento estructural, localizándose con ello el daño. En el caso de los elementos que se encuentran ubicados entre GDL internos y GDL de interfaz, en el indicador de daño se comparan elementos de las matrices  $B_{10}$ ,  $B_{11}$  y  $B_{12}$ , realizándose un análisis similar al anterior.

Finalmente, se calcula el error de cuantificación de daño cometido para cada elemento de la subestructura, comparándose para ello el valor tomado por el indicador de daño y la reducción de rigidez generada.

### ***2.3 Evaluación numérica del método de localización de daño***

Esta sección recoge la evaluación del método de localización de daño propuesto en un modelo de parámetros concentrados de dinámica unidimensional. En primer lugar se describe el modelado de la subestructura en VARX. Posteriormente se describe la aplicación del método en el modelo de parámetros concentrados. Finalmente se muestran los resultados obtenidos.

#### **2.3.1 Modelado de la subestructura en VARX**

La dinámica de la estructura a analizar se describe mediante el modelo de parámetros concentrados mostrado en la Figura 2.1, el cual es excitado mediante la aplicación de una fuerza de tipo ruido blanco gaussiano en el GDL  $z_1$ .

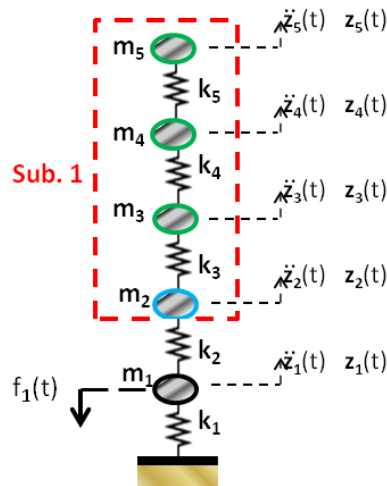


Figura 2.1: Modelo 1D de parámetros concentrados y subestructura aislada

La ecuación que rige la dinámica del modelo de la Figura 2.1 es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_1(t) \\ \ddot{z}_2(t) \\ \ddot{z}_3(t) \\ \ddot{z}_4(t) \\ \ddot{z}_5(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4+k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \\ z_4(t) \\ z_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Se selecciona una subestructura para su posterior aislamiento y monitorización. La subestructura (ver Figura 2.1) está formada por los GDL internos  $z_3$ ,  $z_4$  y  $z_5$  y el GDL de interfaz  $z_2$ . La ecuación que rige la dinámica de la subestructura es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_3(t) \\ \ddot{z}_4(t) \\ \ddot{z}_5(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_3+k_4 & -k_4 & 0 \\ -k_4 & k_4+k_5 & -k_5 \\ 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3(t) \\ z_4(t) \\ z_5(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} z_2(t) = 0 \quad (2.8)$$

Discretizando según [Olver,2014], la ecuación dinámica de la subestructura queda de la siguiente manera:

(2.9)

$$\frac{1}{T_s^2} \begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3(n) - 2z_3(n-1) + z_3(n-2) \\ z_4(n) - 2z_4(n-1) + z_4(n-2) \\ z_5(n) - 2z_5(n-1) + z_5(n-2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 \\ 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3(n-1) \\ z_4(n-1) \\ z_5(n-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} z_2(n-1) = 0$$

Despejando  $z_3(n)$ ,  $z_4(n)$  y  $z_5(n)$  de la ecuación (2.9) se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} z_3(n) \\ z_4(n) \\ z_5(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_s^2}{m_3} \left(-\frac{2m_3}{T_s^2} + k_3 + k_4\right) & -\frac{T_s^2}{m_3} k_4 & 0 \\ -\frac{T_s^2}{m_4} k_4 & \frac{T_s^2}{m_4} \left(-\frac{2m_4}{T_s^2} + k_4 + k_5\right) & -\frac{T_s^2}{m_4} k_5 \\ 0 & -\frac{T_s^2}{m_5} k_5 & \frac{T_s^2}{m_5} \left(-\frac{2m_5}{T_s^2} + k_5\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3(n-1) \\ z_4(n-1) \\ z_5(n-1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3(n-2) \\ z_4(n-2) \\ z_5(n-2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s^2}{m_3} k_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} z_2(n-1) \\ = A_1 \begin{bmatrix} z_3(n-1) \\ z_4(n-1) \\ z_5(n-1) \end{bmatrix} + A_2 \begin{bmatrix} z_3(n-2) \\ z_4(n-2) \\ z_5(n-2) \end{bmatrix} + B_1 z_2(n-1) \quad (2.10)$$

La ecuación (2.10) toma la forma de un modelo VARX con tres variables endógenas ( $z_3(n)$ ,  $z_4(n)$  y  $z_5(n)$ ) y una variable exógena ( $z_2(n)$ ), siendo todas estas variables desplazamiento correspondiente a los GDL de la subestructura.

Los elementos de la matriz  $A_1$  dependen de la masa en los GDL internos de la subestructura, de la constante de rigidez de los resortes ubicados entre dichos GDL internos y del período de muestreo. Los elementos de la matriz  $B_1$  dependen de la masa del GDL de interfaz  $z_2$ , del coeficiente de rigidez del resorte ubicado entre el GDL interno  $z_3$  y el GDL de interfaz  $z_2$  y del período de muestreo.

Considerando que los daños consisten únicamente en pérdidas de rigidez en los resortes, los elementos de las matrices  $A_1$  y  $B_1$  que se analizarán para localizar el daño

serán los que se muestran en la Tabla 2.1, ya que sus valores dependen proporcionalmente de los valores de  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$ .

**Tabla 2.1:** Elementos de las matrices  $A_1$  y  $B_1$  analizados (modelo 1D de parámetros concentrados)

Resorte	Elementos analizados
$k_3$	$B_{1;1,1}$
$k_4$	$A_{1;1,2}$ , $A_{1;2,1}$
$k_5$	$A_{1;2,3}$ , $A_{1;3,2}$

Se calcula el indicador de daño ID2 para cada resorte de la subestructura. Para el cálculo de dichos indicadores se analiza la variación sufrida por los elementos de las matrices  $A_1$  y  $B_1$  indicados, en concreto, se estima la reducción porcentual de rigidez sufrida por cada resorte de la subestructura. Tomando como ejemplo  $k_4$ , el indicador de daño ID2 de la misma se calcula tal como se ve en la formula inferior, calculándose la media de las variaciones que se detectan en los dos elementos de la matriz  $A_1$  que dependen proporcionalmente de  $k_4$ , esto es,  $A_{1;1,2}$  y  $A_{1;2,1}$ :

$$ID2(k_4) = \left( \left| \frac{|A_{1;1,2}^e| - |A_{1;1,2}^s|}{|A_{1;1,2}^s|} \right| + \left| \frac{|A_{1;2,1}^e| - |A_{1;2,1}^s|}{|A_{1;2,1}^s|} \right| \right) \times \frac{100}{2} \quad (2.11)$$

$A_{1;1,2}^s$  y  $A_{1;2,1}^s$  son los coeficientes correspondientes al estado sano, mientras que  $A_{1;1,2}^e$  y  $A_{1;2,1}^e$  son los coeficientes del estado a evaluar. El indicador de daño ID2 para  $k_3$  y  $k_5$  se calcula de la misma manera pero analizando los elementos correspondientes para cada una de ellas (ver Tabla 2.1).

El error cometido en la cuantificación de daño se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Error de cuantificación } k_i(\%) = \left( \frac{|\text{Reducción } k_i \text{ real } (\%) - \text{Indicador de daño } k_i (\%)|}{|\text{Reducción } k_i \text{ real } (\%)|} \right) \times 100 \quad (2.12)$$

siendo  $k_i$  el coeficiente de rigidez de un resorte ubicado dentro de la subestructura cuyo estado se quiere conocer y  $k_j$  el coeficiente de rigidez del resorte en el que se ha introducido el daño, pudiendo estar ubicado dentro o fuera de la subestructura.

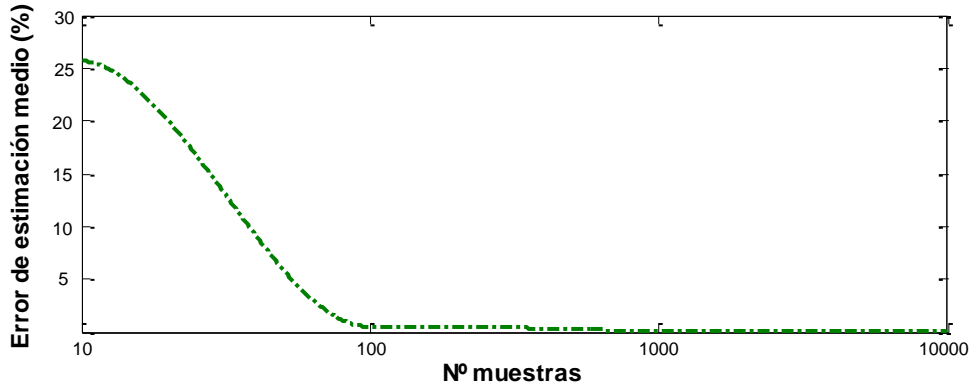
### 2.3.2 Aplicación del método en el modelo de parámetros concentrados

Se ha simulado en MATLAB el modelo de parámetros concentrados mostrado en la Figura 2.1. La masa de los cuatro primeros cuerpos ha sido de 3,628 kg cada uno y la masa del quinto cuerpo de 3,384 kg. El coeficiente de rigidez de los resortes ha sido 66,618 kN/m. Las cinco frecuencias naturales del modelo se sitúan en 6,2 Hz, 18,1 Hz, 28,4 Hz, 36,4 Hz y 41,4 Hz.

El modelo ha sido excitado mediante la aplicación de una fuerza de tipo ruido blanco gaussiano en el GDL  $z_1$  y el desplazamiento de los GDL  $z_2$ ,  $z_3$ ,  $z_4$  y  $z_5$  ha sido obtenido integrando las ecuaciones dinámicas con un paso de integración de 0,005 s. El desplazamiento obtenido mediante simulación ha sido utilizado para estimar el modelo VARX descrito en la ecuación (2.10). La estimación de los modelos VARX se ha llevado a cabo mediante el Toolbox Econometrics de MATLAB, siendo el estimador seleccionado el *Multivariate Least Square* (MLS) [Bishop,1977].

Un parámetro fundamental a ajustar en la estimación de los modelos VARX es la cantidad de muestras a utilizar, siendo lo ideal utilizar la mínima cantidad de muestras que garanticen una adecuada estimación del modelo. En el método propuesto se han comparado los elementos a analizar de las matrices  $A_1$  y  $B_1$  entre el modelo VARX de referencia, estimado con un número elevado de muestras, y nuevos modelos VARX, estimados con una cantidad menor de muestras. En concreto, se ha calculado el error de estimación cometido para  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  en cada uno de estos nuevos modelos VARX. Este error de estimación ha sido calculado con la ecuación (2.12), comparándose en este caso los elementos de los modelos VARX estimados con diferente cantidad de muestras, siendo todos ellos simulados en el estado sano.

La Figura 2.2 muestra el error de estimación medio cometido para  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  en función del número de muestras utilizadas en la estimación. El modelo VARX de referencia ha sido estimado utilizando 100000 muestras. La Figura 2.2 muestra que utilizar un número de muestras inferior a 100 provoca errores de estimación elevados, mientras que al utilizar 1000 muestras el error de estimación cometido es inferior a 0,05 %, siendo apenas mejorado al utilizar más muestras. Los modelos VARX han sido estimados utilizando 1000 muestras.



**Figura 2.2:** Error de estimación medio del modelo VARX en función del número de muestras (modelo 1D de parámetros concentrados)

El método de localización de daño ha sido evaluado en los doce escenarios mostrados en la Tabla 2.2. En tres de estos escenarios el daño ha sido introducido fuera de la subestructura y en los nueve restantes dentro de ella. Los daños han consistido en la pérdida de la rigidez de los resortes, evaluándose pérdidas del 12,5 %, 25 % y 50 %.

**Tabla 2.2:** Escenarios evaluados en la localización de daño (modelo 1D de parámetros concentrados)

Escenario	Pérdida de rigidez (%)				
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
<b>Daño fuera de la subestructura</b>					
1	--	12,5	--	--	--
2	--	25	--	--	--
3	--	50	--	--	--
<b>Daño dentro de la subestructura</b>					
4	--	--	12,5	--	--
5	--	--	25	--	--
6	--	--	50	--	--
7	--	--	--	12,5	--
8	--	--	--	25	--
9	--	--	--	50	--
10	--	--	--	--	12,5
11	--	--	--	--	25
12	--	--	--	--	50

### 2.3.3 Resultados numéricos

En la Tabla 2.3 se presentan los resultados obtenidos en la localización de daño. Por una parte, se muestra el valor del indicador de daño ID2 para  $k_3$ ,  $k_4$ , y  $k_5$  en los doce escenarios evaluados. Por otra parte, se muestra el error de cuantificación medio y máximo cometido en cada uno de esos doce escenarios evaluados (ver ecuación (2.12)). Los resultados muestran que al introducir daño fuera de la subestructura los indicadores de daño ID2 de  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  se sitúan por debajo de 0,21 %. Por otra parte, al introducir daño dentro de la subestructura, el indicador de daño ID2 más elevado corresponde siempre al resorte dañado, cometándose un error de cuantificación máximo del 1,12 %. Dicho error corresponde al escenario en el que se provoca una pérdida de rigidez del 12,5 % en  $k_4$ , siendo ese mismo escenario el que muestra el error de cuantificación medio más elevado (0,90 %).

**Tabla 2.3:** Resultados de localización de daño (modelo 1D de parámetros concentrados)

Escenario		Indicador de daño ID2 (%)			Error de cuantificación (%)	
		$k_3$	$k_4$	$k_5$	media	máx.
$k_2$ (%)	12,5	0,03	0,01	0,01	0,13	0,24
	25	0,07	0,04	0,01	0,15	0,28
	50	0,21	0,14	0,06	0,27	0,42
$k_3$ (%)	12,5	12,45	0,12	0,09	0,69	0,96
	25	24,77	0,07	0,03	0,44	0,92
	50	49,61	0,48	0,24	0,74	0,96
$k_4$ (%)	12,5	0,09	12,64	0,11	0,90	1,12
	25	0,24	25,16	0,23	0,84	0,96
	50	0,31	50,46	0,39	0,77	0,92
$k_5$ (%)	12,5	0,05	0,09	12,43	0,72	1,04
	25	0,12	0,19	24,81	0,66	0,76
	50	0,27	0,41	50,43	0,74	0,86

Por tanto, los resultados obtenidos muestran que el método de localización de daño propuesto permite aislar la subestructura en el modelo de parámetros concentrados, y localizar daño dentro de dicha subestructura. Además el método propuesto permite cuantificar daño en el modelo de parámetro concentrados con un error máximo del 1,12 %.



## **2.4 Evaluación experimental del método de localización de daño**

En esta sección se presenta la evaluación del método de localización de daño propuesto en un banco de ensayos de dinámica unidimensional. En primer lugar se recoge el diseño y la validación del banco de ensayos. En segundo lugar se detalla la aplicación del método propuesto en el banco de ensayos. Finalmente se presentan los resultados experimentales obtenidos.

### **2.4.1 Diseño y validación del banco de ensayos**

Se ha diseñado un banco de ensayos cuyo comportamiento dinámico sea lo más similar posible al del modelo de parámetros concentrados presentado en la sección 2.3.2 (ver Figura 2.1). El banco de ensayos consta de cinco plantas, donde cada una de ellas está formada por un sólido horizontal de  $160 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$ , cuatro sólidos verticales de  $203 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$  y dos sólidos diagonales de  $203 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$ , todos ellos de acero (ver Figura 2.3). Las dimensiones y los materiales de los sólidos han sido elegidos para que la masa y rigidez total de cada planta equivalgan a los valores de masa y rigidez asignados a cada cuerpo en el modelo de parámetros concentrados. En primer lugar, se ha implementado un modelo de elementos finitos (EF) del banco de ensayos en ANSYS, donde los sólidos han sido primero modelados mediante elementos *shell* y unidos después mediante uniones *bounded* [Madenci,2015]. Una vez evaluado el método de localización de daño propuesto en el modelo EF, se ha construido el banco de ensayos. En este banco de ensayos los sólidos han sido unidos por medio de uniones atornilladas con un par de apriete de 10 N·m. El modelo EF del banco de ensayos, así como el propio banco de ensayos, son mostrados en la Figura 2.3.

