

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS Y DE
INGENIERÍA DE MINAS**



ANÁLISIS DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS MEDIANTE ENTROPÍA ESPECTRAL

**PROYECTO FIN DE CARRERA
2014**

**Alumno: Francisco David Morales Fernández
Tutor: Enrique Castro Rodríguez**

Índice

1	Introducción	4
1.1.	Objetivo	4
2	Importancia de la detección temprana del daño	5
3	Monitorización del daño estructural	7
3.1.	Ventajas	10
4	Formas de detección de daños en estructuras	11
4.1.	Ultrasonidos	12
4.2.	Corriente inducida	12
4.3.	Líquidos penetrantes	13
4.4.	Inspección por partículas magnéticas	14
4.5.	Radiografía	14
4.6.	Termografía	14
5	Método vibraciones	15
5.1.	Análisis de señales temporales	16
5.2.	Ventajas	16
5.3.	Desventajas	17
5.4.	Análisis modal	18
6	Entropía Espectral (SE)	20
7	Explicación del experimento	23
8	Planteamiento problema	25
9	Resultados	29
9.1.	Amplitud de las frecuencias	30
9.2.	Resultados desfavorables	31
9.3.	Resultados favorables	34
10	Conclusiones	38
11	Bibliografía	39

Capítulo 1

Introducción

La detección de daños en estructuras es uno de los aspectos que han sido utilizados desde siempre en todas las ramas de la ingeniería para evitar derrumbamientos, malos funcionamientos o deficientes que puedan acarrear gastos económicos imprevistos y elevados. Para evitar todo esto es necesaria la inspección visual de operarios especializados y de técnicas de detección de daños.

Actualmente y desde hace unos años se está estudiando la manera de controlar en tiempo real el estado de la estructura (conocida como monitorización de salud estructural o SHM por sus siglas en inglés) y así poder actuar de la forma más rápida posible en el momento en el que se detecte que se está empezando a producir un fallo en la estructura o un cambio en sus propiedades que pueda derivar en daño en un futuro. La monitorización de salud estructural es un proceso en el que se usan técnicas de ensayos no destructivos que permiten la monitorización continua, como pueden ser los ya conocidos métodos basados en ultrasonidos, líquidos penetrantes o vibraciones en estructuras.

1.1 Objetivo

En este proyecto se quiere estudiar el comportamiento de la entropía espectral como forma de monitorizar la estructura para poder descubrir posibles daños y llegar a tiempo para tratarlos. Para poder llegar a ese punto es necesario encontrar un patrón de comportamiento en la entropía espectral que nos indique cuando se está produciendo daño o cuando puede producirse. El objetivo de esto es que cuando se identifique una cierta entropía espectral, similar a la estudiada en el experimento, seamos conscientes de que puede estar en serio riesgo la integridad de la estructura, lo cual permitirá a los técnicos responsables del mantenimiento de la misma actuar de la forma más adecuada para resolver y prevenir el problema antes de que este llegue a ocurrir.

Capítulo 2

Importancia de la detección temprana del daño

Tras un terremoto, fuertes tormentas, accidentes o simplemente el paso del tiempo los edificios, los puentes y las estructuras en general, pueden quedar seriamente dañadas, lo que podría provocar el derrumbamiento de las mismas con la posibilidad de que se produzcan víctimas, además de la destrucción de las obras de ingeniería y la pérdida económica. Por todo ello, se hace obligada la inspección de todas las estructuras cuando ocurre un sismo para así poder evitar daños mayores en las réplicas y los posibles futuros sismos. Al diagnosticar las construcciones se permiten las inspecciones y reparaciones en las zonas dañadas.

Para detectar los daños se utilizan gran variedad de métodos, incluyendo técnicas locales o globales, como la minuciosa inspección visual por parte de los técnicos especializados, o los famosos ensayos no destructivos, como pueden ser técnicas mediante ultrasonidos, corriente inducida, técnicas con líquidos penetrantes, métodos de vibraciones, etc.

Durante los últimos años ha cobrado mucha importancia lo que se conoce como la monitorización de la salud de una estructura, una nueva rama dentro de métodos no destructivos; permitiendo saber en todo momento el estado de la estructura, gracias a que se están midiendo, registrando y analizando en tiempo real varias propiedades intrínsecas a la vida de la estructura, gracias a lo cual se deduce si se está produciendo fallo o puede producirse en un medio o corto plazo.

Sin que haya lugar a dudas la posibilidad de detectar daños en estructuras y materiales es un tema de tremendo interés en la actualidad ya que ello permite disminuir de forma importante los costes de mantenimiento de la obra, y principalmente los riesgos que pudieran sufrir los usuarios o las personas encargadas del funcionamiento y mantenimiento de la estructura.

El hecho de poder conocer si algo no está yendo como debería permite a los encargados del mantenimiento de la estructura poder actuar de forma inmediata y reparar lo que esté fallando o llevar a cabo las medidas correctoras para solucionar los problemas lo antes posible con el ahorro económico que ello conlleva y por supuesto mantener la seguridad de la vida de las personas de las que depende la estructura.

Capítulo 3

Monitorización del daño estructural

La monitorización de daño estructural (Structural Health Monitoring, SHM a partir de ahora, por sus siglas en inglés) es un proceso que busca analizar los datos recibidos de la estructura a partir de unos sensores colocados en la misma. Estos sensores son indicadores que permiten detectar cualquier tipo de anomalía para identificar daños, movimiento o degradación en la estructura que está siendo analizada. Este sistema es conocido como red sensorial no destructiva.

Los datos obtenidos pueden ser llevados a cabo de forma periódica o en tiempo real y estar asociados a cambios de tipo corrosivo, deterioro, fatiga, reacciones químicas, humedad, ambientales, etc. y también a cambios físicos como cargas, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, agrietamientos, aceleraciones, vibraciones, dislocaciones o cualquier propiedad que se pueda analizar para evaluar correctamente el estado de la estructura.

Estos datos obtenidos tienen que ser contrastados y comparados con los datos saludables que debe tener la estructura en perfecto estado para comparar las diferencias y ver si los datos recogidos indican peligrosidad para la integridad de la estructura.

El SHM se está empleando en varios campos de la ingeniería como la civil, aeronáutica, mecánica, electrónica o eléctrica. En la ingeniería civil es usado en puentes, edificios altos, estadios, túneles o cualquier estructura de alta responsabilidad. También podemos destacar que se está aplicando a edificios antiguos para controlar y arreglar los daños producidos por el paso del tiempo.

Los datos de la monitorización estructural se pueden utilizar para alcanzar diferentes niveles de evaluación de daños de acuerdo a la clasificación de A. Rytter [1] dependiendo de las necesidades y los recursos de la infraestructura.

Nivel I: Detección de la presencia de daño

Nivel II: Determinación de la ubicación de los daños.

Nivel III: Cuantificación de la gravedad de los daños

Nivel IV: Predicción de la vida útil restante de sus componentes estructurales

Etapas de Monotorización de Salud Estructura [2]:

· Razones y variables para la evaluación operacional

Para decidir si la estructura debe ser monitorizada se tienen en cuenta el tipo y la importancia de la misma, así como criterios económicos, estratégicos o de seguridad y las fuerzas a las que está sometida.

Todos estos criterios se seleccionan para conocer los posibles daños que pueda sufrir la estructura.

Otro factor a tener en cuenta es la posibilidad y limitaciones para medir y monitorear todas las variables, incluyendo las disponibilidades tecnológicas y las necesidades de frecuencia de medición de los datos.

· Adquisición y gestión de datos

En este punto se determinan los métodos de estímulo, los sensores más apropiados para cada estructura y factor a analizar así como su distribución y el número de sensores. Hay que tener siempre en cuenta la necesidad de normalizar los datos, es decir, conocer las condiciones externas (ambientales por ejemplo) que pueden alterar los datos y no serían directamente comparables. También existen ruidos evitables y estadísticamente cuantificables de los no predecibles.

Se necesita ocasionalmente una limpieza de datos y filtros que permitan determinar los datos transmitidos y formas para comprobar sensores que no estén operando correctamente.

· Identificación de antes y después del daño

Debemos tener total certeza si el dato transmitido se corresponde a la estructura en estado sano o dañado.

Dependiendo del tipo de análisis que nos convenga podemos verificar las variables de amplitud, frecuencia, temperatura o fractura por ejemplo.

En el caso de datos de periodos largos es recomendable considerar la compresión de los datos.

En esta fase se considerará la calidad de los datos y se utilizarán pruebas de significancia estadística.

·Cuantificación del daño

La monitorización debe dar lugar a una información cuantificada de la magnitud del daño. Esto se debe a uno o más algoritmos que incluso pueden estar asociados a sistemas de aprendizaje para conocer mejor si la estructura está dañada o no.

·Predicción

El objetivo de monitorización de salud estructural es el de prevenir si la estructura será dañada para, así, poder tomar las medidas correctivas necesarias. Por ese motivo la información histórica que registra tiene que servir para establecer parámetros que faciliten un sistema de aviso o alerta.

·Acción

Si la monitorización funciona correctamente el mantenimiento podrá ser realizado solo cuando es necesario, así pues, el sistema recoge y transmite información y se envía para analizarla, conservarla y poder reaccionar de la forma más adecuada y rápida.

3.1 Ventajas

La principal ventaja de las técnicas de monitorización de salud estructural para la detección del daños es que permiten un análisis veloz y en tiempo real de la salud de una estructura tras un evento extremo como por ejemplo vientos fuertes, terremotos, explosiones o simplemente el paso del tiempo. Esto permite poner en conocimiento rápidamente los posibles fallos que pudieran presentarse en la estructura e informar de forma concisa qué está ocurriendo para poder solucionarlo.

Además, gracias a la SHM es posible mejorar la credibilidad de las inspecciones y de las evaluaciones posteriores a través de datos más objetivos. Estos datos ayudarán a elaborar y desarrollar herramientas más eficaces para mejorar la toma de decisiones que apoyen y completen la inspección visual por parte de los técnicos, los cuales podrán formular mejores estrategias para lidiar con el deterioro de la infraestructura y poder elaborar un presupuesto más reducido y aplicar los recursos a su alcance de la manera más eficiente posible.

Reducir el tiempo que la estructura está inoperativa durante las reparaciones o las etapas de inspección es otra de las ventajas de la monitorización de la estructura, lo que también conlleva a reducir las pérdidas causadas al tiempo que la estructura no esté en fase productiva.

Todo lo expuesto en este punto tiene como finalidad adelantarse al fallo de la estructura para aumentar la fiabilidad y la vida útil de la misma.

Capítulo 4

Formas de detección de daños en estructuras

Para detectar daño en un objeto o una estructura utilizamos ciertas pruebas, conocidas como ensayos no destructivos [5], en las que se verifica la calidad y el estado de la estructura analizada sin dañarla ni dejar de ser operativa durante el procedimiento del ensayo o a la finalización de este.

Aplicando estos ensayos obtenemos los resultados necesarios para establecer un diagnóstico del estado de la calidad de la estructura inspeccionada. Estos resultados nos ofrecen unos resultados que hay que interpretar dependiendo de cada método utilizado y en relación con los principios físicos en los que están basados, el material con el que está fabricado y los procesos de fabricación.

Los ensayos no destructivos se utilizan para medir, caracterizar y dar a conocer las discontinuidades y defectos en los materiales ya que estos son capaces de medir de forma indirecta lo que no puede ser medido de otra forma. Gracias a estos métodos es posible caracterizar el estado y la naturaleza de los materiales de la estructura detectando variaciones de las propiedades físicas intrínsecas del material. Además se manifiestan las heterogeneidades, forma, tamaño, situación y naturaleza y con relación a unos criterios de aceptación recogidos en una especificación técnica establecidos por los ingenieros del proyecto, determinan la bondad de la propiedad que está siendo medida en el ensayo.

A continuación vamos a definir y explicar algunos de los ensayos no destructivos más utilizados a la hora de buscar daños en estructuras o componentes de las mismas como por ejemplo pueden ser los métodos por ultrasonidos, métodos mediante corriente inducida, líquidos penetrantes, Inspección por partículas magnéticas, radiografía o a través de la termografía.

4.1 Ultrasonidos

El método de ultrasonidos consiste en propagar ondas de sonido a través de la pieza a analizar y su medición final para analizar y estudiar los resultados. Este método de ensayo no destructivo es perfecto para todo tipo de materiales y es de habitual uso en ensayos no destructivos como el control de calidad del producto y el mantenimiento preventivo.

Los ultrasonidos son utilizados en todos los campos de la ingeniería, especialmente en el campo de la aeronáutica debido a su precisión para hallar fisuras pequeñas en, por ejemplo, motores o trenes de aterrizaje.

4.2 Corriente inducida

Este tipo de ensayo no destructivo se basa en el principio de la inducción electromagnética, en el que un campo magnético alternante induce corriente sobre la pieza de ensayo, siempre y cuando esta pieza esté constituida por un material conductor. La corriente inducida como ensayo no destructivo permite la detección de fallos e imperfecciones superficiales y sub-superficiales ya que es una prueba principalmente superficial.

El campo magnético y el patrón de corrientes inducidas asociado a estas, están influenciados por las características del material y se agrupan en tres grupos:

- Detección de continuidades: esto es la localización de fisuras, erosiones, corrosiones o cualquier daño en la superficie del material.
- Propiedades de materiales: Usando las corrientes inducidas es posible determinar las propiedades de los materiales como la conductividad, la permeabilidad, la dureza y muchas otras propiedades metalográficas.
- Espesores: Una de las grandes ventajas de las corrientes inducidas es la medición de espesores. Siendo muy eficaces y precisas en pequeños espesores y no tanto en espesores de mayores dimensiones. Son comúnmente utilizadas para medir pinturas de revestimientos o materiales aislantes.

4.3 Líquidos penetrantes

El principio de capilaridad de los líquidos es la base científica de este método de ensayo no destructivo. Gracias a este principio, los líquidos penetran y son retenidos en estrechas fisuras, lo que ayuda a detectar defectos en la superficie de una pieza o estructura. Se emplea para evidenciar discontinuidades superficiales en casi todos los materiales no porosos ya sean metales, vidrios, cerámica, plástico, etc.

Algunas de las ventajas de este método es que puede actuar prácticamente en cualquier sitio, independientemente de la geometría de la pieza o la ubicación. Además, no depende de fuentes de energía, el equipamiento necesario es mínimo y tiene una alta sensibilidad que permite una amplia detección de fallas.

Este método ha sido usado desde siempre para detectar fisuras mediante penetración de aceite y blanqueamiento de este mediante cal, sobre todo en el sector ferroviario con el objetivo de hallar fallas en los componentes de las locomotoras. Actualmente se utiliza en todo tipo de industrias como la civil o la aeronáutica por ejemplo.

El procedimiento de este ensayo se puede resumir en los siguientes pasos:

- Limpieza inicial: eliminación de cualquier sustancia o resto contaminante de la zona a inspeccionar para que no dificulte la entrada del líquido ni la posterior eliminación de este.

- Aplicación del líquido penetrante: cubrir la superficie de estudio con el líquido penetrante y esperar el tiempo necesario para que el líquido rellene todas las fisuras o poros del material.

- Eliminación del exceso: al limpiar la zona retirando el exceso del líquido penetrante se evitan las posibles indicaciones falsas.

- Aplicación del revelador: un producto revelador en forma seca o pulverizado y suspendido en una suspensión acuosa fácilmente evaporable es aplicado, dejando una fina capa de polvo cubriendo la superficie de estudio.

- Inspección: la capa de revelador resultante absorbe el líquido que ha quedado retenido en las discontinuidades del material, llevándolo a la superficie para poder evaluar e interpretar los resultados.

- Limpieza final: consiste en la eliminación de los agentes químicos utilizados en los pasos anteriores para evitar así posibles malformaciones o cualquier daño en la pieza cuando esta vaya ser utilizada.

4.4 Inspección por partículas magnéticas

Este tipo de ensayo no destructivo permite encontrar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. El principio físico de este método consiste en que cuando se induce un campo magnético en un material ferromagnético, si el material presenta discontinuidades perpendiculares a las líneas de campo magnetizables, se forman distorsiones en dicho campo. Para detectar estas distorsiones se aplican partículas magnetizables en forma de polvo en la superficie del material que se quiere examinar. Dichas partículas se acumulan y se puede observar dónde se encuentran las imperfecciones, bien directamente de forma visual o empleando luz ultravioleta.

Este método es utilizado cuando se necesita una inspección rápida. Existen distintas variantes de este método de la que cada una se utiliza para diferentes aplicaciones y distintas intensidades. Los materiales ferromagnéticos en los que se suele utilizar este método son el hierro, el cobalto y el níquel.

4.5 Radiografía

La radiografía se puede utilizar en una gran variedad de ensayos como objetos de fundición, forjados y soldaduras. Principalmente es aplicado para la detección de fisuras en las estructuras. Los objetos que se quieren ensayar son expuestos a rayos X o rayos gamma y se procesa para visualizarlos en film o digitalmente. El resultado es minuciosamente analizado por los técnicos especializados para hallar posibles grietas en el material.

Este ensayo se puede usar con la mayoría de los materiales y además puede proporcionar un registro visual permanente del objeto ensayado. Gracias a este método se pueden observar errores de fabricación para poder llevar a cabo las acciones correctoras pertinentes.

El principal objetivo de este método de ensayo no destructivo es el permitir al técnico observar la calidad interna del objeto ensayado y revelar la naturaleza del mismo sin dañar ni modificar su estructura.

5.6 Termografía

El análisis termográfico consiste en obtener gráficamente la temperatura superficial de cualquier objeto o estructura, donde podemos observar los puntos más fríos o calientes de la pieza analizada. Estas medidas se captan mediante cámaras termográficas, a distancia, con exactitud y sin tener que mantener un contacto físico con el objeto que se está ensayando.

Gracias a esto podemos detectar la presencia de fugas de calor para poder actuar en aquellos puntos detectados, analizar el estado de los revestimientos o pinturas, ensayar nuevos materiales de construcción o realizar controles de calidad.

Capítulo 5

Método Vibraciones

Los métodos basados en vibraciones son de los más habituales en el campo de la monitorización de salud estructural, al igual que los métodos de ultrasonidos, aunque estos últimos no están especialmente indicados en el caso de grandes estructuras debido a que los ultrasonidos decaen de forma rápida. Al contrario, los métodos vibracionales son los más utilizados en grandes estructuras. La base de los métodos vibracionales es el principio por el cual, cualquier daño en una estructura produce un cambio local de la flexibilidad por lo que sus propiedades también varían y estos cambios son detectados en la variación de sus frecuencias naturales, por tanto, el daño puede ser hallado analizando estos cambios.

Hasta ahora, para analizar la estructura de forma global había que realizar inspecciones visuales por técnicos especializados para la detección del daño. Pero gracias a las innovaciones de las últimas décadas podemos ser capaces de valorar globalmente el daño gracias a las vibraciones, que es la principal utilidad de estos métodos, ya que es primordial para casos de estructuras de gran complejidad como pueden ser puentes, viaductos o edificios. Sin embargo, la existencia de pequeñas fisuras puede no ser muy evidente a la hora de analizar las frecuencias naturales bajas de la estructura. Para conseguir solucionar este problema nos servimos de herramientas alternativas como es el análisis Wavelet [3].