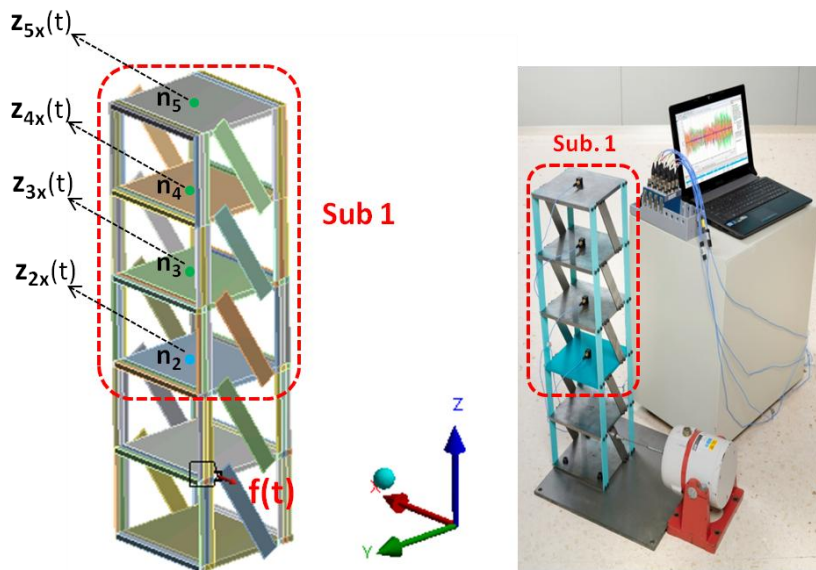


Figura 2.3: Modelo EF y banco de ensayos 1D

### 2.4.1.1 Modelo de elementos finitos

Se ha realizado un análisis modal en ANSYS mediante el solver *Block Lanczos* [Poole,2003]. Las cinco primeras frecuencias naturales del modelo EF se sitúan en 7,36 Hz, 20,29 Hz, 31,56 Hz, 42,53 Hz y 51,59 Hz. La Tabla 2.4 muestra la desviación entre las frecuencias naturales del modelo EF y las frecuencias naturales del modelo de parámetros concentrados evaluado en la sección 2.3, así como el MAC entre las formas modales de ambos modelos. La desviación frecuencial media es del 13,27 %, mientras que la desviación máxima es del 24,61 %, siendo en todos los casos las frecuencias naturales del modelo EF más altos. En cuanto a las formas modales, el MAC medio es del 91,25 %, mientras el MAC mínimo es del 84,54 %. Estos resultados muestran que el comportamiento modal del modelo EF es similar al del modelo de parámetros concentrados.

Tabla 2.4: Comparación modal (modelo EF y modelo 1D de parámetros concentrados)

Nº modo	Frecuencia (Hz)			MAC(%)
	M. EF	M. parámetros concentrados	Desviación (%)	
1	7,36	6,2	18,71	95,21
2	20,29	18,1	12,09	96,33
3	31,56	28,4	11,12	88,74
4	42,53	36,4	16,84	91,45
5	51,59	41,4	24,61	84,54

La Figura 2.4 muestra la forma en la que vibran los primeros cinco modos del modelo EF. Como se puede apreciar en la figura, la dinámica del modelo se concentra principalmente en el eje x.

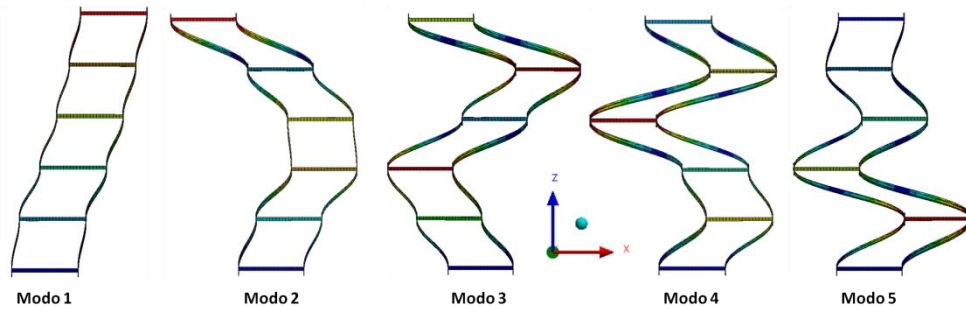


Figura 2.4: Forma modal de los primeros cinco modos (modelo EF 1D)

### 2.4.1.2 Banco de ensayos

Se ha llevado a cabo el análisis operacional modal (*OMA, Operational Modal Analysis*) [Reynders,2012] del banco de ensayos mediante el software Operational Modal Analysis Type 7760 de Brüel and Kjaer. Para ello la estructura ha sido excitada mediante el conjunto formado por el excitador electromecánico LDS-V406 de Brüel and Kjaer y un stinger fabricado para tal fin. El excitador electromecánico ha sido configurado para que excite la estructura mediante una fuerza de tipo ruido blanco gaussiano, aplicándose dicha fuerza en la planta 1 y en el eje x (ver Figura 2.3). Se han colocado acelerómetros triaxiales 356A17 de PCB Piezoelectronics en el centro de cada placa horizontal de la subestructura. Para la adquisición de datos se ha utilizado el equipo de National Instruments CompactDAQ, los módulos de entradas analógicas NI 9234 y el software de adquisición Signal Express. La adquisición de datos se ha realizado con una frecuencia de muestreo de 1,652 kHz.

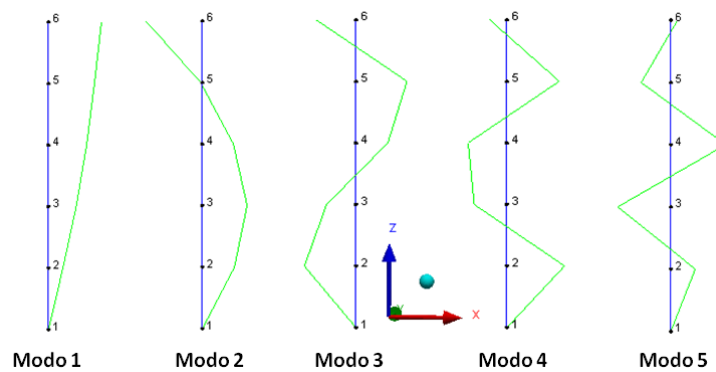
Los resultados obtenidos indican que las cinco primeras frecuencias naturales del banco de ensayos se sitúan en 6,94 Hz, 20,97 Hz, 33,56 Hz, 43,07 Hz y 49,53 Hz. La Tabla 2.5 muestra la desviación entre las frecuencias naturales experimentales y las frecuencias naturales obtenidas del modelo EF. Como se muestra en la tabla, la desviación frecuencial media es del 4,12 % y la máxima del 6,05 %. En cuanto a la similitud de las formas modales, el MAC medio es del 94,05 %, mientras que el mínimo

es del 91,54 %. Estos resultados muestran que el comportamiento modal del modelo EF es similar al del banco de ensayos.

**Tabla 2.5:** Comparación modal (banco de ensayos y modelo EF 1D)

Nº modo	Frecuencia (Hz)			MAC(%)
	Experimental	M. EF	Desviación (%)	
1	6,94	7,36	-6,05	96,34
2	20,97	20,29	3,24	93,56
3	33,56	31,56	5,95	91,54
4	43,07	42,53	1,25	92,45
5	49,53	51,59	-4,15	96,39

La Figura 2.5 muestra la forma en la que vibran los primeros cinco modos experimentales. Analizando la figura, se ve que la dinámica de la estructura se concentra sobre todo en el eje x.



**Figura 2.5:** Forma modal de los primeros cinco modos experimentales (banco de ensayos 1D)

### 2.4.2 Aplicación del método en el banco de ensayos

El método de localización de daño propuesto ha sido aplicado en el modelo EF y en el banco de ensayos para monitorizar la subestructura (ver Figura 2.3).

### 2.4.2.1 Modelo de elementos finitos

El modelo EF ha sido excitado mediante la aplicación de una fuerza de tipo ruido blanco gaussiano en la planta 1 y en el eje x (ver Figura 2.3). Se ha obtenido el desplazamiento de los GDL  $z_2$ ,  $z_3$ ,  $z_4$  y  $z_5$  utilizando un paso de integración de 0,005 s. El desplazamiento simulado ha sido utilizado para estimar el modelo VARX descrito en la ecuación (2.10). La estimación de los modelos VARX se ha llevado a cabo mediante el Toolbox Econometrics de MATLAB, siendo el estimador seleccionado el *Multivariate Least Square* (MLS) [Bishop,1977].

Se ha analizado el error de estimación de los modelos VARX de la subestructura en función del número de muestras utilizadas en la estimación de la misma forma que en la sección 2.3.2. La Figura 2.6 muestra que utilizar un número de muestras inferior a 100 provoca errores de estimación elevados, mientras que al utilizar 1000 muestras el error de estimación cometido es inferior a 0,1 %, siendo apenas mejorado al utilizar más muestras. Los modelos VARX han sido estimados utilizando 1000 muestras.

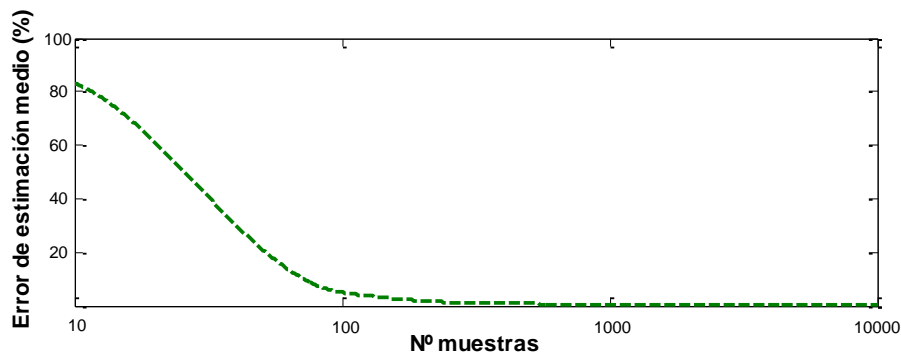
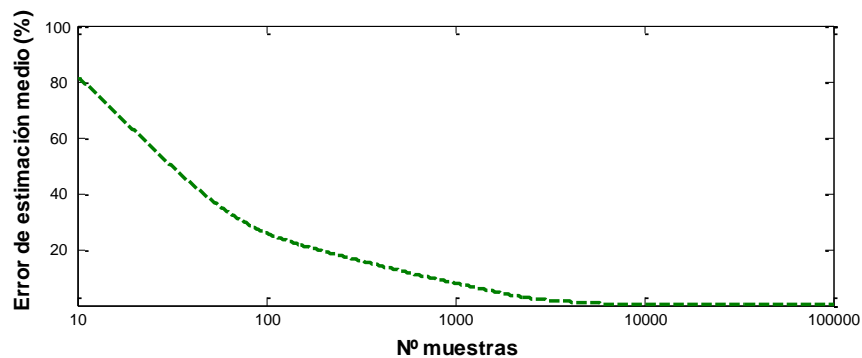


Figura 2.6: Error de estimación medio del modelo VARX en función del número de muestras (modelo EF 1D)

### 2.4.2.2 Banco de ensayos

La estructura ha sido excitada y la aceleración ha sido adquirida de la misma forma que en el análisis operacional modal. El desplazamiento necesario para la estimación del modelo VARX de la subestructura (ver ecuación (2.10)) ha sido obtenido integrando la aceleración medida. La estimación de los modelos VARX se ha llevado a cabo mediante el Toolbox Econometrics de MATLAB, siendo el estimador seleccionado el *Multivariate Least Square* (MLS) [Bishop,1977].

Al igual que en los casos previos, se ha analizado el error de estimación de los modelos VARX de la subestructura en función del número de muestras utilizados en la estimación. La Figura 2.7 muestra que para obtener errores de estimación inferiores al 5 % es necesario utilizar un número de muestras superior a 1000, descendiendo dicho error al 0,27 % al utilizar 10000 muestras. La utilización de un número mayor de muestras no reduce apenas el error de estimación, por lo que se ha decidido que los modelos VARX sean estimados utilizando 10000 muestras.



**Figura 2.7:** Error de estimación medio del modelo VARX en función del número de muestras (banco de ensayos 1D)

Los escenarios evaluados experimentalmente, tanto en el modelo EF como en el banco de ensayos, son los mismos, en cuanto a ubicación y magnitud de daño, a los escenarios evaluados en el modelo de parámetros concentrados. No obstante, la forma de generar el daño es diferente. En este caso, el daño consiste en la sustitución de los sólidos verticales originales por otros sólidos de menor sección, siendo la sección de estos últimos, dos tercios menor que el de los sólidos originales. Los escenarios evaluados se han mostrado en la Tabla 2.2 de la sección 2.3.2.

### 2.4.3 Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos, tanto en el modelo EF, como en el banco de ensayos.

### 2.4.3.1 Modelo de elementos finitos

La Tabla 2.6 muestra los resultados de localización de daño obtenidos al evaluar el método propuesto en el modelo EF. Los resultados muestran que al introducir daño fuera de la subestructura los indicadores de daño ID2 de  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  se sitúan por debajo de 1,21 %. Por otra parte, al introducir daño dentro de la subestructura, el indicador de daño ID2 más elevado corresponde siempre a la planta dañada, cometiéndose un error de cuantificación máximo del 8,08 %. El escenario en el que se comete el mayor error medio de cuantificación es aquel en el que se provoca una pérdida de rigidez del 12,5 % en  $k_5$ , siendo dicho error del 5,76 %.

**Tabla 2.6:** Resultados de localización de daño (modelo EF 1D)

Escenario		Indicador de daño ID2 (%)			Error de cuantificación (%)	
		$k_3$	$k_4$	$k_5$	media	máx.
$k_2$ (%)	12,5	0,88	0,37	0,42	4,45	7,04
	25	1,21	0,67	0,36	2,98	4,84
	50	1,13	0,92	1,01	2,04	2,26
$k_3$ (%)	12,5	12,94	0,79	0,57	4,80	6,32
	25	26,03	1,89	1,22	5,52	7,56
	50	51,23	3,06	1,23	3,68	6,12
$k_4$ (%)	12,5	0,93	13,01	0,39	4,85	7,44
	25	1,15	24,03	0,54	3,54	4,60
	50	1,87	51,34	2,42	3,75	4,84
$k_5$ (%)	12,5	0,77	1,01	12,68	5,76	8,08
	25	1,28	0,98	24,53	3,64	5,12
	50	1,67	3,12	48,88	3,94	6,24

Por tanto, los resultados obtenidos muestran que el método de localización de daño propuesto permite aislar la subestructura en el modelo EF, y localizar daño dentro de dicha subestructura. En comparación con los resultados obtenidos en el modelo de parámetros concentrados, se observa un aumento en el error de cuantificación. Así, el error de cuantificación máximo aumenta del 1,12 % al 8,08 % y el mayor error medio de cuantificación por escenario pasa del 0,9 % al 5,76 %.

### 2.4.3.2 Banco de ensayos

La Tabla 2.7 muestra los resultados experimentales obtenidos en la localización de daño. Los resultados muestran que al introducir daño fuera de la subestructura los indicadores de daño ID2 de  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  se sitúan por debajo de 4,14 %. Por otra parte, al introducir daño dentro de la subestructura, el indicador de daño ID2 más elevado corresponde siempre a la planta dañada, cometiéndose un error de cuantificación máximo del 30,72 %. El escenario en el que se comete el mayor error medio de cuantificación es aquel en el que se provoca una pérdida de rigidez del 12,5 % en  $k_2$ , siendo dicho error del 14,24 %.

Tabla 2.7: Resultados de localización de daño (banco de ensayos 1D)

Escenario		Indicador de daño ID2 (%)			Error de cuantificación (%)	
		$k_3$	$k_4$	$k_5$	media	máx.
$k_2$ (%)	12,5	0,62	2,96	1,76	14,24	23,68
	25	0,20	1,58	4,14	7,89	16,56
	50	1,01	4,11	1,54	4,44	8,22
$k_3$ (%)	12,5	13,56	2,17	1,01	11,30	17,36
	25	26,37	4,02	2,84	10,97	16,04
	50	51,93	5,33	2,42	6,45	10,66
$k_4$ (%)	12,5	0,16	16,34	1,08	13,54	30,72
	25	1,38	24,16	1,88	5,46	7,52
	50	2,51	49,30	2,47	3,78	5,02
$k_5$ (%)	12,5	0,72	1,81	13,71	9,97	14,48
	25	0,05	4,67	23,01	8,95	18,68
	50	0,03	2,34	51,76	2,75	4,68

Por tanto, los resultados obtenidos muestran que el método de localización de daño propuesto permite aislar la subestructura en el banco de ensayos construido, y localizar daño dentro de dicha subestructura. En comparación con los resultados obtenidos en el modelo EF, el error de cuantificación máximo ha aumentado considerablemente, pasando del 5,76 % al 30,72 %. De la misma manera, el mayor error medio de cuantificación por escenario pasa del 5,76 % al 14,24 %.



## 2.5 Análisis comparativo entre el método SHM propuesto y dos métodos de substructuring de referencia

En este apartado se comparan los resultados numéricos obtenidos mediante el método de localización de daño propuesto (ver sección 2.3.3) y los resultados obtenidos mediante dos métodos de *substructuring* analizados en el estado del arte [Xing,2012] [Koh,1991].

### 2.5.1 Método de detección de daño basado en modelos ARMAX

El método propuesto por Xing y Mita en [Xing,2012] ha sido aplicado en el sistema descrito en la sección 2.3 para detectar daño dentro de la subestructura, el cual consta de 3 GDL internos y 1 GDL de interfaz. Como el método propuesto por Xing y Mita permite detectar daño únicamente en subestructuras de un único GDL interno, la subestructura ha sido dividida a su vez en dos subestructuras de un único GDL interno, denominadas subestructura 1.1 y la subestructura 1.2. Cada una de estas subestructuras será evaluada por separado.

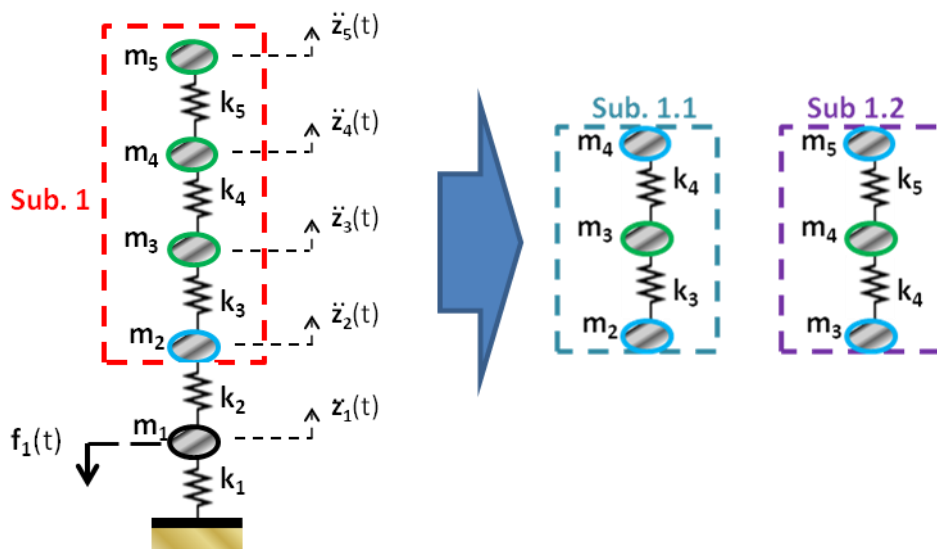


Figura 2.8: Modelo 1D de parámetros concentrados y subestructuras 1.1 y 1.2

Los modelos ARMAX han sido estimados utilizando las mismas series temporales que en la sección 2.3, y los escenarios evaluados también son los mismos que en dicha sección (ver Tabla 2.2).