A continuación vamos a presentar los distintos enfoques que existen a la hora de analizar vibraciones que consisten en el análisis de las señales temporales o los modos de vibración

5.1 Análisis de señales temporales

Los métodos estadísticos de series temporales de vibración (señales de vibración) usan la respuesta de vibraciones del sistema para construir un modelo estadístico en base al cual poder realizar una prueba o ensayo también estadístico para tomar decisiones sobre el daño [6]. Estos métodos pueden ser de tipo inverso, es decir, cuando están basados en datos en lugar de en constantes físicas.

Los métodos estadísticos se pueden clasificar según sea observable o no su señal de excitación. Si lo es, quiere decir que se puede medir y el método es de excitación-respuesta y si no se puede medir significa que el método es de solo respuesta.

Por lo general, los métodos de excitación-respuesta son los más efectivos para la detección de daño ya que al tener información sobre la excitación es posible hacer una selección más precisa de la información que corresponde sólo al sistema o estructura de análisis.

La estimación del modelo se realiza solo con los datos del método de solo respuesta y corresponde a las vibraciones de origen natural como el viento o el tránsito de coches para un puente... Son menos precisos ya que no se dispone de información sobre la excitación, ésta se puede confundir o ser asumida como información propia de la estructura y producir un modelo erróneo.

Según la técnica utilizada para estimar el modelo se pueden dividir en paramétricos y no paramétricos, los primeros requieren un elevado coste computacional por su complejidad y además una elevada experiencia del usuario. Son aconsejables para aplicaciones que requieren mucha precisión. Los segundos tienen un nivel de complejidad menor y su principal desventaja es que su precisión no es tan elevada. Estos métodos no paramétricos se basan en el dominio de la frecuencia y tienen en cuenta la información sobre las resonancias, los modos de vibración, etc. Entre los métodos no paramétricos se encuentra la entropía espectral, la cual es usada para calcular la cantidad de energía que no puede ser transformada en trabajo, y de la que profundaremos más en el capítulo 6.

5.2 Ventajas del uso de métodos estadísticos para SHM

- No requieren conocimiento detallado de las bases físicas del comportamiento de la estructura.
- No requieren modelación completa ni detallada del sistema.
- Tienen en cuenta las incertidumbres inherentes debido a las condiciones operacionales y ambientales.
- La toma de decisiones estadísticas se hace en base a características de

rendimiento específicas.

-
- Se puede hacer uso de registros de vibraciones aleatorias naturales del sistema sin necesidad de interrumpir su normal funcionamiento.
- No requieren inspección visual.
- Hacen una cobertura global de la estructura.
- Permiten la reducción de coste y de tiempo en la evaluación del daño.
- Permiten que el proceso pueda realizarse de forma automática.
- Permiten una respuesta rápida y continua.

5.3 Desventajas del uso de métodos estadísticos para SHM

- Los fallos detectados pertenecen solo a las señales de vibraciones con las que se cuenta. No se usan modelos completos.
- Requieren un conocimiento previo de la estructura y de los datos para su adecuada implementación e interpretación de resultados.
- Son menos sensibles que los métodos locales.
- El grado de incertidumbre puede ser elevado.
- Es posible que los cambios detectados no tengan relación con el daño.
- Es posible que se vean afectados por los cambios en las condiciones de contorno y conectividad del sistema.
- Las variaciones ambientales y operacionales pueden afectar la respuesta a las vibraciones.
- Es posible que la estructura no presente un comportamiento estacionario.

5.4 Análisis Modal

Durante los últimos años el análisis modal se ha estado convirtiendo en una tecnología de gran importancia en la investigación para la determinación, mejora y optimización de las características dinámicas en el ámbito de la ingeniería estructural.

Al diseño de las actuales estructuras civiles se les requiere que sean más ligeras, más flexibles e igual de fuertes. Por todo ello, el modelado computacional no puede, por sí solo, determinar completamente el comportamiento dinámico de las estructuras porque ciertas propiedades estructurales como el amortiguamiento y el carácter no lineal no se ajustan con los tratamientos de modelación tradicionales.

Las técnicas experimentales se nutren de la teoría del análisis modal y, a su vez proporcionan un nuevo impulso a la misma.

El análisis modal es el proceso de determinar la características dinámicas inherentes de un sistema en formas de frecuencias naturales [7]. El factor de amortiguamiento y los modos de vibración son usados para formular un modelo matemático para su comportamiento dinámico. El modelo matemático formulado es referido como un modelo modal del sistema y la información de las características son conocidas como datos modales.

Las estructuras dinámicas de una estructura son físicamente descompuestas en frecuencias y posiciones.

El análisis modal se basa en el hecho de que la respuesta de vibración de un sistema dinámico lineal invariante en el tiempo se puede expresar como la combinación lineal de un conjunto de movimientos armónicos simples llamados modos naturales de vibración.

Este concepto está relacionado con el uso de la combinación de Fourier de ondas senoidales y cosenoidales para representar una onda compleja. Los modos naturales de vibración son inherentes al sistema dinámico y son determinadas completamente como propiedades físicas como la masa, la rigidez...

La solución de problemas utilizando el análisis modal experimental es obtener una visión de una estructura dinámica problemática. Esta es una de las aplicaciones más populares del análisis modal experimental desde que apareció. También a menudo se anuncian aplicaciones adicionales de análisis modal. La solución de problemas depende de las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente, los factores y las formas modales de la estructura de amortiguación. Estos datos proporcionan una comprensión fundamental de las características estructurales y revelan a menudo la raíz de los problemas dinámicos que son encontrados en la vida real.

A la detección del daño estructural no visible siempre se le ha dado la debida importancia dentro de la industria, particularmente en la industria aeroespacial pero más recientemente se ha ido aplicando a construcciones civiles, concretamente en puentes, pero

esto quiere ser llevado a las máximas ramas posibles de las ingenierías. La base teórica de la aplicación del análisis modal para la detección de daños yace en el hecho de la respuesta dinámica de una estructura varíe debido a su inherente daño dinámico. Esto da lugar a la posibilidad de indentificar daño de la variación de respuestas de la estructura antes y después de que ocurra el daño. La detección de daño formula la relación entre el daño y los cambios de los parámetros modales de la estructura. La práctica más común es tener como base los parámetros de la estructura en condiciones perfectas de salud y una vez cambien los valores de estos parámetros será posible estudiar e investigar el daño de la estructura y por qué motivo son producidos.

Las aplicaciones prácticas de el analisis modal están estrechamente relacionadas con los avances en tecnología experimental. La gran mayoría de casos encontrados que han sido llevados a la práctica han sido en la ingeniería aeronáutica, ingeniería automóvil e ingeniería mecánica. El análisis modal se ha usado como un efectivo método no destructivo para localizar la presencia de defectos críticos. Esto puede ser de vital importancia debido a la información que aporta para llevar a cabo la decisión de mantenimiento de la construcción.

Capítulo 6

Entropía espectral (SE)

La entropía es una magnitud termodinámica que puede ser usada para calcular la cantidad de energía que no puede ser transformada en trabajo. Desde un punto de vista microscópico, es una medida de desorden de un sistema. La entropía es usada también en teoría de la información, donde está relacionada con la incertidumbre en una variable aleatoria, donde es llamada "Shannon Entropy". Para nuestros propósitos estamos llevando a usar el concepto de entropía como una medida de el desorden de un sistema pero aplicándole las frecuencias de distribución de una señal.

La siguiente expresión es la utilizada para calcular la entropía espectral mediante una analogía con la "Shannon Entropy" [8].

$$SE = - \sum_{i=1}^N \frac{A(f_i)}{A_T} \log \left(\frac{A(f_i)}{A_T} \right)$$

Donde f_i se refiere a las frecuencias de la función de respuesta de la frecuencia (FRF) y P_{f_i} es su amplitud normalizada. Como la entropía espectral es formalmente idéntica a la "Shannon Entropy", se puede tener las medidas del desorden de la distribución de frecuencias de la entropía espectral. Si toda la energía está concentrada en unas pocas frecuencias, la función de respuesta de la frecuencia está ordenada y la SE tiene un valor bajo. Del mismo modo, si la energía está distribuida en varias frecuencias, la función de respuesta de la frecuencia estará muy desordenada y la SE tendrá un valor elevado.

En la figura 1 se puede observar un ejemplo de tres FRFs normalizadas. La primera de las imágenes tiene solo dos frecuencias de la misma amplitud y el valor de su SE es de 3,163. La segunda imagen tiene las mismas frecuencias que la anterior pero una de ellas es de mayor amplitud que la primera, por lo tanto está más ordenado y su entropía espectral vale 3,108, lo que es un valor menor que el primero. La tercera FRF tiene tres frecuencias de igual valor y su SE es de 3,443. Como la energía es distribuida en más frecuencias, la función de respuesta de la frecuencia está más desordenada que las dos anteriores, por lo cual, su entropía espectral es la mayor.

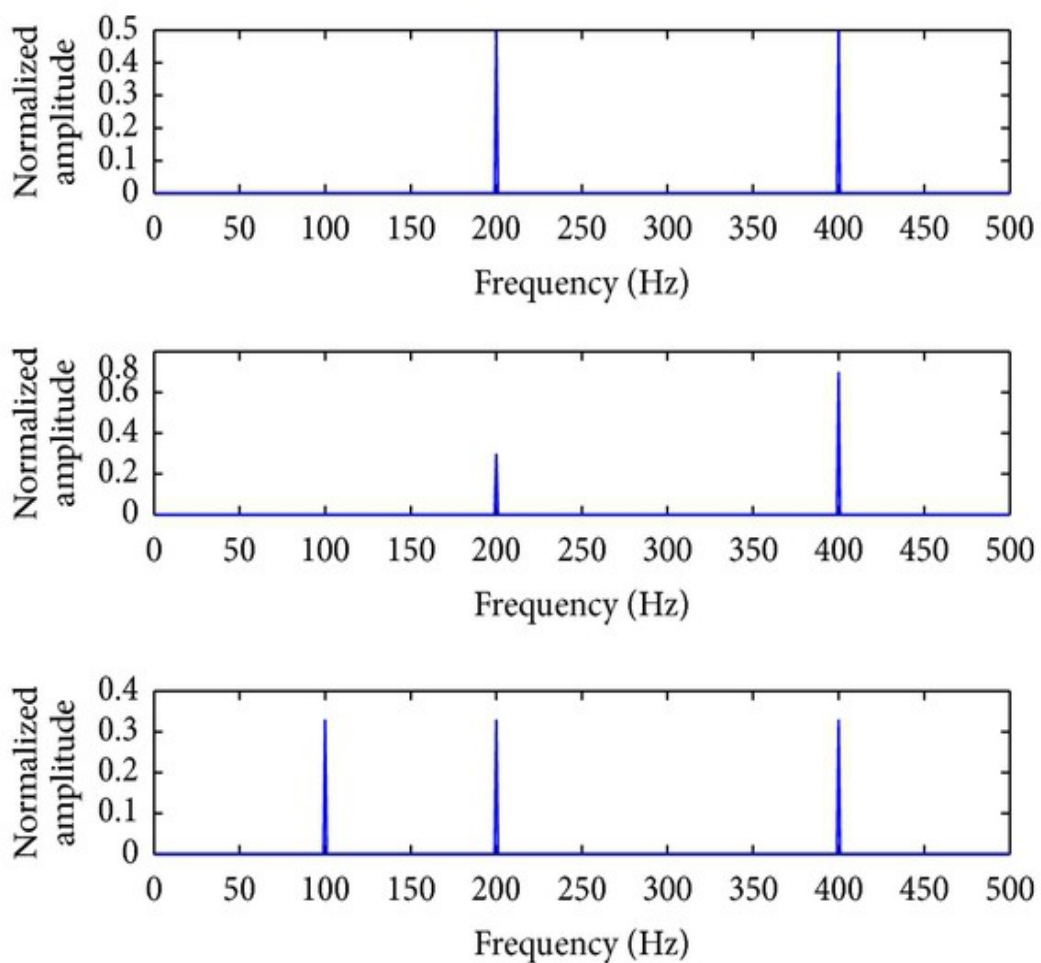


Figura 1: Ejemplos de FRFs de la dependencia de la SE con respecto a la amplitud. (Los valores exactos de la SE son 3.163, 3.108 y 3.433 respectivamente)

Desde hace unos años, la entropía espectral se ha estado utilizando solamente en el campo de la medicina, ya sea para evaluar la adecuación de la anestesia [9], en estudios con el objetivo de comparar los valores del índice biespectral con los de la entropía espectral en sus dos componentes (entropía estado y entropía de respuesta) durante la anestesia general [10] o en más sucesos que se están estudiando e intentando aplicar también a casos veterinarios.

Hasta la fecha, se desconoce el uso de la entropía espectral en el campo de la ingeniería. Este estudio pretende dar los primeros pasos para la incursión de esta técnica para la monitorización del daño estructuras en construcciones civiles y al resto de los campos de la ingeniería.

Capítulo 7

Explicación del experimento

El experimento llevado a cabo en la tesis doctoral *"Simulación y ensayo de vibraciones en placas de material compuesto de carbono y detección de daño mediante la Respuesta en Frecuencia y la Transformada de Wavelet"* (2012) fue llevado a cabo por Pablo Moreno García y en el que se realizaron experimentos de vibraciones sobre placas rectangulares consistentes en hacerlas vibrar con una excitación conocida accionada por un actuador piezoeléctrico y medir su respuesta vibracional en varios puntos mediante sensores piezoeléctricos. Estas vibraciones se han ejercido en tres tipos de placas, una de material compuesto laminado (figura 2.a) con espesor uniforme de aproximadamente 2,1 mm, una segunda placa de material compuesto laminado (figura 2.b) con dos zonas diferenciadas en espesor (la primera de 5,394 mm y la segunda de 3,828 mm), y una tercera placa de aluminio (figura 2.c) con un espesor uniforme de 2,86 mm.

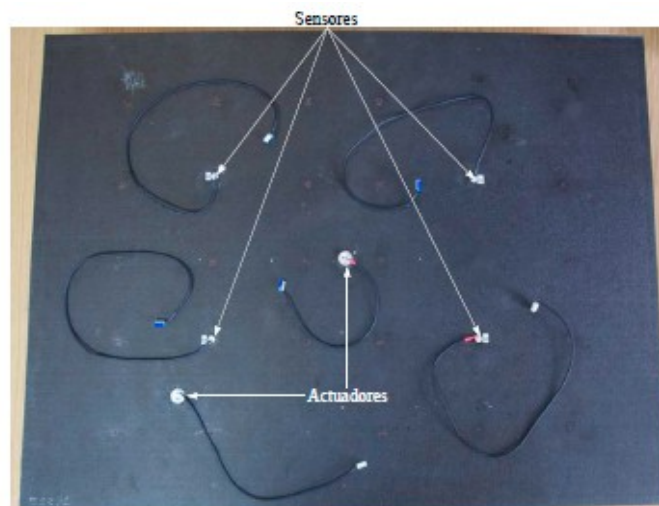


Figura 2.a: Placa CFRP1 instrumentada con dos actuadores y 4 sensores PZT.

Las vibraciones fueron inducidas a la placa en tres puntos concretos de la misma y los datos producidos por dichas vibraciones han sido recogidos por los 4 sensores PZT situados en la placa. Las placas fueron excitadas con dos tipos diferentes de frecuencias aleatorias, una primera tipo ruido blanco con un ancho de banda de 0 a 1600 Hz, y una segunda con señales senoidales de diferentes frecuencias.

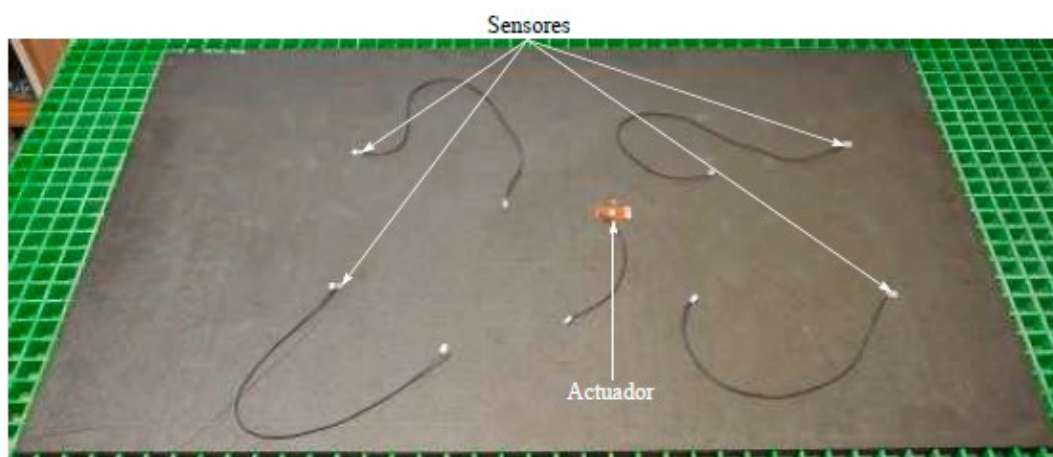


Figura 2.b: Placa CFRP2 instrumentada con dos actuadores y 4 sensores PZT.

El objetivo del experimento ha sido la detección de daño en placas de aluminio y material compuesto (CFRP) desde dos puntos de vista diferentes; un primero desde el análisis modal (mediante el estudio en los cambios del modo de vibración y las frecuencias naturales de las placas) y un segundo desde el análisis transitorio (mediante el estudio de los cambios en la respuesta de la placa en el dominio de la frecuencia a una determinada excitación).

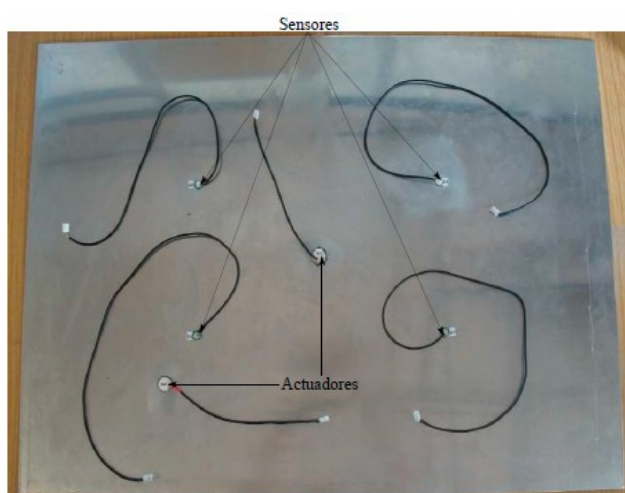


Figura 2.c: Placa aluminio instrumentada con dos actuadores y 4 sensores PZT.

Capítulo 8

Planteamiento del problema

La finalidad principal de este proyecto es encontrar una forma de utilizar la entropía espectral a nuestro favor en una estructura para poder localizar posibles fallos en construcciones para así, poder tratarlas y evitar el mal funcionamiento de las mismas o incluso su derrumbamiento. Para ello, se ha utilizado MATLAB, un programa informático-matemático, para procesar los datos del experimento y obtener los valores de la entropía espectral, y así poder relacionarlos con el daño y la posición del sensor.

Mediante ciertos algoritmos que hemos programado en MATLAB, este es capaz de representar la entropía espectral para; la placa sin masa, la placa con masa en posición uno, la placa con masa en posición dos y la placa con masa en posición tres.