Para facilitar la detección de daño se ha calculado un umbral de daño para cada una de las subestructuras, de forma que si el indicador de daño ID1 (ver ecuación (1.10)) relativo a un determinado escenario supera el umbral establecido, dicho escenario será automáticamente catalogado como dañado. El umbral de daño ha sido establecido en función del valor tomado por el indicador de daño ID1 al evaluar cinco nuevos escenarios sanos ( $ID1_0$ ). La fórmula utilizada para el cálculo del umbral de daño es la siguiente:

$$\text{Umbral} = \mu(ID1_0) + 10\sigma(ID1_0) \quad (2.13)$$

#### 2.5.1.1 Resultados numéricos

En la Figura 2.9 se presenta el indicador de daño ID1 obtenido para la subestructura 1.1 en cada uno de los doce escenarios evaluados (ver Tabla 2.2). Los indicadores de daño son representados mediante un color diferente en función de la posición en la que se ha introducido el daño, siendo el color amarillo asignado a los escenarios con daño en  $k_2$ , azul  $k_3$ , rojo  $k_4$  y verde  $k_5$ .

Los resultados muestran que los daños introducidos dentro de la subestructura 1.1 ( $k_3$  y  $k_4$ ) son detectados. Asimismo, el indicador de daño ID1 correspondiente a los daños ubicados fuera de la subestructura 1.1 ( $k_2$  y  $k_5$ ) no sobrepasan el umbral de daño, por lo que la subestructura 1.1 ha sido aislada correctamente. Se observa también que al introducir daño dentro de la subestructura 1,1, el valor del indicador de daño ID1 aumenta a medida que lo hace también la magnitud del daño introducido.

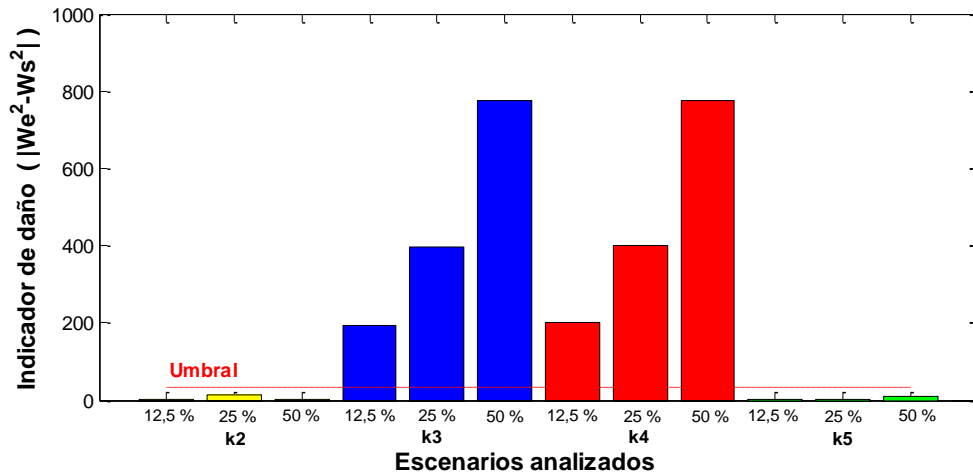


Figura 2.9: Resultados de detección de daño (método basado en modelos ARMAX[Xing,2012],sub 1.1)

En la Figura 2.10 se presenta el indicador de daño ID1 obtenido para la subestructura 1.2 en cada uno de los doce escenarios evaluados. Los resultados muestran que los daños introducidos dentro de la subestructura 1.2 ( $k_4$  y  $k_5$ ) son detectados, mientras que los daños introducidos fuera de la subestructura ( $k_2$  y  $k_3$ ) no superan el umbral de daño. Al igual que en los resultados correspondientes a la subestructura 1.1, el indicador de daño ID1 aumenta a medida que lo hace también la magnitud del daño introducido.

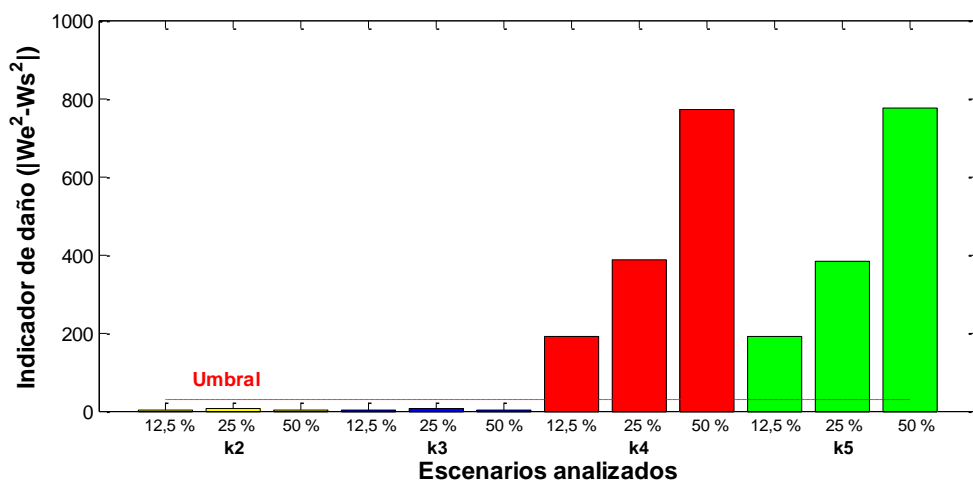


Figura 2.10: Resultados de detección de daño (método basado en modelos ARMAX[Xing,2012],sub 1.2)

Por tanto, el método propuesto por Xing y Mita en [Xing,2012] permite aislar las subestructuras 1.1 y 1.2 en el modelo de parámetros concentrados y detectar daño dentro de ellas. No obstante, no permite localizar daño.

### 2.5.2 Método de localización de daño basado en observadores Bayesianos

El método propuesto por Koh en [Koh,1991] ha sido aplicado en el sistema descrito en la sección 2.3 para localizar daño dentro de la subestructura. En concreto, se ha estimado el valor de  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  mediante EKF. Primero se han estimado los valores de  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  partiendo de datos relativos al estado sano, y posteriormente, cada vez que se ha realizado una evaluación de la subestructura, se han vuelto a estimar los nuevos valores de  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$ . Finalmente, se ha calculado un indicador de daño ID3 para  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  analizando la variación sufrida por ellos:

$$ID3(k_i) = \left( \frac{|k_i^e - k_i^s|}{k_i^s} \right) \times 100 \quad (2.14)$$

$k_i^s$  es el valor estimado para el parámetro  $k_i$  en el estado sano y  $k_i^e$  el valor estimado para ese mismo parámetro en el estado a evaluar. Por tanto, el indicador de daño ID3 utilizado determina la reducción porcentual de rigidez de los resortes ubicados dentro de la subestructura. A su vez, se ha calculado el error de cuantificación cometido para cada parámetro estimado, utilizando para ello la ecuación (2.12).

En cuanto a la aplicación de EKF, se ha observado el desplazamiento y la velocidad en los 3 GDL internos de la subestructura y en el GDL de interfaz. Por otra parte, el valor asignado a la diagonal de la matriz de covarianza del vector de observación de ruido,  $R$ , ha sido 0,1, el valor inicial de los parámetros a estimar cero, y el valor asignado a la diagonal de la matriz de covarianza del error del proceso,  $P$ , para respuestas y para parámetros ha sido 1 y  $1 \times 10^{13}$  respectivamente. Se han evaluado los doce escenarios descritos en la Tabla 2.2 y para ello se han utilizado las mismas series temporales que en la sección 2.3.

### 2.5.2.1 Resultados numéricos

En la Tabla 2.8 se presentan los resultados obtenidos al aplicar el método propuesto por Koh [Koh,1991] en el modelo de parámetros concentrados de la Figura 2.1. Los resultados muestran que al introducir daño fuera de la subestructura los indicadores de daño ID3 de  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  se sitúan por debajo de 0,1 %. Por otra parte, al introducir daño dentro de la subestructura, el indicador de daño ID3 más elevado corresponde siempre al resorte dañado, cometiéndose un error de cuantificación máximo del 0,84 %. El escenario con un mayor error de cuantificación medio es aquel en el que se provoca una pérdida de rigidez del 50 % en  $k_5$ , siendo dicho error del 0,65 %.

**Tabla 2.8:** Resultados de localización de daño (método basado en EKF [Koh,1991])

Escenario		Indicador de daño ID3 (%)			Error de cuantificación (%)	
		$k_3$	$k_4$	$k_5$	media	máx.
$k_2$ (%)	12,5	0,01	0,01	0,01	0,08	0,08
	25	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04
	50	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
$k_3$ (%)	12,5	12,52	0,01	0,02	0,04	0,16
	25	25,09	0,03	0,02	0,19	0,36
	50	49,87	0,19	0,11	0,28	0,38
$k_4$ (%)	12,5	0,02	12,54	0,03	0,24	0,32
	25	0,17	24,97	0,11	0,41	0,68
	50	0,24	50,39	0,28	0,61	0,78
$k_5$ (%)	12,5	0,02	0,04	12,53	0,24	0,32
	25	0,13	0,11	25,21	0,60	0,84
	50	0,28	0,36	50,34	0,65	0,72

Por tanto, los resultados obtenidos muestran que el método propuesto por Koh permite aislar la subestructura en el modelo de parámetros concentrados, y localizar daño dentro de dicha subestructura. Además el método propuesto permite cuantificar daño en el modelo de parámetro concentrados con un error máximo del 0,84 %. No obstante, necesita conocer el modelo del comportamiento dinámico de la estructura.

### 2.5.3 Conclusiones del análisis comparativo

En [Xing,2012] se presenta un método basado en modelos ARMAX que permite detectar daño en subestructuras de un grado de libertad interno, no siendo posible localizar el daño dentro de la subestructura ni aplicarlo en subestructuras de más de un grado de libertad interno. A diferencia de este método basado en modelos ARMAX, el método propuesto en la tesis permite localizar y cuantificar el daño dentro de subestructuras de varios grados de libertad internos, permitiendo la monitorización de estructuras de dinámica tridimensional. Ninguno de los dos métodos requiere el conocimiento del modelo del comportamiento dinámico del sistema para poder monitorizarlo.

Con el método propuesto en [Koh,1991] se localiza y cuantifica daño dentro de subestructuras de varios grados de libertad internos. El error de cuantificación cometido por el método basado en observadores Bayesianos es inferior al error cometido por el método propuesto en esta tesis. No obstante, el método basado en observadores Bayesianos requiere conocer el modelo del comportamiento dinámico del sistema.

Por lo tanto, el método propuesto en esta tesis presenta respecto al método basado en modelos ARMAX [Xing,2012] la ventaja de poder localizar daño en subestructuras de más de un grado de libertad interno, y por tanto en subestructuras de dinámica tridimensional. Frente al método basado en observadores Bayesianos [Koh,1991] en cambio, el método propuesto en esta tesis presenta la ventaja de no necesitar el modelo del comportamiento dinámico del sistema.

## 2.6 Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto un método de monitorización estructural que localiza daño en subestructuras utilizando únicamente acelerómetros para la captación de datos. El método propuesto aísla las subestructuras mediante una técnica de *substructuring* y representa la dinámica de las subestructuras mediante modelos VARX, siendo el daño localizado dentro de las subestructuras mediante el análisis de estos modelos VARX. Asimismo, no es necesario conocer el modelo del

comportamiento dinámico del sistema para localizar el daño. El método propuesto ha sido evaluado en un banco de ensayos de dinámica unidimensional, tanto numérica como experimentalmente. Los resultados obtenidos muestran que el método de localización de daño propuesto permite aislar la subestructura en la estructura, y localizar y cuantificar daño dentro de dicha subestructura.

En este capítulo se ha comparado el método de localización de daño propuesto con dos métodos de *substructuring* analizados en el estado del arte, uno basado en modelos ARMAX y el otro basado en observadores Bayesianos. Los resultados obtenidos muestran que el método propuesto en esta tesis presenta respecto al primer método la ventaja de poder localizar daño en subestructuras de más de un grado de libertad interno, y por tanto en subestructuras de dos y tres dimensiones. Frente al segundo método en cambio, el método propuesto en esta tesis presenta la ventaja de no necesitar el modelo del comportamiento dinámico del sistema, aunque si la topología de la subestructura.





# 3

## **Método de localización de daño estructural con medidas incompletas**

### ***3.1 Introducción***

El método de localización de daño propuesto en el capítulo 2 precisa de información proveniente de todos los grados de libertad de la subestructura. En este capítulo se presenta un método para localizar daño en subestructuras utilizando un conjunto reducido de sensores, no siendo necesario por tanto sensorizar toda la subestructura. El método propuesto en este capítulo analiza cambios de conectividad entre los grados de libertad medidos de la subestructura, localizando daño dentro de la misma en función de estos cambios. La conectividad es analizada mediante la causalidad de Granger multivariable condicional propuesta por Barnett y Seth [Barnett,2014].

El método de localización de daño propuesto ha sido evaluado numérica y experimentalmente en un banco de ensayos de dinámica unidimensional.

### 3.2 Monitorización de estructuras con medidas incompletas

En esta sección se describen los conceptos teóricos en los que se fundamenta el método de localización de daño propuesto en este capítulo. Primeramente se presenta la causalidad de Granger multivariable (*MVGC, MultiVariate Granger Causality*) [Barnett,2014]. Posteriormente, se describe el método propuesto para la localización de daño.

#### 3.2.1 Causalidad de Granger multivariable

La causalidad de Granger [Granger,1969] analiza la dependencia causal entre dos procesos estocásticos. Se considera que un proceso estocástico  $\mathbf{Y}$  causa otro proceso estocástico  $\mathbf{X}$ , si el conocimiento de los valores pasados de  $\mathbf{Y}$  permite un mejor pronóstico de  $\mathbf{X}$  que el obtenido con un conjunto de información determinado (incluyendo valores pasados de  $\mathbf{X}$ ). Más recientemente, Barnett y Seth [Barnett,2014] han extendido el concepto propuesto por Granger para poder aplicarlo en sistemas multivariados. Sea el modelo VAR definido por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{U}(n) = \sum_{k=1}^p \mathbf{A}_k \mathbf{U}(n-k) + \boldsymbol{\varepsilon}(n) \quad (3.1)$$

donde

$$\mathbf{U}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(n) \\ \mathbf{Y}(n) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

siendo  $\mathbf{A}_k$  las matrices del modelo VAR,  $p$  el orden del modelo y  $\boldsymbol{\varepsilon}(n)$  el vector de los residuos.

La causalidad de Granger multivariable determina el incremento de  $\boldsymbol{\varepsilon}(n)$  al predecir el proceso  $\mathbf{X}$  únicamente mediante la información del proceso  $\mathbf{X}$ , excluyendo por tanto la información del proceso  $\mathbf{Y}$ . Dentro de la causalidad de Granger multivariable se puede distinguir entre la causalidad incondicional y la causalidad condicional [Barnett,2014].

### 3.2.1.1 Causalidad de Granger multivariable incondicional

La causalidad de Granger multivariable incondicional determina la dependencia causal entre los procesos  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$ . No obstante, si existe una dependencia causal entre los procesos  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}$  y un tercer proceso  $\mathbf{Z}$ , pueden originarse causalidades espurias. Por tanto, aunque no exista una causalidad directa de  $\mathbf{Y}$  hacia  $\mathbf{X}$ , es posible que se detecte causalidad entre ellos a consecuencia de la dependencia entre  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$  en  $\mathbf{Z}$  [Barnett,2014].

Sea el proceso  $\mathbf{U}$  compuesto por dos procesos multivariados,  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$ . El modelo VAR del proceso  $\mathbf{U}$  se puede representar de la siguiente manera [Barnett,2014]:

$$\mathbf{U}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(n) \\ \mathbf{Y}(n) \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^p \begin{bmatrix} A_{xx,k} & A_{xy,k} \\ A_{yx,k} & A_{yy,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}(n-k) \\ \mathbf{Y}(n-k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_x(n) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_y(n) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$A_{xx,k}$  y  $A_{xy,k}$  son las matrices del modelo VAR que relacionan linealmente los valores pasados de los procesos  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$  con la predicción del proceso  $\mathbf{X}$  en el instante  $n$ .  $A_{yx,k}$  y  $A_{yy,k}$  son las matrices del modelo VAR que relacionan linealmente los valores pasados de los procesos  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$  con la predicción del proceso  $\mathbf{Y}$  en el instante  $n$ .  $\boldsymbol{\varepsilon}_x(n)$  y  $\boldsymbol{\varepsilon}_y(n)$  son los vectores de los residuos de la predicción de los procesos  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$  respectivamente.