Llegados a este punto hay que introducir en MATLAB el valor inicial desde el que empezamos a calcular la entropía y el número de datos de la FRF a considerar tal y como se muestran en la figura 3.

```

1 %Análisis de los datos para obtener la entropía en función del daño y la
2 %posición y el sensor
3 %USO SOLO LOS VALORES DE LOS PICOS DE FRECUENCIA
4 load A12011-04-25-masas;
5
6 inicial=1000;%índice desde el que empezamos a calcular la entropía
7 ifinal=round(3500);%Número de datos de la FRF a considerar 2001 corresponde a 500 Hz Máximo 8193
8 %En el paper del congreso de sesiembra uso 6003 datos
9
10 %Calculo la entropía para la placa sin masa
11
12 for i=1:4
13     for j=1:16
14
15         EntropiaFRFmasa0(i,j)=entropianormalsolopicos(FRFmasa0(i,inicial:ifinal,j));
16     end
17     EntropiaFRFmasa0Media(i)=mean(EntropiaFRFmasa0(i,:));
18     EntropiaFRFmasa0Std(i)=std(EntropiaFRFmasa0(i,j));
19
20
21     end
22

```

Figura 3: Cuadro texto MATLAB

Una vez introducidos los valores entre los cuales queremos analizar la entropía espectral, ejecutamos los algoritmos en MATLAB y el programa nos muestra una gráfica para cada una de las posiciones en la placa, en las cuales observamos en el eje de ordenadas los valores de la entropía espectral para cada uno de los valores de la masa en gramos que se han ido añadiendo a la placa, colocados en el eje de abscisas tal y como se muestra en la figura 4, en la figura 5 y en la figura 6.

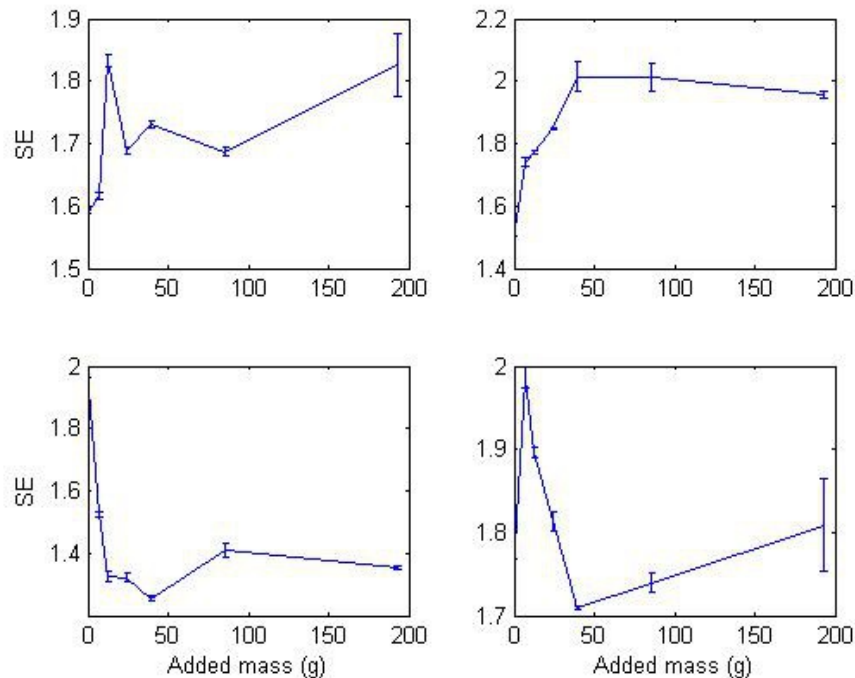


Figura 4: Valores de la SE en la banda de frecuencias 250 – 875 Hz en la posición 1

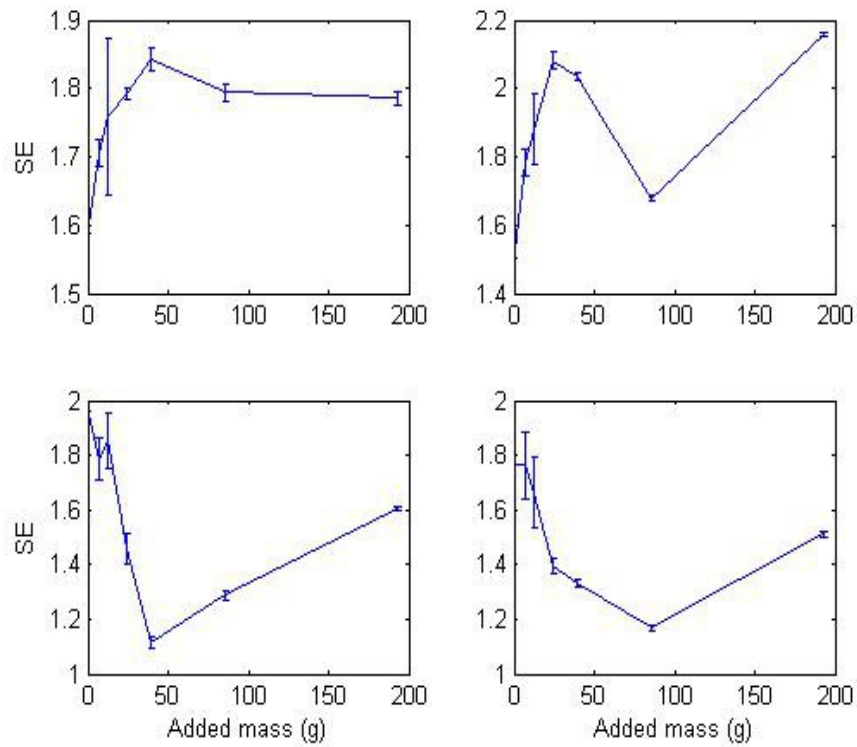


Figura 5: Valores de la SE en la banda de frecuencias 250 – 875 Hz en la posición 2

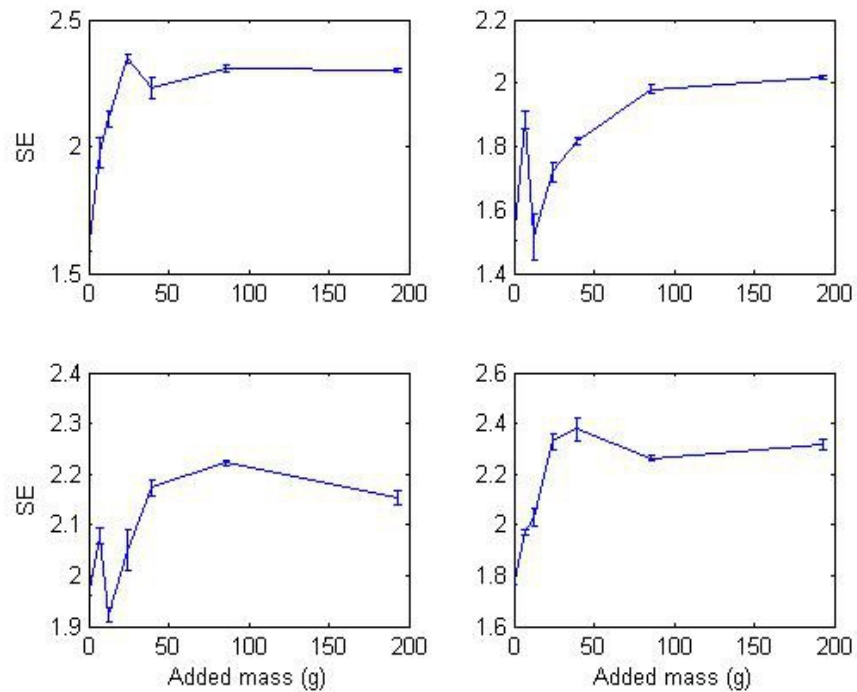


Figura 6: Valores de la SE en la banda de frecuencias 250 – 875 Hz en la posición 3

Esto nos muestra las cuatro gráficas, correspondientes a cada uno de los cuatro puntos de la placa en los que se ha colocado masa, para cada una de las posiciones del sensor.

Ahora, ya con las gráficas, debemos encontrar un patrón sencillo de comportamiento entre las cuatro gráficas de una de las posiciones del sensor. Dicho patrón podría ser de cualquier tipo. El objeto por el cual queremos hallar esta pauta es para estudiarla y comprobar si cuando existe un fallo o daño, la entropía espectral se comporta de alguna forma determinada por la cual podamos deducir (siempre que la entropía espectral nos de un arquetipo similar de comportamiento) que se está produciendo o se pueda producir un fallo en la estructura que estamos analizando.

Para hallar el patrón de comportamiento de la entropía espectral que necesitamos, es necesario realizar muchas pruebas con distintas franjas de valores con la máxima variedad de datos posible con el fin de barrer la mayor parte asequible de las opciones de las que disponemos. Es decir, probamos con franjas de valores pequeños, intermedios y grandes, en distintos tramos a lo largo de toda la amplitud de frecuencias de la que disponemos.

Capítulo 9

Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la experimentación llevada a cabo. Los siguientes resultados mostrados han sido obtenidos por el programa informático-matemático MATLAB. Con uno de los resultados que se producían se tomaba minuciosas anotaciones y se registraban para, al final de la jornada de búsqueda, poder analizarlos y compararlos unos con otros para llegar al resultado más favorable. Algunas de las gráficas obtenidas eran descartadas ya que entendíamos que no nos aportaba la información que se necesitaba de ellas. Otras muchas se comparaban con cuidado ya que presentaban rasgos interesantes que podrían ser provechosos pero finalmente se descartaban al no coincidir completamente con lo esperado. Solo unas pocas gráficas parecían presentar el comportamiento que queríamos por lo que se estudiaban más detenidamente. Los resultados presentados en los siguientes apartados son una representación de los casos más significantes en cada tipo de muestreo de los que se ha ido probando durante la investigación.