De la ecuación (3.3), la predicción del proceso  $\mathbf{X}$  puede formularse mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{X}(n) = \sum_{k=1}^p A_{xx,k} \mathbf{X}(n-k) + \sum_{k=1}^p A_{xy,k} \mathbf{Y}(n-k) + \boldsymbol{\varepsilon}_x(n) \quad (3.4)$$

La ecuación (3.4) se define como el modelo VAR completo del proceso  $\mathbf{X}$  según [Barnett,2014]. Como se puede ver en la ecuación (3.4), el modelo VAR completo predice el proceso  $\mathbf{X}$  utilizando tanto los valores pasados de  $\mathbf{X}$  como de  $\mathbf{Y}$ .

Por otro lado, la ecuación (3.5) se define como el modelo VAR reducido del proceso  $\mathbf{X}$  [Barnett,2014], el cual predice el proceso  $\mathbf{X}$  utilizando únicamente los valores pasados de  $\mathbf{X}$  [Barnett,2014].

$$\mathbf{X}(n) = \sum_{k=1}^p \mathbf{A}'_{xx,k} \mathbf{X}(n-k) + \boldsymbol{\varepsilon}'_x(n-k) \quad (3.5)$$

$\mathbf{A}'_{xx,k}$  son las matrices del modelo VAR reducido y  $\boldsymbol{\varepsilon}'_x(n)$  es el vector de los residuos de la predicción del proceso  $\mathbf{X}$ .

La causalidad de Granger incondicional de  $\mathbf{Y}$  hacia  $\mathbf{X}$  determina el incremento del error de predicción del proceso  $\mathbf{X}$  empleando el modelo VAR reducido en lugar del modelo VAR completo. La causalidad de Granger incondicional de  $\mathbf{Y}$  hacia  $\mathbf{X}$  se calcula de la siguiente manera [Barnett,2014]:

$$F_{\mathbf{Y} \rightarrow \mathbf{X}} \equiv \ln \frac{|\boldsymbol{\Sigma}'_{xx}|}{|\boldsymbol{\Sigma}_{xx}|} \quad (3.6)$$

donde  $\boldsymbol{\Sigma}_{xx}$  es la matriz de covarianza de  $\boldsymbol{\varepsilon}_x(n)$  y  $\boldsymbol{\Sigma}'_{xx}$  es la matriz de covarianza de  $\boldsymbol{\varepsilon}'_x(n)$ .

### 3.2.1.2 Causalidad de Granger multivariable condicional

La causalidad de Granger multivariable condicional determina la dependencia causal directa entre los procesos  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$ , condicionada en el proceso  $\mathbf{Z}$  [Barnett,2014].

Sea el proceso  $\mathbf{U}$  compuesto por dos procesos multivariables,  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$ . El modelo VAR del proceso  $\mathbf{U}$  se puede representar de la siguiente manera:

$$\mathbf{U}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(n) \\ \mathbf{Y}(n) \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^p \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{xx,k} & \mathbf{A}_{xy,k} \\ \mathbf{A}_{yx,k} & \mathbf{A}_{yy,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}(n-k) \\ \mathbf{Y}(n-k) \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^p \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{xz,k} \\ \mathbf{A}_{yz,k} \end{bmatrix} \mathbf{Z}(n-k) + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_x(n) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_y(n) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

De la ecuación (3.7), la predicción del proceso  $\mathbf{X}$  puede formularse mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{X}(n) = \sum_{k=1}^p \mathbf{A}_{xx,k} \mathbf{X}(n-k) + \sum_{k=1}^p \mathbf{A}_{xy,k} \mathbf{Y}(n-k) + \sum_{k=1}^p \mathbf{A}_{xz,k} \mathbf{Z}(n-k) + \boldsymbol{\varepsilon}_x(n) \quad (3.8)$$

La ecuación (3.8) se define como el modelo VAR completo del proceso  $\mathbf{X}$  según [Barnett,2014]. Según la ecuación (3.8) el modelo VAR completo predice el proceso  $\mathbf{X}$  utilizando los valores pasados de  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}$  y  $\mathbf{Z}$ .

Por otro lado, la ecuación (3.9) se definen como el modelo VAR reducido del proceso  $\mathbf{X}$  [Barnett,2014], el cual predice el proceso  $\mathbf{X}$  utilizando únicamente los valores pasados de  $\mathbf{X}$ , así como los valores pasados del proceso  $\mathbf{Z}$ .

$$\mathbf{X}(n) = \sum_{k=1}^p \mathbf{A}'_{xx,k} \mathbf{X}(n-k) + \sum_{k=1}^p \mathbf{A}'_{xz,k} \mathbf{Z}(n-k) + \boldsymbol{\varepsilon}'_x(n) \quad (3.9)$$

La causalidad de Granger de  $\mathbf{Y}$  hacia  $\mathbf{X}$  condicionada en  $\mathbf{Z}$  determina el incremento del error de predicción del proceso  $\mathbf{X}$  empleando el modelo VAR reducido en lugar del modelo VAR completo. La causalidad de Granger de  $\mathbf{Y}$  hacia  $\mathbf{X}$  condicionada en  $\mathbf{Z}$  se formula de la siguiente manera [Barnett,2014]:

$$F_{\mathbf{Y} \rightarrow \mathbf{X} | \mathbf{Z}} \equiv \ln \frac{|\boldsymbol{\Sigma}'_{xx}|}{|\boldsymbol{\Sigma}_{xx}|} \quad (3.10)$$

donde  $\boldsymbol{\Sigma}_{xx}$  es la matriz de covarianza de  $\boldsymbol{\varepsilon}_x(n)$  y  $\boldsymbol{\Sigma}'_{xx}$  es la matriz de covarianza de  $\boldsymbol{\varepsilon}'_x(n)$ .

### 3.2.2 Método de localización de daño con medidas incompletas

El método propuesto localiza daño dentro de las subestructuras sin la información correspondiente a los sensores retirados. Primeramente, se analiza la conectividad entre los GDL internos de la subestructura, siendo estos GDL obtenidos en el estado sano y a partir del conjunto reducido de sensores. Posteriormente, cada vez que se realiza una nueva evaluación, se vuelve a analizar la conectividad entre los mismos GDL internos. En cada una de estas nuevas evaluaciones se calcula un indicador de daño ID4 para cada conexión existente dentro de la subestructura, entendiéndose como conexión a la relación causal bidireccional existente entre dos GDL internos. Tomando como ejemplo la conexión entre los GDL internos  $i$  y  $j$ , el indicador de daño ID4 para dicha conexión se calculará mediante la siguiente ecuación:

(3.11)

$$\text{ID4 (conexión } ij) = \left( \left| \frac{|F_{z_i \rightarrow z_j}^e| - |F_{z_i \rightarrow z_j}^s|}{|F_{z_i \rightarrow z_j}^s|} \right| + \left| \frac{|F_{z_j \rightarrow z_i}^e| - |F_{z_j \rightarrow z_i}^s|}{|F_{z_j \rightarrow z_i}^s|} \right| \right) \times \frac{100}{2}$$

donde  $F_{z_i \rightarrow z_j}^s$  y  $F_{z_j \rightarrow z_i}^s$  representan la causalidad de Granger condicional de  $z_i$  hacia  $z_j$  y de  $z_j$  hacia  $z_i$  en el estado sano y  $F_{z_i \rightarrow z_j}^e$  y  $F_{z_j \rightarrow z_i}^e$  representan la causalidad de Granger condicional de  $z_i$  hacia  $z_j$  y de  $z_j$  hacia  $z_i$  en el estado a evaluar.

La ubicación del daño lo definirá la conexión con el indicador de daño ID4 más elevado, situando el daño entre los dos GDL de esa conexión.

### 3.3 Evaluación numérica del método de localización de daño

En esta sección se evalúa el método de localización de daño propuesto con un conjunto reducido de sensores en el modelo de elementos finitos del banco de ensayos de dinámica unidimensional (ver Figura 3.1). Se presenta la forma en la que se ha aplicado el método y los resultados obtenidos.

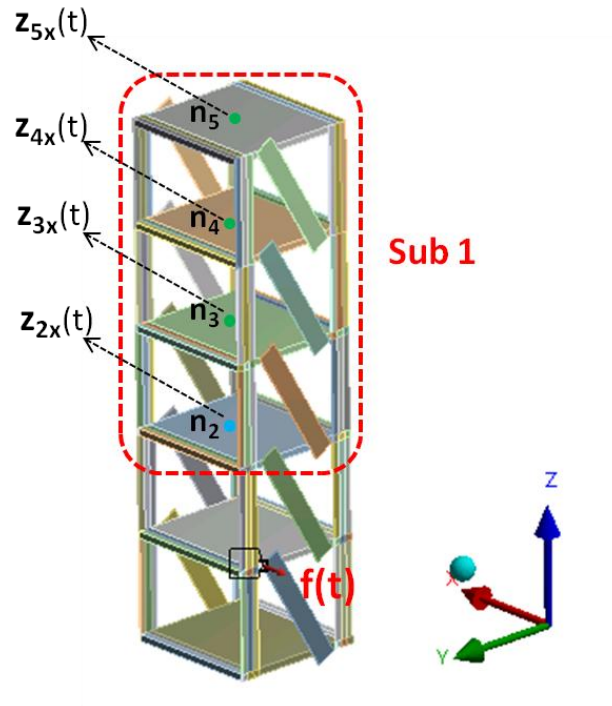


Figura 3.1: Modelo EF del banco de ensayos 1D

#### 3.3.1 Aplicación del método en el modelo de elementos finitos

Se ha analizado la conectividad entre los GDL internos de la subestructura sana ( $z_{3x}$ ,  $z_{4x}$  y  $z_{5x}$ ) mediante la aplicación de la causalidad de Granger multivariable condicional, utilizándose para ello el Toolbox MVGC [Barnett,2014]. Se parte del modelo VARX estimado para la subestructura sana en el capítulo 2 (ver sección 2.4.2.1) y se ha analizado la causalidad de Granger condicional de todas las combinaciones posibles en cuanto a variables asignadas a los procesos  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , siendo dichas combinaciones mostradas en la Tabla 3.1.



**Tabla 3.1:** Combinaciones analizadas con MVCG

Nº combinación	X	Y	Z
1	$Z_{3x}$	$Z_{4x}$	$Z_{5x}$
2	$Z_{3x}$	$Z_{5x}$	$Z_{4x}$
3	$Z_{4x}$	$Z_{3x}$	$Z_{5x}$
4	$Z_{4x}$	$Z_{5x}$	$Z_{3x}$
5	$Z_{5x}$	$Z_{3x}$	$Z_{4x}$
6	$Z_{5x}$	$Z_{4x}$	$Z_{3x}$

Analizar cambios de conectividad entre los GDL  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  debería permitir la monitorización de toda la subestructura. Por este motivo, se ha decidido retirar el sensor de la planta 4. Se perderá la capacidad de determinar la planta exacta en la que se encuentra el daño, pero debería ser posible determinar si la subestructura está dañada.

Se ha calculado primero la conectividad entre los GDL internos  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  en el estado sano. Posteriormente, cada vez que se ha realizado una nueva evaluación de la estructura, se ha vuelto a analizar la conectividad entre los GDL internos  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$ , calculándose después el indicador de daño ID4 correspondiente a esta conexión (ecuación (3.11)). Las series temporales utilizadas en esta evaluación numérica son las mismas que las utilizadas en el capítulo 2 (ver sección 2.4.2.1). La conectividad entre los GDL  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  ha sido analizada mediante la aplicación de la causalidad de Granger multivariable condicional, utilizándose para ello el Toolbox MVGC [Barnett,2014].

El método de localización de daño ha sido evaluado en los mismos doce escenarios que en el capítulo 2 (ver Tabla 2.2).

### 3.3.2 Resultados numéricos

La conectividad de la subestructura es mostrada en la Figura 3.2 a través de su correspondiente grafo de causalidad de Granger condicional.

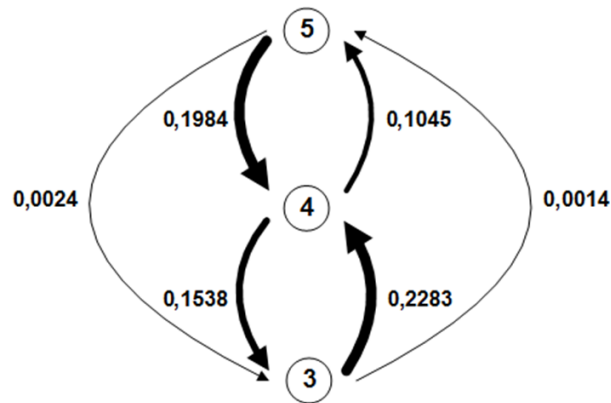


Figura 3.2: Grafo de causalidad de Granger condicional (modelo EF 1D)

La Figura 3.3 muestra la conectividad entre los GDL internos  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  en el estado sano y en los cuatro escenarios evaluados con daños equivalentes a una reducción de rigidez en planta ( $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , y  $k_5$ ) del 50 %.

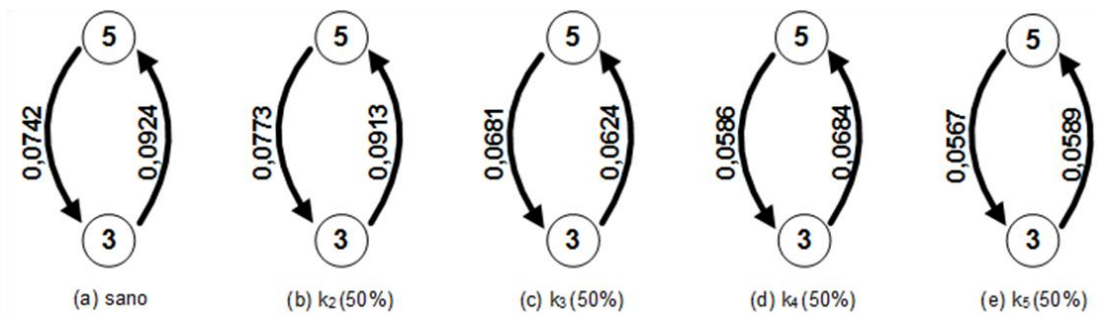


Figura 3.3: Conectividad entre GDL  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  (sensor retirado en planta 4, daño del 50 %, modelo EF 1D)

La Figura 3.4 muestra la conectividad entre los GDL internos  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  en el estado sano y en los cuatro escenarios evaluados con daños equivalentes a una reducción de rigidez en planta ( $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , y  $k_5$ ) del 25 %.

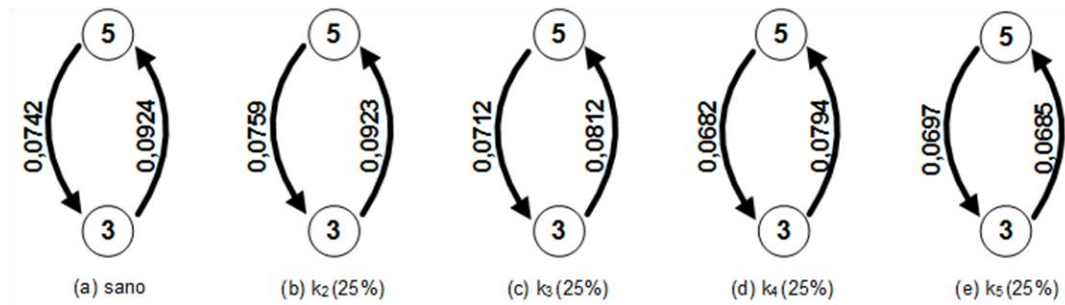


Figura 3.4: Conectividad entre GDL  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  (sensor retirado en planta 4, daño del 25 %, modelo EF 1D)

La Figura 3.5 muestra la conectividad entre los GDL internos  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  en el estado sano y en los cuatro escenarios evaluados con daños equivalentes a una reducción de rigidez en planta ( $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , y  $k_5$ ) del 12,5 %.

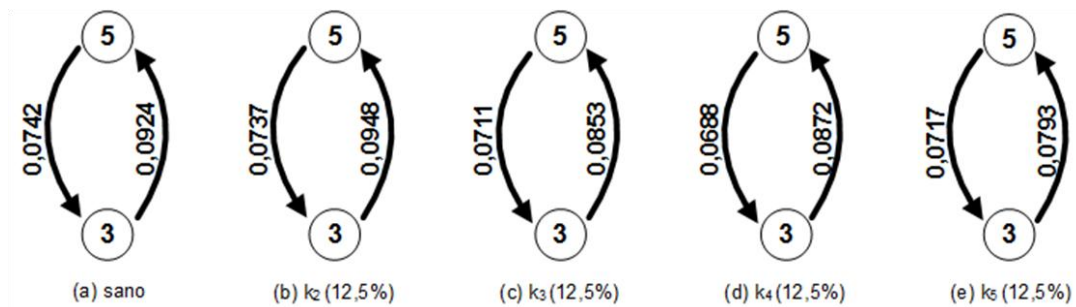


Figura 3.5: Conectividad entre GDL  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  (sensor retirado en planta 4, daño del 12,5 %, modelo EF 1D)

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados obtenidos en la localización de daño habiendo retirado el sensor de la planta 4. Los resultados muestran que al introducir daño fuera de la subestructura ( $k_2$ ), el valor del indicador de daño ID4 es menor que al introducir daño dentro de la subestructura ( $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$ ).

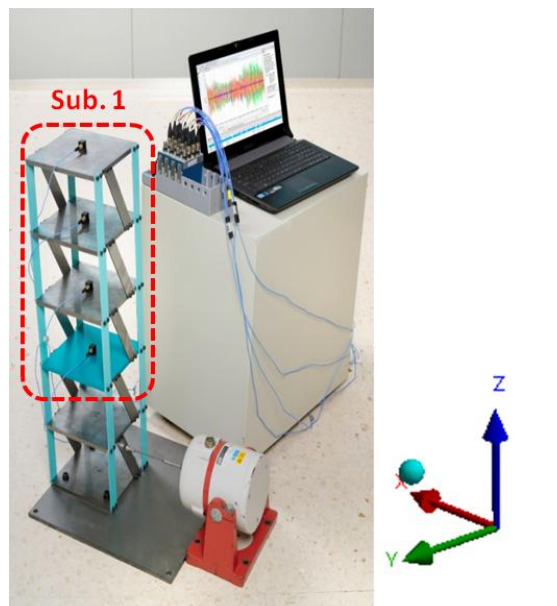
Tabla 3.2: Resultados de localización de daño (sensor retirado en planta 4, modelo EF 1D)

Escenario		Indicador de daño ID4 (%)
$k_2$ (%)	12,5	1,63
	25	1,19
	50	2,68
$k_3$ (%)	12,5	5,93
	25	8,08
	50	20,34
$k_4$ (%)	12,5	6,45
	25	11,07
	50	23,49
$k_5$ (%)	12,5	8,77
	25	15,96
	50	29,92

Los resultados numéricos muestran que el método de localización de daño propuesto permite detectar daño en la subestructura sin la información correspondiente al sensor de la planta 4, no en cambio determinar en qué planta de la subestructura se encuentra el daño. Asimismo, los resultados muestran que cuanto mayor es la gravedad del daño, mayor es también la diferencia entre el indicador de daño ID4 calculado para un escenario con daño dentro de la subestructura frente a otro escenario con daño fuera de ella.

### ***3.4 Evaluación experimental del método de localización de daño***

En esta sección se evalúa el método de localización de daño con un conjunto reducido de sensores en el banco de ensayos de dinámica unidimensional (ver Figura 3.6). Se presenta la forma en la que se ha aplicado el método y los resultados obtenidos.



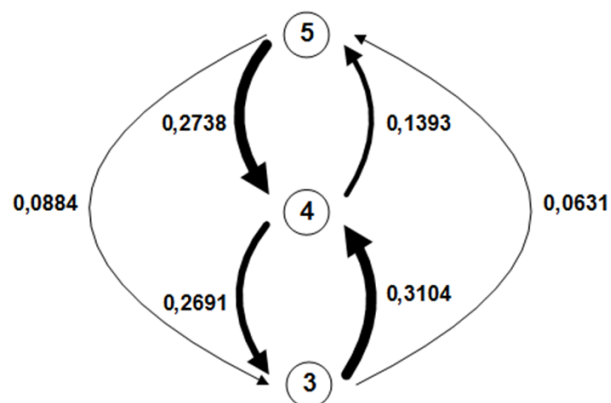
**Figura 3.6:** Banco de ensayos 1D

### 3.4.1 Aplicación del método en el banco de ensayos

Se ha aplicado el método de localización de daño en el banco de ensayos de la misma forma que en el modelo de EF, retirando por tanto el sensor de la planta 4. Se han utilizado las mismas series temporales que en la evaluación experimental del capítulo 2 (ver sección 2.4.2.2). El método de localización de daño ha sido evaluado en los mismos doce escenarios que en el capítulo 2 (ver Tabla 2.2).

### 3.4.2 Resultados experimentales

La conectividad de la subestructura es mostrada en la Figura 3.7 a través de su correspondiente grafo de causalidad de Granger condicional.



**Figura 3.7:** Grafo de causalidad de Granger condicional (banco de ensayos 1D)

La Figura 3.8 muestra la conectividad entre los GDL internos  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  en el estado sano y en los cuatro escenarios evaluados con daños equivalentes a una reducción de rigidez en planta ( $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , y  $k_5$ ) del 50 %.

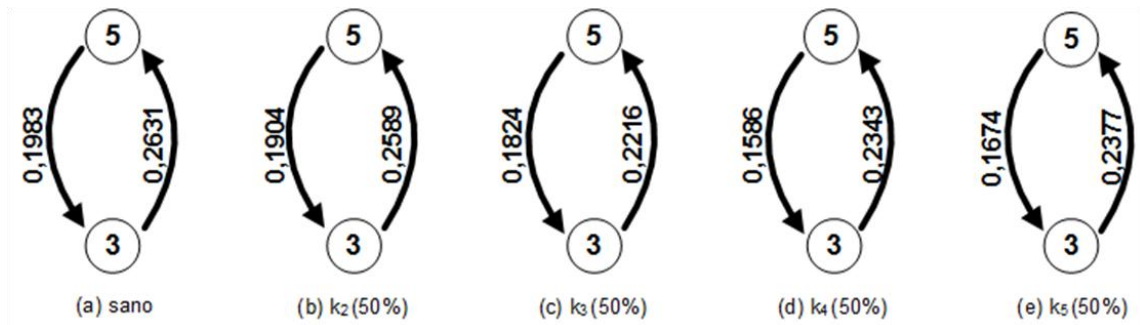


Figura 3.8: Conectividad entre GDL  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  (sensor retirado en planta 4, daño del 50 %, banco de ensayos)

La Figura 3.9 muestra la conectividad entre los GDL internos  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  en el estado sano y en los cuatro escenarios evaluados con daños equivalentes a una reducción de rigidez en planta ( $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , y  $k_5$ ) del 25 %.

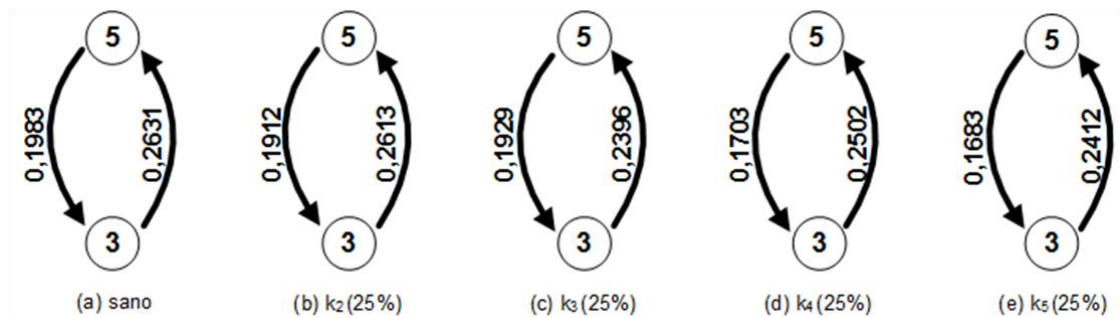
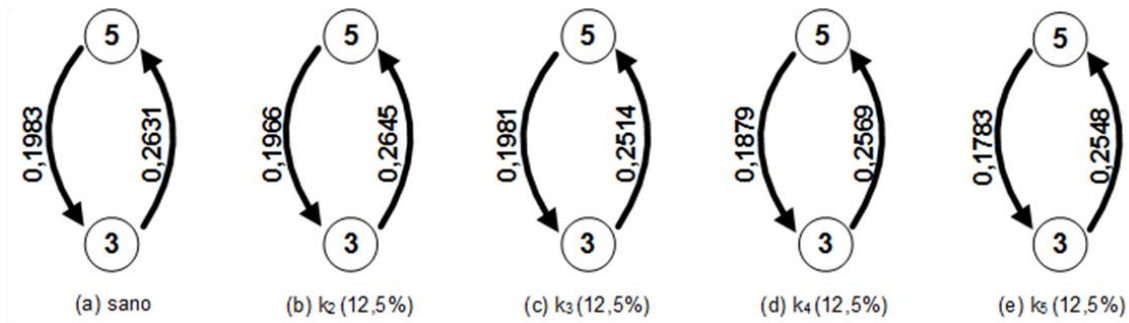


Figura 3.9: Conectividad entre GDL  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  (sensor retirado en planta 4, daño del 25 %, banco de ensayos)

La Figura 3.10 muestra la conectividad entre los GDL internos  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$  en el estado sano y en los cuatro escenarios evaluados con daños equivalentes a una reducción de rigidez en planta ( $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , y  $k_5$ ) del 12,5 %.



**Figura 3.10:** Conectividad entre GDL  $z_{3x}$  y  $z_{5x}$   
(sensor retirado en planta, 4, daño del 12,5 %, banco de ensayos)

En la Tabla 3.3 se presentan los resultados obtenidos en la localización de daño habiendo retirado el sensor de la planta 4. Los resultados muestran que al introducir daño fuera de la subestructura ( $k_2$ ), el valor del indicador de daño ID4 es menor que al introducir daño dentro de la subestructura ( $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$ ), en todos los escenarios menos en aquel en el que se introduce un daño del 12,5 % en  $k_3$ .

**Tabla 3.3:** Resultados de localización de daño (sensor retirado en planta 4, banco de ensayos 1D)

Escenario		Indicador de daño ID4 (%)
$k_2$ (%)	12,5	0,69
	25	2,13
	50	2,79
$k_3$ (%)	12,5	2,27
	25	5,82
	50	11,89
$k_4$ (%)	12,5	3,80
	25	11,52
	50	15,48
$k_5$ (%)	12,5	6,62
	25	11,72
	50	12,61

Los resultados experimentales muestran que el método de localización de daño propuesto permite detectar daño en la subestructura sin la información correspondiente al sensor de la planta 4 en todos los escenarios evaluados exceptuando uno (reducción del 12,5 % en  $k_3$ ). Los resultados muestran que el método no permite determinar en qué planta de la subestructura se encuentra el daño. Asimismo, los resultados muestran que cuanto mayor es la gravedad del daño, mayor es también la diferencia entre el indicador de daño ID4 calculado para un escenario con daño dentro de la subestructura frente a otro escenario con daño fuera de ella.

### ***3.5 Conclusiones***

En este capítulo se ha propuesto un método para localizar daño en subestructuras utilizando un conjunto reducido de sensores. El método propuesto analiza cambios de conectividad entre los grados de libertad medidos de la subestructura, localizando daño dentro de la misma en función de estos cambios. La conectividad es analizada mediante la causalidad de Granger multivariable condicional. El método de localización de daño ha sido evaluado en un banco de ensayos de dinámica unidimensional, tanto numérica como experimentalmente, habiéndose retirado en ambos casos el sensor de la planta 4. Los resultados obtenidos muestran que el método de localización de daño propuesto permite detectar daño en la subestructura sin la información correspondiente al sensor de la planta 4. No obstante, no permite determinar en qué planta de la subestructura se encuentra el daño.



# 4

## **Localización de daño en una estructura de celosía**

## ***4.1 Introducción***

En este capítulo se evalúa el método de localización de daño propuesto en el capítulo 2 en un banco de ensayos de celosía, tanto numérica como experimentalmente.

El capítulo está dividido en dos apartados. En el primero de ellos se describe el banco de ensayos y los modelos de elementos finitos (EF) desarrollados para representar su dinámica. En el segundo apartado se describe la forma en la que se ha aplicado el método y se presentan los resultados obtenidos.

## 4.2 Diseño y validación del banco de ensayos de celosía

Se ha diseñado un banco de ensayos de celosía para que el método de localización de daño propuesto en el capítulo 2 sea evaluado en él utilizando únicamente acelerómetros. Para que no haya giros en los tubos del banco de ensayos, estos tubos deben trabajar como barras, es decir, únicamente a tracción y compresión. El material y geometría de los tubos del banco de ensayos han sido seleccionados para que trabajen como barras. Para comprobar si los tubos del banco de ensayos trabajan a tracción y compresión, se han desarrollado dos modelos EF, el primero mediante elementos *truss* (barra) y el segundo mediante elementos *beam* (viga).

### 4.2.1 Descripción del banco de ensayos

El banco de ensayos está compuesto por 14 rótulas de acero unidas entre sí por medio de 31 tubos cilíndricos de aluminio, formando la geometría de la Figura 4.1. Las rótulas tienen una masa de 0,235 kg cada una y los tubos cilíndricos tienen una longitud de 707 mm, un diámetro exterior de 22 mm y uno interior 20 mm. Los tubos están unidos a las rótulas mediante uniones roscadas con un par de apriete de 10 N·m. El banco de ensayos está atornillado al suelo en sus cuatro extremos con un par de apriete de 10 N·m.

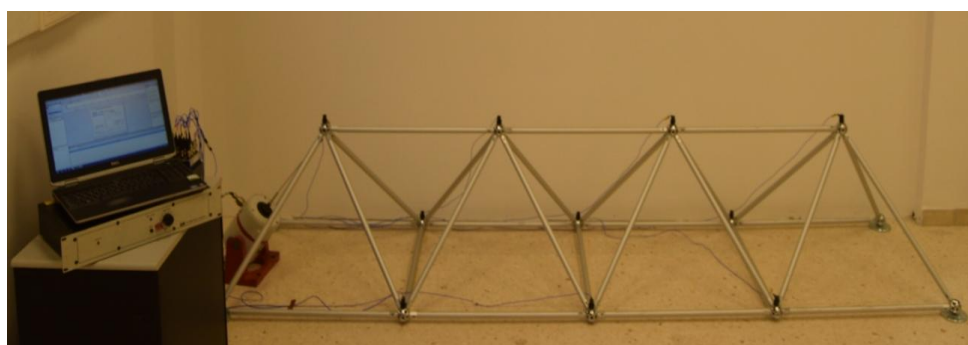


Figura 4.1: Banco de ensayos de celosía

Se han desarrollado dos modelos EF del banco de ensayos en ANSYS (Figura 4.2), modelándose en el primero los tubos como elementos *truss* (barra) y en el

segundo como elementos *beam* (viga) [Lizarza,1998]. En ambos modelos la masa de los tubos cilíndricos ha sido repartida entre sus dos nodos extremos. Las rótulas han sido introducidas en los modelos como masas puntuales.

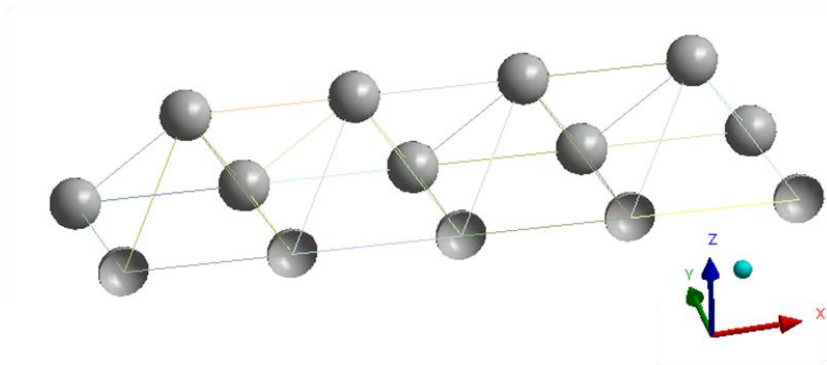


Figura 4.2: Modelo EF del banco de ensayos de celosía

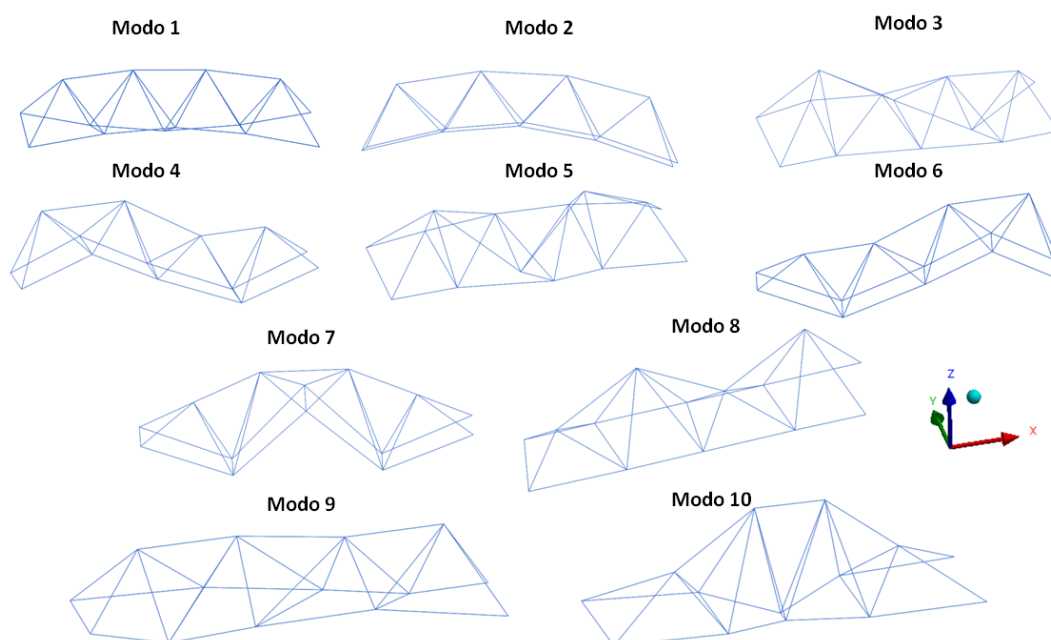
#### 4.2.2 Validación del banco de ensayos

Se ha llevado a cabo un análisis operacional modal (*OMA*, *Operational Modal Analysis*) del banco de ensayos mediante el software *Operational Modal Analysis Type 7760* de Brüel and Kjaer. Para ello la estructura ha sido excitada mediante el conjunto formado por el excitador electromecánico LDS-V406 de Brüel and Kjaer y un stinger, siendo este último el que une el vibrador a la estructura. El excitador electromecánico ha sido configurado para que excite la estructura mediante una fuerza de tipo ruido blanco gaussiano, aplicándose dicha fuerza en el nodo 11 y en los ejes x, y, z (ver Figura 4.1). Se han colocado acelerómetros triaxiales 356A17 de PCB Piezoelectronics en la parte superior de cada rótula de la subestructura. Para la adquisición de datos se ha utilizado el equipo de National Instruments CompactDAQ, los módulos de entradas analógicas NI 9234 y el software de adquisición Signal Express. La adquisición de los datos se ha realizado a una frecuencia de muestreo de 5,120 kHz. La frecuencia natural de los cinco primeros modos del banco de ensayos es mostrada en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Frecuencias naturales del banco de ensayos de celosía

Nº modo	Frecuencia (Hz)
1	103,63
2	152,12
3	162,52
4	170,59
5	172,38

Se ha realizado el análisis modal de los dos modelos EF desarrollados, utilizando para ello el solver *Block Lanczos* de ANSYS [Poole,2003]. La Figura 4.3 presenta la forma modal de los diez primeros modos del modelo EF de barras.