Un aspecto interesante a tener en cuenta es el de que si unos valores presentaban un comportamiento adecuado, este podía presentarse solamente en una de las las posiciones en las que se añadía masa en la placa y ser totalmente inadecuado en las otras dos.

Cabe destacar que para llegar a conseguir un resultado favorable se ha tenido que estudiar la amplitud de frecuencias e ir haciendo multitud de pruebas con distintos rangos de valores, observar los datos proporcionados por los cuatro sensores en cada una de las tres posiciones e ir comprobando y analizando qué es lo que ocurre en cada una de ellas.

9.1 Amplitud de frecuencias

Teniendo la amplitud de frecuencias que se muestra en la figura 7, cuyo valor máximo es de $3,317 \cdot 10^5$ que se encuentra la frecuencia 1852,25 Hz, lo primero que salta a la vista nada mas ver las amplitudes de las frecuencias son los picos tan altos que se encuentran entre, aproximadamente, la banda de frecuencias de 1750 y 2000 Hz. En este rango, existen muchos máximos y mínimos con demasiada amplitud con lo que resulta muy complicado analizar el valor de la entropía en esa franja. Después, observamos con claridad que en el resto de la gráfica los valores son relativamente uniformes, con amplitudes no tan grandes como la explicada anteriormente. Desde el comienzo de la gráfica hasta la frecuencia 1750 Hz aproximadamente, vemos como las amplitudes prácticamente no supera el $0,5 \cdot 10^5$. Estos valores, al tener menos variaciones y ser más constantes son mucho más fáciles de analizar respecto al objetivo de este proyecto, por tanto, son los que vamos a estudiar para intentar hallar el patrón de comportamiento que deseamos encontrar.

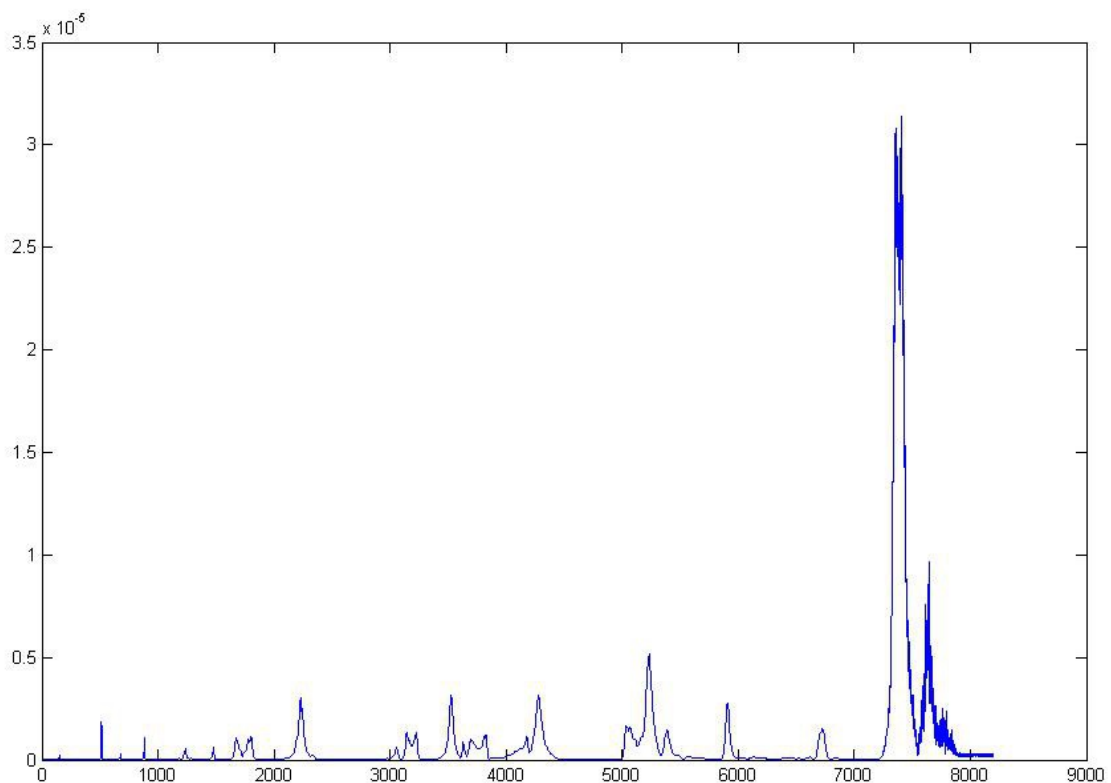


Figura 7: Amplitud de frecuencias

9.2 Resultados desfavorables

Con simplemente unas pruebas iniciales descubrimos que cualquier dato de la entropía espectral analizado en el tramo de frecuencias 1750 – 2000 Hz de la gráfica proporciona unos valores con un rango de error demasiado alto para poder estudiarlo o simplemente tenerlo en cuenta ya que las posibles conclusiones halladas serían poco fiables. Como ejemplo, la figura 8, en la que se ven las barras de error excesivamente amplias para poder llevar a cabo conclusiones certeras y realistas con esos valores de entropía espectral ya que significa que las mediciones pueden no ser totalmente exactas, lo que reduce su interés para con nuestro objetivo de estudio. Este caso en particular había sido previsto con anterioridad en el apartado 9.1 cuando analizábamos la amplitud de frecuencias.

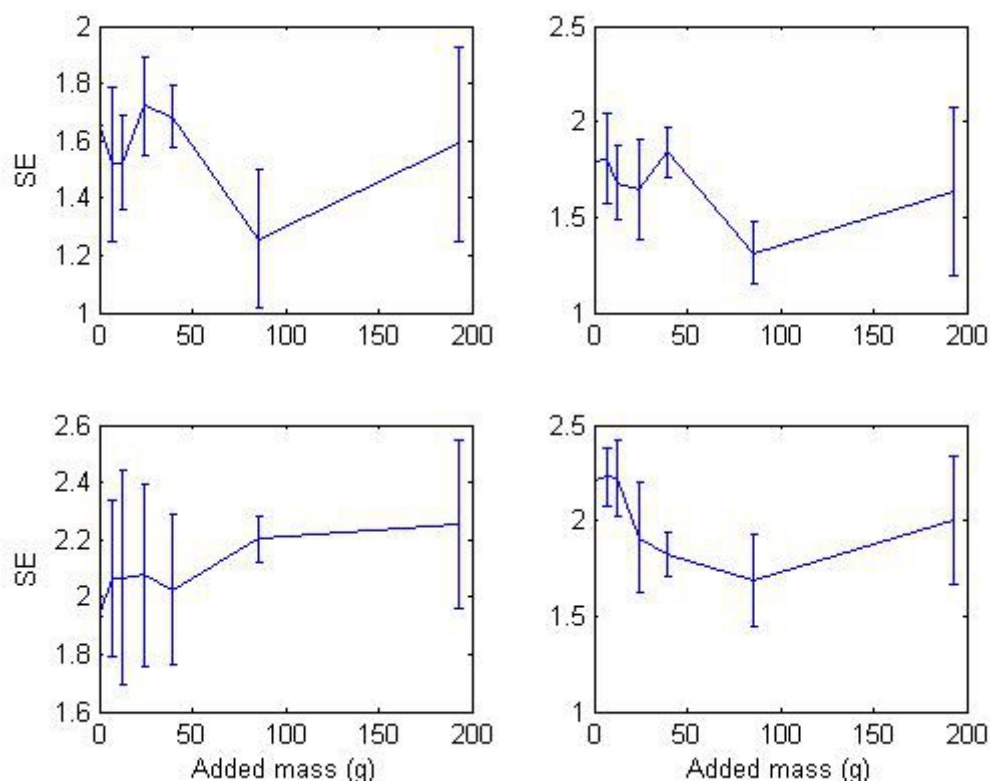


Figura 8: Valores de la SE en el rango 7000 – 8000 en la posición 3

Para seguir con la búsqueda del patrón de comportamiento que estamos buscando he probado con franjas de valores muy grandes para analizar la entropía espectral de manera genérica. Estas primeras pruebas se han realizado escogiendo grupos de unos 1000 Hz, como se muestra en la figura 9, o incluso de mayor rango, llegando incluso a barrer las amplitudes de 0 hasta 1750 Hz. En todos los casos se obtenían resultados muy similares al mostrado en el ejemplo.

Estas primeras probaturas me hacían darme cuenta rápidamente de que no estaba obteniendo resultados interesantes ya que al tener rangos tan grandes, los valores entre los cuatro sensores en cada una de las tres posiciones eran muy dispares, la entropía espectral parecía tener un comportamiento totalmente aleatorio y sin significado relevante con respecto a nuestro asunto de estudio, impidiéndome sacar ningún tipo de conclusión clara.

En la figura 9 se muestra un ejemplo de la disposición de la entropía espectral cuando el rango de valores es tan elevado.