**Figura 4.3:** Forma modal de los 10 primeros modos (modelo EF de barras)

Se han comparado los modos del banco de ensayos con los modos de los dos modelos EF desarrollados, mostrándose los resultados en la Tabla 4.2. Los resultados muestran que los cinco modos experimentales han sido emparejados con modos del modelo EF de vigas, lográndose en dicho emparejamiento un MAC (Modal Assurance Criterion) medio del 78,55 % y una desviación frecuencial media del 4,22 %. Por otra parte, únicamente los dos primeros modos del banco de ensayos han sido emparejados con modos del modelo EF de barras, lográndose en dicho

emparejamiento un MAC medio del 80,87 % y una desviación frecuencial media del 7,28 %.

**Tabla 4.2:** Comparación modal (banco de ensayos respecto a modelos EF de barras y vigas)

Banco de ensayos	Modelo EF vigas			Modelo EF barras		
	f(Hz)	Desv. (%)	MAC	f(Hz)	Desv. (%)	MAC
103,63	106,06	-2,34	91,41	109,95	-6,09	82,21
152,12	159,13	-4,60	87,62	165,01	-8,47	79,54
162,52	166,19	-2,26	72,31	--	--	--
170,59	177,85	-4,26	71,95	--	--	--
172,38	179,63	-7,68	69,47	--	--	--

De la Tabla 4.2 se concluye que el modelo EF de vigas es capaz de reproducir los cinco modos del banco de ensayos, mientras que el modelo EF de barras únicamente los dos primeros. Por tanto, el banco de ensayos de celosía trabaja como una estructura de barras principalmente en sus dos modos asociados a las frecuencias naturales más bajas.

### **4.3 Evaluación numérica del método de localización de daño**

Esta sección recoge la evaluación del método de localización de daño propuesto en el modelo de elementos finitos de vigas para el caso en el que únicamente se mide el desplazamiento en los nodos de la subestructura. En primer lugar se describe el modelado de la subestructura como un modelo VARX. Posteriormente se describe la aplicación del método de localización de daño en el modelo de elementos finitos. Finalmente se muestran los resultados obtenidos.

#### **4.3.1 Modelado de la subestructura en VARX**

La dinámica del banco de ensayos de celosía se describe mediante el modelo EF mostrado en la Figura 4.4. El modelo es excitado mediante la aplicación de una fuerza de tipo ruido blanco gaussiano en el nodo 11 y en los ejes x, y, z.

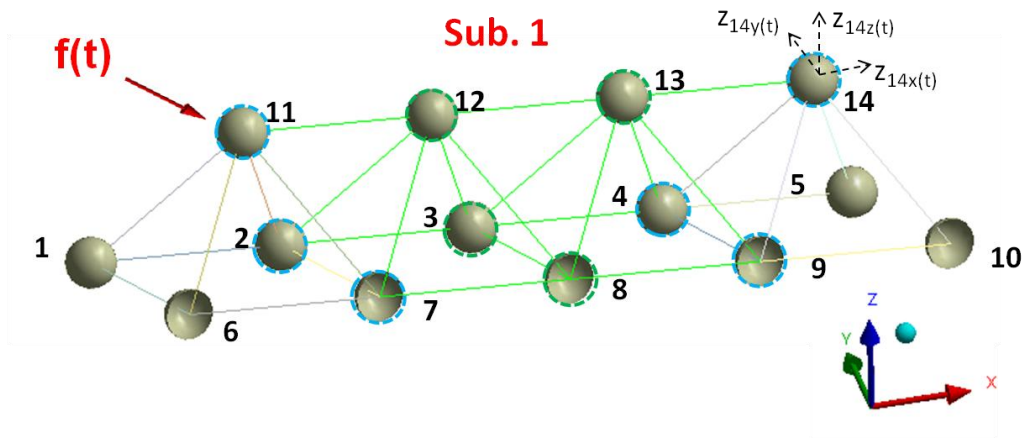


Figura 4.4: Modelo EF de celosía y subestructura aislada

Las ecuaciones que rigen la dinámica del modelo son las siguientes:

$$M \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{z}}_1(t) \\ \dots \\ \ddot{\mathbf{z}}_{11}(t) \\ \dots \\ \ddot{\mathbf{z}}_{14}(t) \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1(t) \\ \dots \\ \mathbf{z}_{11}(t) \\ \dots \\ \mathbf{z}_{14}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ \mathbf{f}_{11}(t) \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

donde  $\mathbf{z}_1(t), \dots, \mathbf{z}_{11}(t), \dots, \mathbf{z}_{14}(t)$  es el desplazamiento en los nodos de la estructura en los ejes  $x, y, z$ . Por otra parte,  $\mathbf{f}_{11}(t)$  es la fuerza externa aplicada en el nodo 11 en los ejes  $x, y, z$ .

Se selecciona la subestructura mostrada en la Figura 4.4 para su aislamiento y monitorización. Dicha subestructura está formada por los nodos internos 3, 8, 12 y 13 y por los nodos de interfaz 2, 4, 7, 9, 11 y 14. La ecuación que rige la dinámica de la subestructura es la siguiente:

$$M' \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{z}}_3(t) \\ \ddot{\mathbf{z}}_8(t) \\ \ddot{\mathbf{z}}_{12}(t) \\ \ddot{\mathbf{z}}_{13}(t) \end{bmatrix} + K' \begin{bmatrix} \mathbf{z}_3(t) \\ \mathbf{z}_8(t) \\ \mathbf{z}_{12}(t) \\ \mathbf{z}_{13}(t) \end{bmatrix} + K'' \begin{bmatrix} \mathbf{z}_2(t) \\ \mathbf{z}_4(t) \\ \mathbf{z}_7(t) \\ \mathbf{z}_9(t) \\ \mathbf{z}_{11}(t) \\ \mathbf{z}_{14}(t) \end{bmatrix} = 0 \quad (4.2)$$

Discretizando según [Olver,2014] y despejando  $\mathbf{z}_3(n)$ ,  $\mathbf{z}_8(n)$ ,  $\mathbf{z}_{12}(n)$ ,  $\mathbf{z}_{13}(n)$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} z_{3x}(n) \\ z_{3y}(n) \\ z_{3z}(n) \\ z_{8x}(n) \\ z_{8y}(n) \\ z_{8z}(n) \\ z_{12x}(n) \\ z_{12y}(n) \\ z_{12z}(n) \\ z_{13x}(n) \\ z_{13y}(n) \\ z_{13z}(n) \end{bmatrix} = A_1 \begin{bmatrix} z_{3x}(n-1) \\ z_{3y}(n-1) \\ z_{3z}(n-1) \\ z_{8x}(n-1) \\ z_{8y}(n-1) \\ z_{8z}(n-1) \\ z_{12x}(n-1) \\ z_{12y}(n-1) \\ z_{12z}(n-1) \\ z_{13x}(n-1) \\ z_{13y}(n-1) \\ z_{13z}(n-1) \end{bmatrix} + A_2 \begin{bmatrix} z_{3x}(n-2) \\ z_{3y}(n-2) \\ z_{3z}(n-2) \\ z_{8x}(n-2) \\ z_{8y}(n-2) \\ z_{8z}(n-2) \\ z_{12x}(n-2) \\ z_{12y}(n-2) \\ z_{12z}(n-2) \\ z_{13x}(n-2) \\ z_{13y}(n-2) \\ z_{13z}(n-2) \end{bmatrix} + B_1 \begin{bmatrix} z_{2x}(n-1) \\ z_{2y}(n-1) \\ z_{2z}(n-1) \\ z_{4x}(n-1) \\ z_{4y}(n-1) \\ z_{4z}(n-1) \\ z_{7x}(n-1) \\ z_{7y}(n-1) \\ z_{7z}(n-1) \\ z_{9x}(n-1) \\ z_{9y}(n-1) \\ z_{9z}(n-1) \\ z_{11x}(n-1) \\ z_{11y}(n-1) \\ z_{11z}(n-1) \\ z_{14x}(n-1) \\ z_{14y}(n-1) \\ z_{14z}(n-1) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

La ecuación (4.3) toma la forma de un modelo VARX con 12 variables endógenas y 18 variables exógenas, siendo todas estas variables desplazamiento correspondiente a los nodos de la subestructura.

Las expresiones mostradas en la ecuación (4.4) definen las matrices  $A_1$ ,  $A_2$  y  $B_1$  del modelo VARX de la ecuación (4.3):

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (T_s^2 M'^{-1}) \left( \frac{2}{T_s^2} M' - K' \right) \\
 A_2 &= (T_s^2 M'^{-1}) \left( \frac{1}{T_s^2} M' \right) \\
 B_1 &= (T_s^2 M'^{-1}) (K'')
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Los elementos de la matriz  $A_1$  dependen de la masa en los nodos internos de la subestructura y de las constantes de rigidez de las barras ubicadas entre los nodos internos, así como del período de muestreo. Los elementos de la matriz  $B_1$  por su parte, dependen de las masas en los nodos internos y de los coeficientes de rigidez de





No todos los elementos de las submatrices mostradas en la Figura 4.5 y Figura 4.6 deben ser analizados en la localización de daño. En este sentido, únicamente se deben analizar los elementos de la diagonal, y dentro de los tres elementos posibles de la diagonal, se debe analizar uno u otro en función de la orientación de la barra. Por ejemplo, para una barra orientada en el eje  $x$ , se deberá analizar únicamente el primer elemento de la diagonal, mientras que para una barra orientada en los ejes  $x, y, z$  se deberán analizar los tres elementos de la diagonal.

La Tabla 4.3 muestra los elementos de las matrices  $A_1$  y  $B_1$  que se analizarán para localizar daño en las 16 barras situadas dentro de la subestructura, considerando que los daños consisten únicamente en pérdidas de rigidez de las barras. Mencionar que las barras son nombradas en función de su ubicación, de modo que  $k_{3-8}$  hace referencia a la barra ubicada entre los nodos internos 3 y 8.

**Tabla 4.3:** Elementos de las matrices  $A_1$  y  $B_1$  analizados (modelo EF de celosía)

Barra	Orientación	Elementos analizados
$k_{3-8}$	$y$	$A_{1;2,5}, A_{1;5,2}$
$k_{3-12}$	$x, y, z$	Diagonal completa en 2 submatrices ( $A_1$ )
$k_{3-13}$	$x, y, z$	Diagonal completa en 2 submatrices ( $A_1$ )
$k_{8-12}$	$x, y, z$	Diagonal completa en 2 submatrices ( $A_1$ )
$k_{8-13}$	$x, y, z$	Diagonal completa en 2 submatrices ( $A_1$ )
$k_{12-13}$	$x$	$A_{1;7,10}, A_{1;10,7}$
$k_{2-3}$	$x$	$B_{1;1,1}$
$k_{2-12}$	$x, y, z$	Diagonal completa en submatriz ( $B_1$ )
$k_{3-4}$	$x$	$B_{1;1,4}$
$k_{4-13}$	$x, y, z$	Diagonal completa en submatriz ( $B_1$ )
$k_{7-8}$	$x$	$B_{1;4,7}$
$k_{7-12}$	$x, y, z$	Diagonal completa en submatriz ( $B_1$ )
$k_{8-9}$	$x$	$B_{1;4,10}$
$k_{9-13}$	$x, y, z$	Diagonal completa en submatriz ( $B_1$ )
$k_{11-12}$	$x$	$B_{1;7,13}$
$k_{13-14}$	$x$	$B_{1;10,16}$

Se calcula primeramente un indicador de daño ID2 para cada barra de la subestructura mediante la ecuación (2.11). Posteriormente, se calcula el error de cuantificación cometido para cada barra siguiendo la ecuación (2.12).

### 4.3.2 Aplicación del método en el modelo de elementos finitos de vigas

El modelo EF de vigas ha sido excitado mediante la aplicación de una fuerza de tipo ruido blanco gaussiano en el nodo 11, y se ha obtenido el desplazamiento en todos los nodos de la estructura con un paso de integración de 0,0002 s. El desplazamiento obtenido ha sido filtrado con una frecuencia de corte de 162 Hz, quedándonos únicamente con la información correspondiente a los dos primeros modos. Para ello se ha utilizado un filtro FIR paso bajo de orden 100. El desplazamiento resultante ha sido utilizado para estimar el modelo VARX descrito en la ecuación (4.3). La estimación de los modelos VARX se ha llevado a cabo mediante el Toolbox Econometrics de MATLAB, siendo el estimador seleccionado el *Multivariate Least Square* (MLS) [Bishop,1977].

Se ha analizado el error de estimación de los modelos VARX de la subestructura en función del número de muestras utilizadas en la estimación de la misma forma que en la sección 2.3.2. La Figura 4.7 muestra que utilizar un número de muestras inferior a 1000 provoca errores de estimación elevados, siendo el error de estimación cometido al utilizar 1000 muestras del 17,11 %. Al utilizar 10000 muestras, dicho error disminuye hasta el 0,89 %, no siendo apenas mejorado al utilizar más muestras. Los modelos VARX han sido estimados utilizando 10000 muestras.

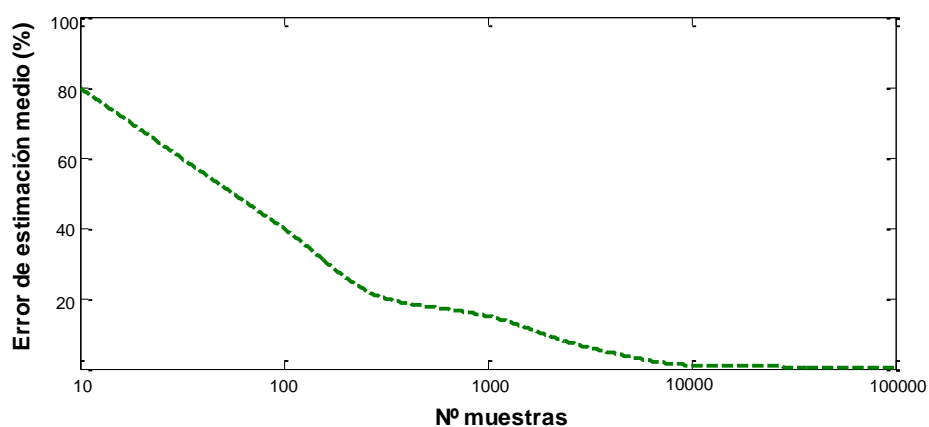


Figura 4.7: Error de estimación medio del modelo VARX en función del número de muestras (modelo EF de vigas)

El método de localización de daño ha sido evaluado en los nueve escenarios mostrados en la Tabla 4.4. En tres de estos escenarios el daño ha sido introducido

fuera de la subestructura, en concreto, en la viga ubicada entre los nodos 9 y 14 ( $k_{9-14}$ ). En los seis escenarios restantes el daño ha sido introducido dentro de la subestructura ( $k_{8-13}$  y  $k_{12-13}$ ). Los daños han consistido en pérdidas de la rigidez del 12,5 %, 25 % y 50 %.

**Tabla 4.4:** Escenarios evaluados en la localización de daño (modelo EF de vigas)

Escenario	Pérdida de rigidez (%)		
	$k_{8-13}$	$k_{12-13}$	$k_{9-14}$
<b>Daño fuera de la subestructura</b>			
1	--	--	12,5
2	--	--	25
3	--	--	50
<b>Daño dentro de la subestructura</b>			
4	12,5	--	--
5	25	--	--
6	50	--	--
7	--	12,5	--
8	--	25	--
9	--	50	--

### 4.3.3 Resultados numéricos

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados de localización obtenidos en el modelo EF de vigas. En los escenarios con daño fuera de la subestructura, daño en  $k_{9-14}$ , se muestra el indicador de daño ID2 más elevado obtenido para las vigas de la subestructura. En los escenarios con daño dentro de la subestructura en cambio, daño en  $k_{8-13}$  y  $k_{12-13}$ , se muestra el indicador de daño ID2 de la viga dañada, así como el indicador de daño ID2 más elevado obtenido para las vigas de la subestructura que no han sido dañadas. Además de esto, se muestra el error de cuantificación cometido al evaluar el estado de la viga dañada en cada uno de los seis escenarios que incorporan daño dentro de la subestructura.

Los resultados muestran que en los escenarios con daño dentro de la subestructura ( $k_{8-13}$  y  $k_{12-13}$ ), el indicador de daño ID2 más elevado corresponde siempre a la viga dañada. Por otra parte, al introducir daño fuera de la subestructura, el indicador de daño ID2 más elevado obtenido es 9,17 %. A pesar de que dicho valor sea mayor que el obtenido en la evaluación numérica del capítulo 2 (sección 2.4.3), en ningún caso es mayor que el de la viga dañada en un escenario con daño dentro de la subestructura. Los resultados presentados en la Tabla 4.5 muestran que el daño ha

sido cuantificado con un error medio del 17,97 % y un error máximo del 38,64 %, siendo el error cometido mayor que en la evaluación numérica del capítulo 2 (sección 2.4.3).