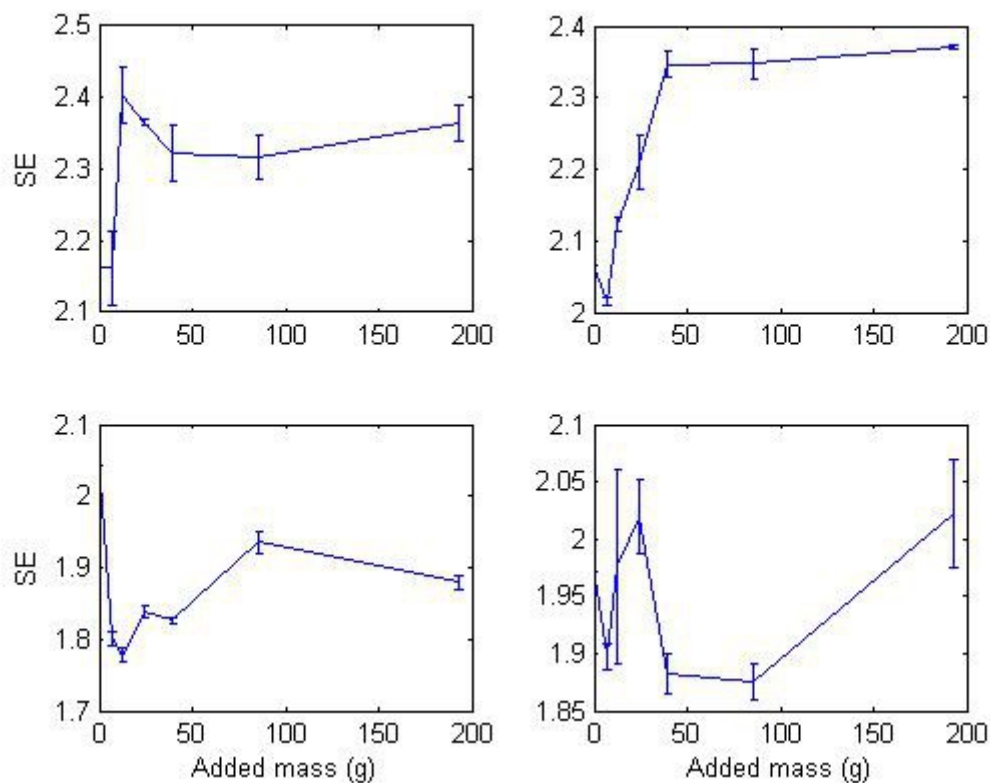


Figura 9: Valores de la SE en la banda de frecuencias 250 – 1250 Hz en la posición 1

Como se puede ver, la gráfica no sigue ningún tipo de patrón de comportamiento. Se puede observar que desde el momento en el que se empieza a añadir masa a la placa, la entropía puede aumentar o disminuir sin parecer tener relación alguna entre ninguno de los sensores. Además, los límites de error también son muy dispares, podemos encontrar en la gráfica del sensor número tres los límites de error muy pequeños, lo que hace la medida muy aceptable y exacta, pudiéndonos fiar de los resultados medidos. En cambio, en la gráfica número cuatro, los límites de error son muy amplios, lo que significa que en este caso en concreto, las mediciones no son aceptables ya que puede haber error en alguna de las medidas.

Los siguientes intentos los he ido realizando con rangos muy pequeños, de solamente unos cientos de datos, lo que tampoco me traía ningún resultado satisfactorio ya que, a pesar de encontrar algún patrón con ciertas similitudes que podrían ser interesantes a priori, los límites de error eran demasiado grandes como para poder estudiar esos casos detenidamente. Además, los valores de entropía espectral eran, en algunos casos, muy cercanos a cero tal como se puede observar en la figura 10.

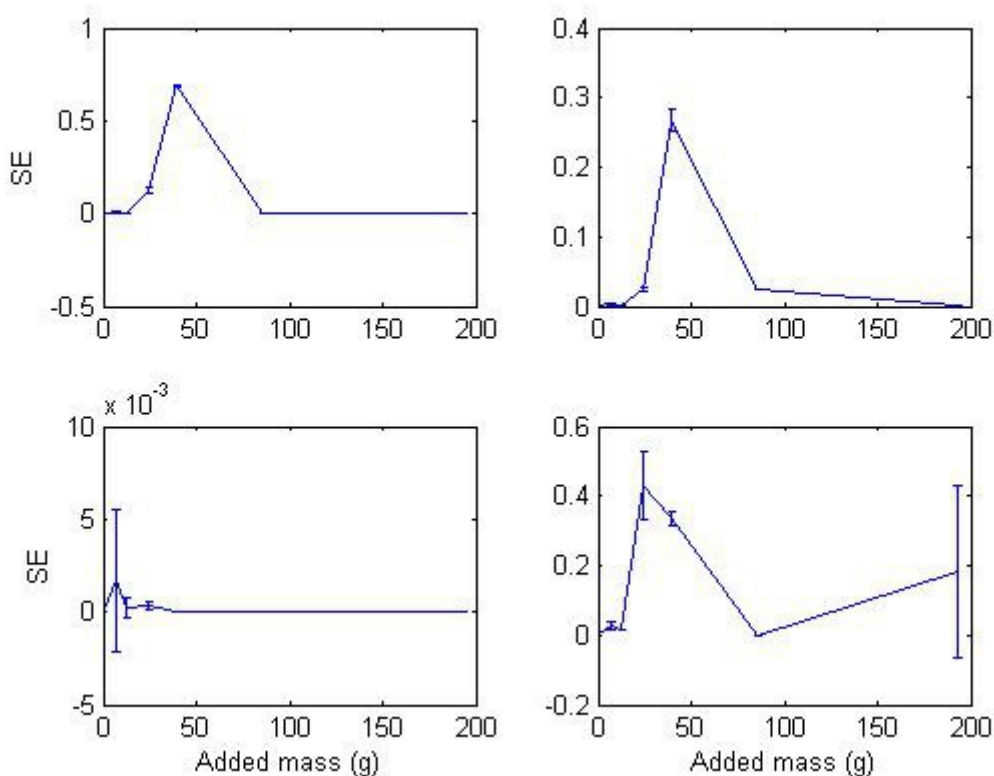


Figura 10: Valores de la SE en la banda de frecuencias 200 – 225 Hz en la posición 2

En este caso en particular observamos un aumento y un descenso prácticamente instantáneo de la entropía espectral en el momento de añadir la primera masa de 50 g. y a continuación se mantenía en 0 como en el caso de la posición número uno y número 3 o prácticamente 0 como en las posiciones número dos y número cuatro. Aparte de esto, vemos una discordancia en la gráfica número tres en el momento anterior a añadir la primera masa, en donde el valor de la entropía espectral varía muy levemente, pudiendo alcanzar un valor máximo de $5 \cdot 10^{-3}$ y un mínimo de $-2 \cdot 10^{-3}$ pero a parte de esta mínima variación, la SE registrada en este sensor no muestra cambio a medida de la adición de masa en la placa de estudio.

9.3 Resultados favorables

Vistos los casos anteriores, en los que no encontrábamos ningún resultado satisfactorio, necesitábamos probar con franjas de valores suficientemente grandes para que los límites de error fueran mínimos, pero no tan grandes como para desvirtualizar el resultado como pasaba en los primeros casos expuestos. Para esto se ha ido analizando uno por uno todos los picos y conjuntos de frecuencias posibles, tanto por separado como por grupos, para intentar barrer todas las posibilidades, y así, tener más opciones de hallar el patrón de comportamiento deseado.

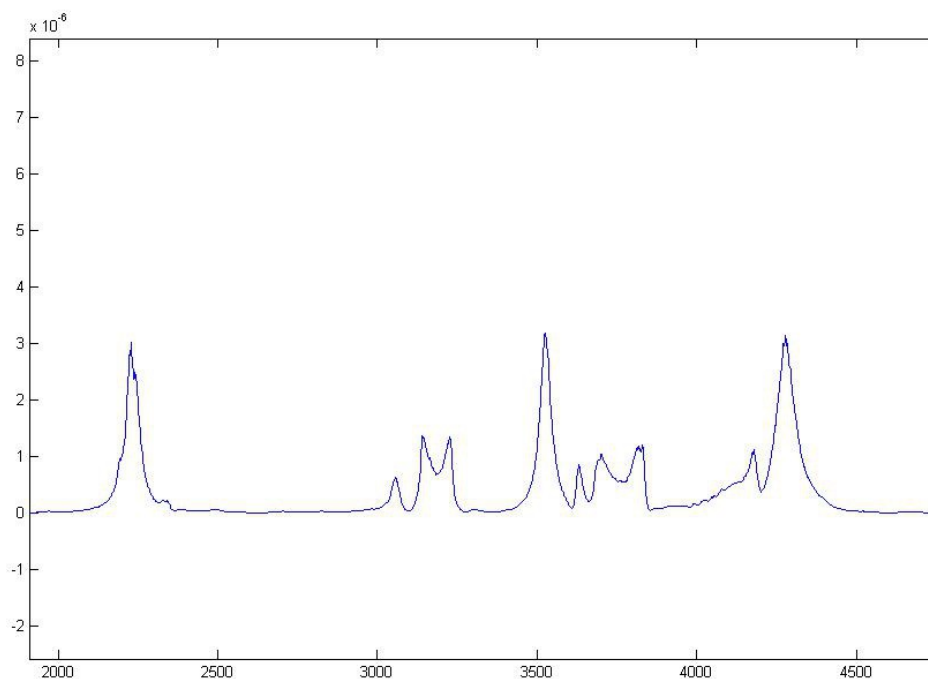


Figura 11: Amplitud de frecuencias en la banda de frecuencias 500-1150 Hz

Una de las franjas estudiadas de la amplitud de frecuencias es la que se muestra en la figura 11. Cuando se ha analizado la entropía espectral entre los valores de frecuencias 500 y 1150 Hz, se ha observado una clara tendencia de la entropía espectral mostrada en las cuatro gráficas de cada una de las posiciones que se pueden observar en las figuras 12.a, 12.b y 12.c.