**Tabla 4.5:** Resultados de localización de daño (modelo EF de vigas)

Escenario		Indicador de daño ID2 (%)		Error de cuantificación viga dañada (%)
		Viga dañada	Viga sana (máx.)	
k <sub>9-14</sub> (%)	12,5	--	6,43	--
	25	--	8,45	--
	50	--	9,17	--
k <sub>8-13</sub> (%)	12,5	11,87	10,15	5,05
	25	15,34	13,97	38,64
	50	33,79	18,63	32,42
k <sub>12-13</sub> (%)	12,5	11,15	8,67	10,80
	25	28,53	14,73	14,12
	50	53,41	15,49	6,82

Los resultados muestran que no ha sido posible cuantificar el daño de forma precisa. No obstante, los resultados muestran que el método de localización de daño propuesto permite aislar la subestructura en el modelo EF y localizar daño ubicado dentro de la subestructura, no causando falsos positivos.

#### **4.4 Evaluación experimental del método de localización de daño**

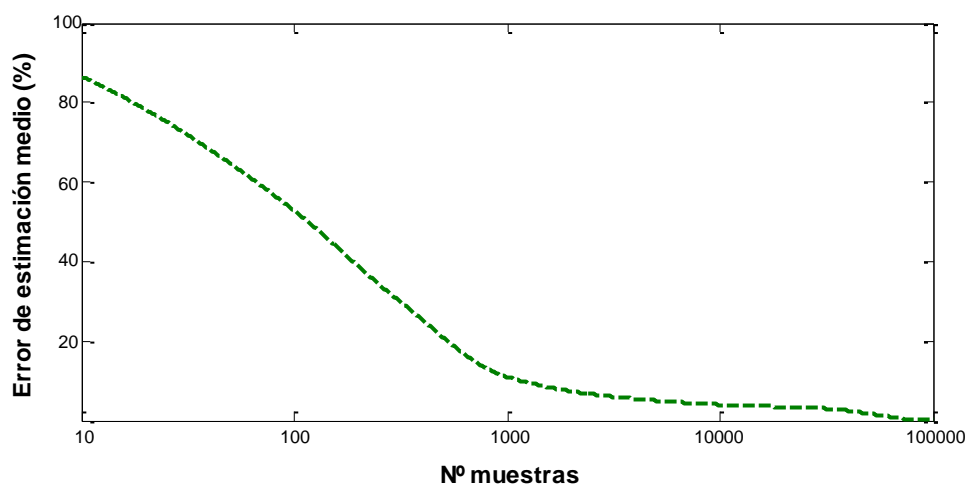
En esta sección se presenta la evaluación experimental del método de localización de daño propuesto utilizando únicamente acelerómetros. Primero se describe la aplicación del método en el banco de ensayos y después se muestran los resultados obtenidos.

##### **4.4.1 Aplicación del método en el banco de ensayos**

La estructura ha sido excitada y la aceleración ha sido adquirida de la misma forma que en el análisis operacional modal. El desplazamiento ha sido obtenido integrando la aceleración. El desplazamiento obtenido ha sido filtrado con una frecuencia de corte de 162 Hz, quedándonos únicamente con la información correspondiente a los dos primeros modos. Para ello se ha utilizado un filtro FIR paso

bajo de orden 100. La estimación de los modelos VARX (ver ecuación (4.3)) se ha llevado a cabo mediante el Toolbox Econometrics de MATLAB, siendo el estimador seleccionado el *Multivariate Least Square* (MLS) [Bishop,1977].

Se ha analizado el error de estimación de los modelos VARX de la subestructura en función del número de muestras utilizadas en la estimación. La Figura 4.8 muestra que para obtener errores de estimación inferiores al 3 % es necesario utilizar 100000 muestras, siendo el error cometido en ese caso del 1,09 %. Los modelos VARX han sido estimados utilizando 100000 muestras.



**Figura 4.8:** Error de estimación medio del modelo VARX en función del número de muestras (banco de ensayos de celosía)

El método de localización de daño ha sido evaluado en los seis escenarios mostrados en la Tabla 4.6. Los daños han sido generados en los mismos tubos que en la evaluación numérica, existiendo dos tipos diferentes de daño. El primer tipo de daño ha consistido en reducir el par de apriete del tubo a dañar hasta 5 N·m. El segundo tipo de daño ha consistido en la eliminación del propio tubo.

**Tabla 4.6:** Escenarios evaluados en la localización de daño (banco de ensayos de celosía)

Escenario	Tipo de daño		
	k <sub>8-13</sub>	k <sub>12-13</sub>	k <sub>9-14</sub>
<b>Daño fuera de la subestructura</b>			
1	--	--	reducir
2	--	--	eliminar
<b>Daño dentro de la subestructura</b>			
3	reducir	--	--
4	eliminar	--	--
5	--	reducir	--
6	--	eliminar	--

#### 4.4.2 Resultados experimentales

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados experimentales obtenidos en la localización de daño. Los resultados muestran que en los escenarios con daño dentro de la subestructura ( $k_{8-13}$  y  $k_{12-13}$ ), el indicador de daño ID2 más elevado corresponde siempre al tubo dañado. En cuanto a los daños introducidos fuera de la subestructura ( $k_{9-14}$ ), los indicadores de daño ID2 calculados poseen un valor elevado, pero en ningún caso son superiores que los indicadores de daño ID2 calculados para tubos dañados en escenarios con daño dentro de la subestructura. En la evaluación experimental no se conoce la magnitud del daño introducido en la estructura, por lo que no es posible determinar el error de cuantificación cometido. Los resultados muestran que el indicador de daño ID2 de los tubos dañados aumenta a medida que lo hace también la gravedad del daño introducido, es decir, al eliminar los tubos en vez de aflojarlos. Sin embargo, la Tabla 4.7 muestra que el valor del indicador de daño ID2 no ofrece información sobre la reducción de rigidez introducida dentro de la subestructura.

**Tabla 4.7:** Resultados de localización de daño (banco de ensayos de celosía)

Escenario		Indicador de daño ID2 (%)	
		Tubo dañado	Tubo sano (máx.)
$k_{9-14}(\%)$	reducir	--	84,78
	eliminar	--	163,79
$k_{8-13}(\%)$	reducir	223,94	139,14
	eliminar	308,23	158,38
$k_{12-13}(\%)$	reducir	1083,19	179,56
	eliminar	1212,04	191,58

Los resultados muestran que el método de localización de daño propuesto permite aislar la subestructura en el modelo EF y localizar daño ubicado dentro de la subestructura, no causando falsos positivos.

## **4.5 Conclusiones**

En este capítulo se ha aplicado el método de localización de daño propuesto en el capítulo 2 en un banco de ensayos de celosía, utilizándose únicamente acelerómetros para la captación de datos. A fin de obtener unos resultados de localización más precisos, el banco de ensayos ha sido diseñado para que trabaje principalmente a tracción y compresión. Para comprobar si los tubos del banco de ensayos trabajan principalmente a tracción y compresión, se han desarrollado dos modelos EF, el primero de barras y el segundo de vigas. Se han comparado los modos experimentales con los modos teóricos de ambos modelos y se concluye que el modelo EF de vigas es capaz de reproducir los cinco modos del banco de ensayos, mientras que el modelo EF de barras únicamente los dos primeros. Por tanto, se concluye que el banco de ensayos trabaja como una estructura de barras principalmente en sus dos modos asociados a frecuencias naturales más bajas. Para continuar con la monitorización de la estructura, el desplazamiento obtenido del banco de ensayos ha sido filtrado, quedándonos únicamente con la información correspondiente a los dos primeros modos. A partir de ahí el método ha sido aplicado en el banco de ensayos de la misma manera que en el capítulo 2. Los resultados numéricos y experimentales muestran que el método de localización de daño propuesto permite aislar la subestructura en el banco de ensayos y localizar daño dentro de ella, no causando falsos positivos.



# 5

## **Conclusiones y líneas futuras**

## 5.1 Conclusiones

En esta tesis se ha desarrollado una metodología de monitorización estructural que permite localizar daño en una estructura, minimizando el número de sensores necesarios para ello.

La metodología propuesta parte del hecho de que en muchos casos hay un conocimiento *a priori* de cuáles son las zonas de la estructura con mayor probabilidad de presentar daño estructural, debido, por ejemplo, a que son las zonas que mayores sollicitaciones sufren.

El enfoque propuesto plantea focalizar la localización de daño en estas zonas de la estructura, aislándolas del resto de la estructura, de forma que se pueda analizar la aparición de daño en estas zonas sin que influya la existencia de daño en otras partes de la misma estructura. Este aislamiento de zonas determinadas de la estructura se consigue por medio de una técnica de *substructuring*. Una vez aislada cada subestructura, su dinámica se representa por medio de un modelo VARX, el cual se vuelve a estimar en cada nueva evaluación y se compara con el modelo inicial. La comparación entre ambos modelos, sano y evaluado, permite determinar si la subestructura ha sufrido algún daño, indicando en ese caso la ubicación del daño dentro de la subestructura. Tanto el aislamiento de la subestructura como la monitorización de la misma se basan en la información proporcionada únicamente por acelerómetros, no siendo necesario medir las fuerzas que se transmiten a la subestructura. Asimismo, no es necesario conocer el modelo del comportamiento dinámico de la estructura para localizar el daño.

El método ha sido evaluado tanto numéricamente como experimentalmente. Inicialmente se ha trabajado sobre una estructura de dinámica unidimensional, para posteriormente aplicarlo a una estructura de celosía. Los resultados muestran que el daño se localiza correctamente, independientemente de la ubicación y gravedad del daño.

Por tanto, este enfoque ha permitido desarrollar un método de localización de daño estructural que no precisa de una sensorización de toda la estructura sino solamente de determinadas subestructuras de la misma. Sin embargo, el método

desarrollado precisa de información proveniente de todos los grados de libertad de la subestructura, lo que supone la colocación de un sensor por cada uno de ellos.

A fin de disminuir el número de sensores necesarios en la localización de daño se ha propuesto un segundo método de localización de daño basado en el análisis de la conectividad de la subestructura. El método de monitorización propuesto localiza daño dentro de la subestructura analizando cambios de conectividad entre los grados de libertad medidos. La conectividad es analizada mediante la causalidad de Granger multivariable condicional.

Este segundo método de localización de daño ha sido evaluado tanto numérica como experimentalmente en una estructura de dinámica unidimensional. Los resultados muestran que el daño se detecta correctamente en la subestructura a pesar de haber reducido el número de sensores instalados en la estructura.

Como conclusión, podemos decir que se ha desarrollado una metodología de monitorización capaz de localizar daño en una estructura, minimizando los sensores necesarios para ello.

## ***5.2 Líneas futuras***

Este trabajo ha contribuido al área de conocimiento de SHM con el desarrollo de un nuevo algoritmo de localización de daño estructural, incidiendo en el aspecto de la reducción en el número de sensores. Al finalizar esta tesis se abren diferentes líneas de mejora, entre las que podemos mencionar:

- El primer método de localización de daño ha sido aplicado a una estructura de celosía, sensorizándola únicamente con acelerómetros. La incorporación de giróscopos permitiría captar, además de los esfuerzos axiales, los esfuerzos de flexión y cortadura, posibilitando así que la subestructura sea monitorizada mediante un conjunto de datos que recoja la dinámica completa de la subestructura. Podemos suponer que con la incorporación de giróscopos aumentaría la precisión de los resultados de localización de daño.

- La geometría y propiedades físicas de la estructura de celosía monitorizada en el cuarto capítulo se parecen más a los de un puente de tipo *Warren* que a los de una subestructura marina tipo *jacket*. En este sentido, resultaría interesante aplicar el primer método de localización de daño propuesto en una estructura más próxima al sector eólico marino, evaluándose a su vez una serie de daños que puedan suceder en este tipo de estructuras.
- El método desarrollado para localizar daño mediante un conjunto reducido de sensores ha sido aplicado solamente en una estructura de dinámica unidimensional. Sería interesante aplicarlo en una estructura más compleja, de celosía, donde las conectividades entre nodos presentaran una mayor complejidad, y se pudieran analizar una mayor gama de casos.

# 6

## **Bibliografía**

- [Abdelrahman,2013]M. Abdelrahman, "Assessment of damage in concrete structures using acoustic emission," 2013.
- [Adams,1978]R. Adams, P. Cawley, C. Pye, and B. Stone, "A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 20, pp. 93-100, 1978.
- [Akhiezer,2013]N. I. i. Akhiezer and I. M. Glazman, *Theory of linear operators in Hilbert space*: Courier Corporation, 2013.
- [Altieri,2000]M. Altieri and C. I. Nicholls, "Teoria y practica para una agricultura sustentable," *Serie Textos Basicos para la Formacion Ambiental*. PNUMA. Red de Formación Ambiental para America Latina y el Caribe. Mexico, vol. 235, 2000.
- [Allemang,1982]R. J. Allemang and D. L. Brown, "A correlation coefficient for modal vector analysis," in *Proceedings of the 1st international modal analysis conference*, 1982, pp. 110-116.
- [Association,2013]E. W. E. Association and others, "EWEA annual report 2012," *EWEA Annual Reports*, 2013.
- [Balageas,2006]D. Balageas, C.-P. Fritzen, and A. Guemes, *Structural health monitoring* vol. 493: Wiley Online Library, 2006.
- [Barnett,2014]L. Barnett and A. K. Seth, "The MVGC multivariate Granger causality toolbox: a new approach to Granger-causal inference," *Journal of neuroscience methods*, vol. 223, pp. 50-68, 2014.
- [Barrachina Fernández,2015]L. Barrachina Fernández, "La crisis del petróleo de los años 70: similitudes y diferencias con el mercado actual," 2015.
- [Bennett,1996]B. Bennett, D. D. Hoffman, C. Prakash, and S. Richman, "Observer theory, Bayes theory, and psychophysics," *Perception as Bayesian inference*, pp. 163-212, 1996.
- [Berger,2013]R. Berger, "Offshore wind toward 2020. On the pathway to cost competitiveness," *Presentation*, Strategy Consultants GmbH, 2013.
- [Bishop,1977]Y. M. Bishop, S. E. Fienberg, P. W. Holland, R. J. Light, and F. Mosteller, "Book Review: *Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice*," *Applied Psychological Measurement*, vol. 1, pp. 297-306, 1977.

- [Boller,2008]C. Boller and N. Meyendorf, "State-of-the-art in Structural Health monitoring for aeronautics," in Proc. of Internat. Symposium on NDT in Aerospace, 2008.
- [Bouزيد,2015]O. M. Bouزيد, G. Y. Tian, K. Cumanan, and D. Moore, "Structural health monitoring of wind turbine blades: acoustic source localization using wireless sensor networks," Journal of Sensors, vol. 2015, 2015.
- [Boyd,2016]T. L. Boyd, J. W. Lund, and others, "Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review," 2016.
- [Casas,2007]J. Casas, Manuel, F. Gea, E. Javaloyes, A. Martin, J. Perez, I. Triguero, et al., "Educacion medioambiental," Alicante: Club Universitario, 2007.
- [Corbetta,2016]G. Corbetta, A. Mbistrova, and A. Ho, "Wind in power, 2015 European statistics," European Wind Energy Association (EWEA), 2016.
- [Cui,2014]L. Cui, Y. Zhao, P. Zhao, J. C. Sun, and Z. Q. Jia, "Review of noncontact ultrasonic nondestructive testing for the solid materials," in Applied Mechanics and Materials, 2014, pp. 346-352.
- [Cheung,2008]A. Cheung, C. Cabrera, P. Sarabandi, K. Nair, A. Kiremidjian, and H. Wenzel, "The application of statistical pattern recognition methods for damage detection to field data," Smart Materials and Structures, vol. 17, p. 065023, 2008.
- [De Angelis,2002]M. De Angelis, H. Lu?, R. Betti, and R. W. Longman, "Extracting physical parameters of mechanical models from identified state-space representations," Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, vol. 69, pp. 617-625, 2002.
- [Deane,2010]J. P. Deane, B. Gallachoir, and E. McKeogh, "Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, pp. 1293-1302, 2010.
- [Deraemaeker,2012]A. Deraemaeker and K. Worden, New trends in vibration based structural health monitoring vol. 520: Springer Science & Business Media, 2012.
- [Diamond,2012]K. E. Diamond, "Extreme weather impacts on offshore wind turbines: lessons learned," Nat. Resources & Env't, vol. 27, p. 37, 2012.
- [Doebbling,1995]S. W. Doebbling, "Measurement of structural flexibility matrices for experiments with incomplete reciprocity," University of Colorado, 1995.

- [Doebling,1998]S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and others, "A summary review of vibration-based damage identification methods," Shock and vibration digest, vol. 30, pp. 91-105, 1998.
- [Doebling,1996]S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review," Los Alamos National Lab., NM (United States)1996.
- [Dyre,1992]K. Dyre, "Vindeby Offshore Wind Farm—The First Experiences," in EWEA Conference Herning, Denmark, 1992.
- [Farrar,1994]C. R. Farrar, W. Baker, T. Bell, K. Cone, T. Darling, T. Duffey, et al., "Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande," Los Alamos National Lab., NM (United States)1994.
- [Fritzen,2008]C. Fritzen, P. Kraemer, and M. Klinkov, "Structural health monitoring of offshore wind energy plants," in Proc., 4th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2008, pp. 3-20.
- [Fritzen,2005]C. P. Fritzen, "Vibration-based structural health monitoring--concepts and applications," in Key Engineering Materials, 2005, pp. 3-20.
- [Fujino,2008]Y. Fujino and D. Siringoringo, "Structural health monitoring of bridges in Japan: an overview of the current trend," in Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2008).--22--24 July.--2008.--Zurich, Switzerland, 2008.
- [Garcia-Martin,2011]J. Garcia-Martin, J. Gomez-Gil, and E. Vazquez-Sanchez, "Non-destructive techniques based on eddy current testing," Sensors, vol. 11, pp. 2525-2565, 2011.
- [Ghoshal,2000]A. Ghoshal, M. J. Sundaesan, M. J. Schulz, and P. F. Pai, "Structural health monitoring techniques for wind turbine blades," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 85, pp. 309-324, 2000.
- [Giurgiutiu,2007]V. Giurgiutiu, Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors: Academic Press, 2007.
- [Gomez,2013]H. C. Gomez, T. Gur, and D. Dolan, "Structural condition assessment of offshore wind turbine monopile foundations using vibration monitoring data," in SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 2013, pp. 86940B-86940B.



- [Granger,1969]C. W. Granger, "Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods," *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 424-438, 1969.
- [Guestrin,2005]C. Guestrin, A. Krause, and A. P. Singh, "Near-optimal sensor placements in gaussian processes," in *Proceedings of the 22nd international conference on Machine learning*, 2005, pp. 265-272.
- [Gunes,2012]B. Gunes and O. Gunes, "Structural health monitoring and damage assessment Part II: Application of the damage locating vector (DLV) method to the ASCE benchmark structure experimental data," *International Journal of Physical Sciences*, vol. 7, pp. 1509-1515, 2012.
- [Haluzan,2011]N. Haluzan, "Offshore wind power--Advantages and disadvantages," *Renewable Energy Articles*, 2011.
- [Heaf,1979]N. Heaf and others, "The effect of marine growth on the performance of fixed offshore platforms in the North Sea," in *Offshore Technology Conference*, 1979.
- [Hemami,2011]A. Hemami, *Wind turbine technology: Cengage Learning*, 2011.
- [Heo,1997]G. Heo, M. Wang, and D. Satpathi, "Optimal transducer placement for health monitoring of long span bridge," *Soil dynamics and earthquake engineering*, vol. 16, pp. 495-502, 1997.
- [Hewicker,2011]C. Hewicker, M. Hogan, and A. Mogren, "Power perspectives 2030: on the road to a decarbonised power sector," URL: [http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/PowerPerspectives2030\\_FullReport.pdf](http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/PowerPerspectives2030_FullReport.pdf), 2011.
- [Ho,2016]A. Ho, A. Mbistrova, and G. Corbetta, "The European offshore wind industry - key trends and statistics 2015," *European Wind Energy Association (EWEA)*, 2016.
- [Hoshiya,1984]M. Hoshiya and E. Saito, "Structural identification by extended Kalman filter," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 110, pp. 1757-1770, 1984.
- [Hou,2012]J. Hou, Jankowski, and J. Ou, "Experimental study of the substructure isolation method for local health monitoring," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 19, pp. 491-510, 2012.
- [Hytti,2010]H. Hytti, "Energy Efficient Measurement and Signal Processing for Self-powered, Lamb-wave-based Structural Health Monitoring System," *Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu-Tampere University of Technology. Publication*; 916, 2010.

- [Imamovic,1998]N. Imamovic, "Model validation of large finite element model using test data," Imperial College, London, UK, 1998.
- [Inaudi,2011]D. Inaudi and R. Walder, "Integrated structural health monitoring systems for high-rise buildings," in Proceedings of the 1st Middle East conference on smart monitoring, assessment and rehabilitation of civil structures (SMAR'11), 2011, pp. 1-8.
- [Inaudia,2009]D. Inaudia and R. Waldera, "Integrated Structural Health Monitoring Systems for Buildings," 2009.
- [Jankowski,2013]L. Jankowski, Dynamic load identification for structural health monitoring, 2013.
- [Jankowski,2013]L. Jankowski, ukasz and I. P. P. o. Techniki, w, Dynamic load identification for structural health monitoring: Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences, 2013.
- [Joy,2014]R. Joy, A. R. M. Rao, and P. E. Sakaria, "STRUCTURAL DAMAGE DIAGNOSTIC TECHNIQUES USING TIME SERIES," 2014.
- [Juang,1993]J.-N. Juang, M. Phan, L. G. Horta, and R. W. Longman, "Identification of observer/Kalman filter Markov parameters. Theory and experiments," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 16, pp. 320-329, 1993.
- [Kaldellis,2011]J. K. Kaldellis and D. Zafirakis, "The wind energy (r) evolution: A short review of a long history," Renewable Energy, vol. 36, pp. 1887-1901, 2011.
- [Kammer,1996]D. C. Kammer, "Optimal sensor placement for modal identification using system-realization methods," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 19, pp. 729-731, 1996.
- [Kang,2006]I. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, V. Shanov, and D. Shi, "A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring," Smart materials and structures, vol. 15, p. 737, 2006.
- [Koh,2007]B. Koh and S. Dyke, "Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data," Computers \& structures, vol. 85, pp. 117-130, 2007.
- [Koh,2003]C. G. Koh, B. Hong, and C. Y. Liaw, "Substructural and progressive structural identification methods," Engineering Structures, vol. 25, pp. 1551-1563, 2003.

- [Koh,1991]C. G. Koh, L. M. See, and T. Balendra, "Estimation of structural parameters in time domain: a substructure approach," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 20, pp. 787-801, 1991.
- [Krautkramer,2013]J. Krautkramer and H. Krautkramer, *Ultrasonic testing of materials: Springer Science & Business Media*, 2013.
- [Kumar,2015]A. Kumar, N. Kumar, P. Baredar, and A. Shukla, "A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 530-539, 2015.
- [Lambrighs,2009]K. Lambrighs and M. Wevers, "Applications of acoustic emission for SHM: A review," 2009.
- [Law,1998]S. Law, Z. Shi, and L. Zhang, "Structural damage detection from incomplete and noisy modal test data," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, pp. 1280-1288, 1998.
- [Li,2010]Y. Li, "Hypersensitivity of strain-based indicators for structural damage identification: A review," *Mechanical systems and signal processing*, vol. 24, pp. 653-664, 2010.
- [Lieven,1988]N. Lieven and D. Ewins, "Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC)," in *Proceedings of the sixth international modal analysis conference*, 1988, pp. 690-695.
- [Lin,2012]T. Lin, S. Hung, and C. Huang, "Detection of damage location using a novel substructure-based frequency response function approach with a wireless sensing system," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 12, p. 1250029, 2012.
- [Lingvall,2000]F. Lingvall and T. Stepinski, "Automatic detecting and classifying defects during eddy current inspection of riveted lap-joints," *NDT & E International*, vol. 33, pp. 47-55, 2000.
- [Lins,2014]C. Lins, "Renewables 2014 global status report," 2014.
- [Lizarza,1998]J. T. C. Lizarza, *Curso de analisis estructural: Ediciones Universidad de Navarra. EUNSA*, 1998.
- [López-Díez,2005]J. López-Díez, M. Torrealba, A. Güernes, and C. Cuerno, *Application of statistical energy analysis for damage detection in spacecraft structures* vol. 293-294, 2005.

- [Lu,2009]B. Lu, Y. Li, X. Wu, and Z. Yang, "A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis," in Power Electronics and Machines in Wind Applications, 2009. PEMWA 2009. IEEE, 2009, pp. 1-7.
- [Lutkepohl,2005]H. Lutkepohl, "New introduction to multiple time series analysis," 2005.
- [Lyon,1975]R. H. Lyon and R. Lyon, Statistical energy analysis of dynamical systems: theory and applications: MIT press Cambridge, 1975.
- [Madenci,2015]E. Madenci and I. Guven, The finite element method and applications in engineering using ANSYS}: Springer, 2015.
- [Maples,2013]B. Maples, G. Saur, M. Hand, R. van de Pietermen, and T. Obdam, "Installation, operation, and maintenance strategies to reduce the cost of offshore wind energy," NREL, Denver, 2013.
- [Mares,1996]C. Mares and C. Surace, "An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures," Journal of Sound and Vibration, vol. 195, pp. 195-215, 1996.
- [Marinescu,2011]D. C. Marinescu, Classical and quantum information: Academic Press, 2011.
- [Martínez,2015]A. Martínez, "Offshore Wind Moving towards competitiveness Iberdrola Experience," Bilbao marine energy week, 2015.
- [Mazzanti,2015]P. Mazzanti, D. Perissin, and A. Rocca, "Structural Health Monitoring of Dams by Advanced Satellite SAR Interferometry: Investigation of Past Processes and Future Monitoring Perspectives," 2015.
- [Meo,2005]M. Meo and G. Zumpano, "On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure," Engineering structures, vol. 27, pp. 1488-1497, 2005.
- [Mirahmadi,2011]S. J. Mirahmadi and F. Honarvar, "Application of signal processing techniques to ultrasonic testing of plates by S 0 Lamb wave mode," NDT \& E International, vol. 44, pp. 131-137, 2011.
- [Mosedale,2006]T. J. Mosedale, D. B. Stephenson, M. Collins, and T. C. Mills, "Granger causality of coupled climate processes: Ocean feedback on the North Atlantic Oscillation," Journal of climate, vol. 19, pp. 1182-1194, 2006.
- [Mujica,2010]L. Mujica, J. Rodellar, A. Fernandez, and A. Guemes, "Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures," Structural Health Monitoring, p. 1475921710388972, 2010.

- [Nair,2006]K. K. Nair, A. S. Kiremidjian, and K. H. Law, "Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 291, pp. 349-368, 2006.
- [Ni,2012]Y. Ni and K. Wong, "Integrating bridge structural health monitoring and condition-based maintenance management," *Proceedings of the CSHM-4*. Berlin, 2012.
- [Nichols,2006]J. Nichols, M. Seaver, and S. Trickey, "A method for detecting damage-induced nonlinearities in structures using information theory," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 297, pp. 1-16, 2006.
- [Okabe,2000]Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka, and N. Takeda, "Detection of transverse cracks in CFRP composites using embedded fiber Bragg grating sensors," *Smart Materials and Structures*, vol. 9, p. 832, 2000.
- [Olver,2014]P. J. Olver, *Introduction to partial differential equations*: Springer, 2014.
- [Pandey,1991]A. Pandey, M. Biswas, and M. Samman, "Damage detection from changes in curvature mode shapes," *Journal of sound and vibration*, vol. 145, pp. 321-332, 1991.
- [Park,2010]G. Park, S. G. Taylor, M. Kevin, and C. R. Farrar, "SHM of wind turbine blades using piezoelectric active-sensors," in *Fifth European workshop on structural health monitoring*, 2010, pp. 321-326.
- [Peeringa,2014]J. M. Peeringa, "Fatigue loading on a 5MW offshore wind turbine due to the combined action of waves and current," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, p. 012093.
- [Poole,2003]G. Poole, Y.-C. Liu, and J. Mandel, "Advancing analysis capabilities in ANSYS through solver technology," *Electronic Transactions on Numerical Analysis*, vol. 15, pp. 106-121, 2003.
- [Reynders,2012]E. Reynders, "System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 19, pp. 51-124, 2012.
- [Rosiek,2012]M. Rosiek, A. Martowicz, and T. Uhl, "Electromechanical impedance based SHM system for aviation applications," in *Key Engineering Materials*, 2012, pp. 127-136.
- [Rytter,1993]A. Rytter, "Vibration based inspection of Civil Engineering Structures PhD Thesis Aalborg University Denmark," 1993.

- [Sahoo,2016]S. K. Sahoo, "Renewable and sustainable energy reviews solar photovoltaic energy progress in India: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 927-939, 2016.
- [Sakaris,2015]C. S. Sakaris, J. S. Sakellariou, and S. D. Fassois, "A Generalized Functional Model Based Method for Vibration-Based Damage Precise Localization in 3D Structures," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, p. 012008.
- [Salawu,1997]O. Salawu, "Detection of structural damage through changes in frequency: a review," *Engineering structures*, vol. 19, pp. 718-723, 1997.
- [Scott,1982]I. Scott and C. Scala, "A review of non-destructive testing of composite materials," *NDT international*, vol. 15, pp. 75-86, 1982.
- [Seth,2015]A. K. Seth, A. B. Barrett, and L. Barnett, "Granger causality analysis in neuroscience and neuroimaging," *The Journal of Neuroscience*, vol. 35, pp. 3293-3297, 2015.
- [Sikorska,2011]J. Sikorska, M. Hodkiewicz, and L. Ma, "Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 1803-1836, 2011.
- [Spyrakos,1994]C. C. Spyrakos, *Finite Element Modeling*: West Virginia Univ. Press, 1994.
- [Stubbs,1992]N. Stubbs, J. Kim, and K. Topole, "An efficient and robust algorithm for damage localization in offshore platforms," in *ASCE 10th structures congress*, 1992, pp. 543-546.
- [Sundaresan,1999]M. J. Sundaresan, M. J. Schulz, J. Hill, E. Wheeler, F. Ferguson, and P. F. Pai, "Damage detection on a wind turbine blade section," in *Society for Experimental Mechanics, Inc, 17 th International Modal Analysis Conference.*, 1999, pp. 1359-1365.
- [Tarantola,2005]A. Tarantola, *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation: siam*, 2005.
- [Tee,2005]K. F. Tee, C. G. Koh, and S. T. Quek, "Substructural first- and second-order model identification for structural damage assessment," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 34, pp. 1755-1775, 2005.
- [Tipireddy,2009]R. Tipireddy, H. Nasrellah, and C. Manohar, "A Kalman filter based strategy for linear structural system identification based on multiple static and dynamic test data," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 24, pp. 60-74, 2009.

- [Udwadia,1994]F. E. Udwadia, "Methodology for optimum sensor locations for parameter identification in dynamic systems," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 120, pp. 368-390, 1994.
- [Van Der Tempel,2006]J. Van Der Tempel, *Design of support structures for offshore wind turbines*: TU Delft, Delft University of Technology, 2006.
- [Van Gemert,2015]R. Van Gemert, "The Next Generation Contracting One Wind Force," *Bilbao marine energy week*, 2015.
- [Van Hemelrijck,1996]D. Van Hemelrijck and A. Anastassopoulos, *NON DESTRUCTIVE TESTING*: CRC Press, 1996.
- [Varghese,2011]C. K. Varghese and K. Shankar, "Identification of structural parameters using combined power flow and acceleration approach in a substructure," *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 1, pp. 65-79, 2011.
- [Veljkovic,2010]M. Veljkovic, "Wind turbine tower design, erection and maintenance," *Wind Energy Systems: Optimising Design and Construction for Safe and Reliable Operation*, p. 274, 2010.
- [Verheij,1980]J. Verheij, "Cross spectral density methods for measuring structure borne power flow on beams and pipes," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 70, pp. 133-138, 1980.
- [Waele,2003]W. D. Waele, J. Degrieck, W. Moerman, L. Taerwe, and P. D. Baets, "Feasibility of integrated optical fibre sensors for condition monitoring of composite structures Part 1: Comparison of Bragg-sensors and strain gauges," *INSIGHT--Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 45, pp. 266-271, 2003.
- [Wan,2013]C. Wan, W. Hong, J. Liu, Z. Wu, Z. Xu, and S. Li, "Bridge assessment and health monitoring with distributed long-gauge FBG sensors," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, 2013.
- [Worden,2004]K. Worden and J. Dulieu-Barton, "An overview of intelligent fault detection in systems and structures," *Structural Health Monitoring*, vol. 3, pp. 85-98, 2004.
- [Wouwer,2000]A. V. Wouwer, N. Point, S. Porteman, and M. Remy, "An approach to the selection of optimal sensor locations in distributed parameter systems," *Journal of process control*, vol. 10, pp. 291-300, 2000.

- [Xing,2012]Z. Xing and A. Mita, "A substructure approach to local damage detection of shear structure," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 19, pp. 309-318, 2012.
- [Yang,2006]J. N. Yang, S. Lin, H. Huang, and L. Zhou, "An adaptive extended Kalman filter for structural damage identification," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 13, pp. 849-867, 2006.
- [Yang,2010]W. Yang, P. J. Tavner, C. J. Crabtree, and M. Wilkinson, "Cost-effective condition monitoring for wind turbines," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 263-271, 2010.
- [Yao,2012]R. Yao and S. N. Pakzad, "Autoregressive statistical pattern recognition algorithms for damage detection in civil structures," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 31, pp. 355-368, 2012.
- [Yun,1997]C. Yun and H. Lee, "Substructural identification for damage estimation of structures," *Structural Safety*, vol. 19, pp. 121-140, 1997.
- [Yusa,2007]N. Yusa, S. Perrin, K. Mizuno, Z. Chen, and K. Miya, "Eddy current inspection of closed fatigue and stress corrosion cracks," *Measurement Science and Technology*, vol. 18, p. 3403, 2007.
- [Zhang,2012]D. Zhang and E. A. Johnson, "Substructure identification for shear structures: Cross-power spectral density method," *Smart Materials and Structures*, vol. 21, 2012.
- [Zhao,2008]L. B. Zhao, J. Y. Zhang, and Y. X. Zhao, "Taylor Series Numerical Method in Structural Dynamics," in *Advanced Materials Research*, 2008, pp. 1213-1220.
- [Zhao,2007]X. Zhao, T. Qian, G. Mei, C. Kwan, R. Zane, C. Walsh, et al., "Active health monitoring of an aircraft wing with an embedded piezoelectric sensor/actuator network: II. Wireless approaches," *Smart Materials and Structures*, vol. 16, p. 1218, 2007.
- [Zimmerman,1994]C. B. L. D. C. Zimmerman and E. L. Marek, "A comparison of modal test planning techniques: excitation and sensor placement using the NASA 8-bay truss," in *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference: January 31-February 3 1994, Ilikai Hotel, Honolulu, Hawaii, 1994*, p. 205.
- [Zugasti,2014]E. Zugasti, "Design and validation of a methodology for wind energy structures health monitoring," 2014.
- [Zugasti,2012]E. Zugasti, J. Anduaga, M. A. Arregui, and F. Martinez, "NullSpace Damage Detection Method with Different Environmental and Operational



Conditions," in Proceedings of the 6th European Workshop of shm, 2012, pp. 1368-1375.