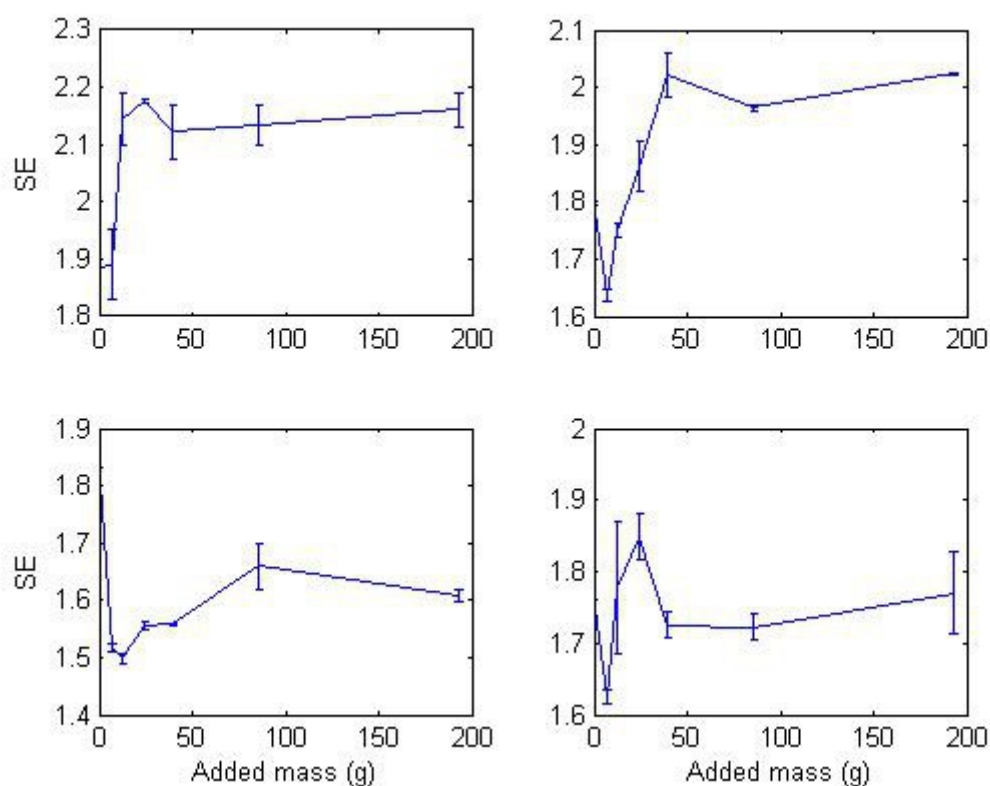


Figura 12.a: Valores de la SE en la banda de frecuencias 500-1150 Hz en la posición 1

En este caso concreto de la posición 1, observamos como la entropía espectral tiene una tendencia creciente en los todos los sensores desde el primer momento con la excepción del sensor número tres que justo al comienzo de la gráfica disminuye, para luego aumentar de forma parecida a los otros tres casos dentro de esta posición. Los dos primeros sensores nos muestran un valor de la SE un poco por encima de 2 mientras que los dos sensores restantes tienen su máximo al rededor del 1,8. En los cuatro sensores, estos máximos se alcanzan antes de ser la masa añadida, para luego disminuir y volver a aumentar de forma mucho más moderada y uniforme.

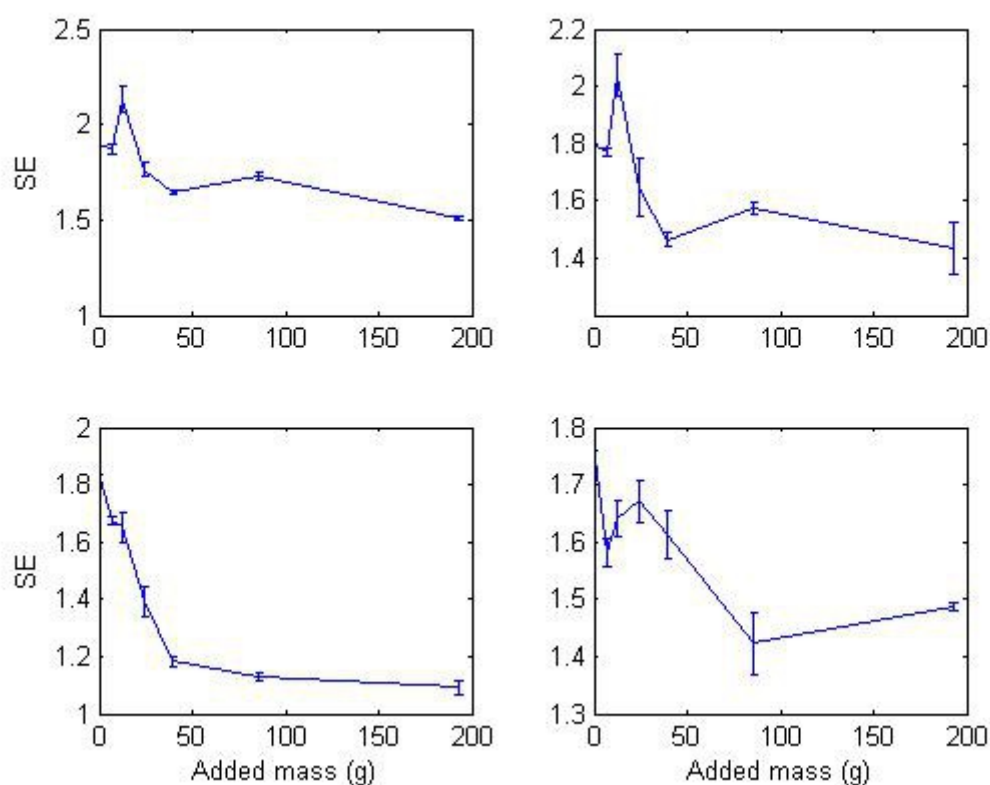


Figura 12 b: Valores de la SE en la banda de frecuencias 500-1150 Hz en la posición 2

Entramos ahora a analizar los valores de la entropía espectral resultante en la posición número dos. Se observa claramente como al comienzo de los cuatro sensores el valor de la SE es muy cercano a 2 a partir del cual muestran un descenso relativamente abrupto hasta la masa añadida de 50 g. para luego mantener cierta constancia hasta que la masa añadida es de 200g. Podemos ver como el valor en el momento en el que la SE desciende al principio, como hemos mencionado anteriormente, es muy similar en los cuatro casos. En la posición número uno, dos y cuatro, este valor de la SE es muy cercano a 1,4 y en el restante se sitúa en torno al 1,2.

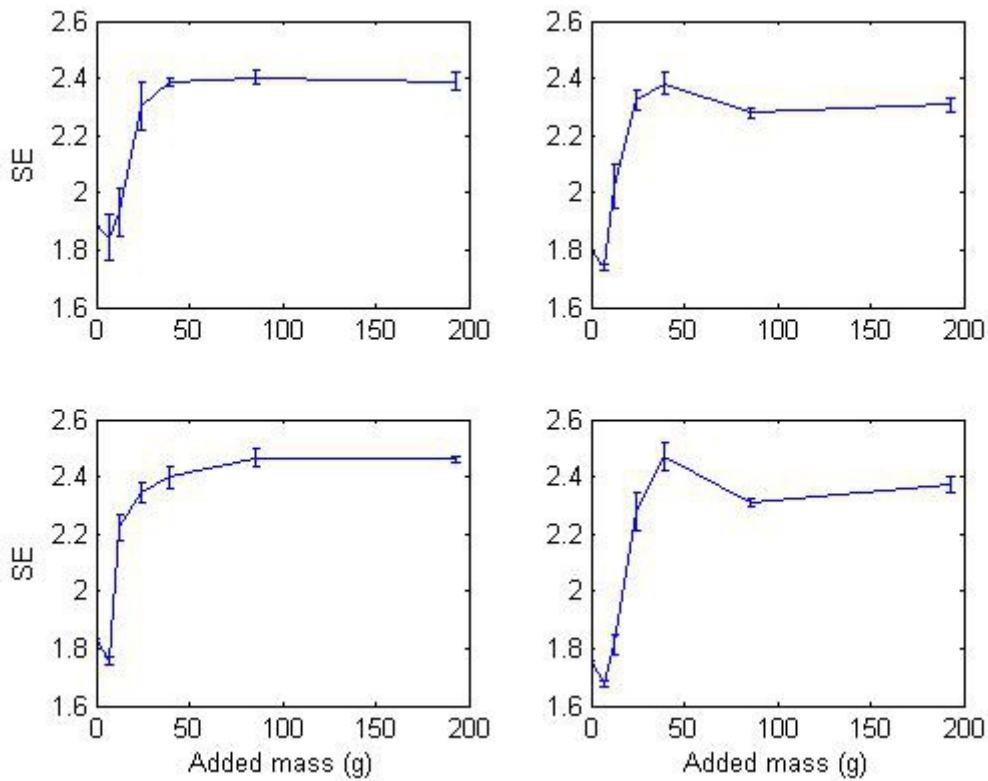


Figura 12.c: Valores de la SE en la banda de frecuencias 500-1150 Hz en la posición 3

Se puede ver como la entropía espectral comienza en un valor de 1.8 – 1.9 con masa 0 g. e incrementa rápidamente hasta que la masa es de 50 g. a un valor de aproximadamente 2.4 en los cuatro sensores. Una vez aquí el valor se mantiene prácticamente constante hasta el final de la curva que es cuando el valor de la masa añadida es de 200g.

Esta particularidad encontrada es la que buscábamos desde el inicio del experimento. Se puede observar claramente una tendencia de la entropía espectral a aumentar de forma exponencial desde el inicio hasta que la primera masa es añadida, donde alcanza su punto máximo en las posiciones número uno, dos y cuatro, en la tercera posición, el máximo llega cuando la masa es de 100g. A partir del momento en el que la entropía espectral está en lo más alto se mantiene prácticamente constante en un valor muy similar en los cuatro sensores. Aunque como se puede ver en la figura 12c, las gráficas procedentes de los sensores número dos y cuatro, después de que la SE alcance su punto más elevado tienen un leve declive y un ligero aumento hasta llegar a un valor de SE de 2.4 en las cuatro gráficas mostradas.

Este patrón de comportamiento nos ofrece la posibilidad de estudiarlo y registrarlo para poder analizarlo más a fondo en estudios futuros y llevar el resultado a estructuras más complejas.

Capítulo 10

Conclusiones

En vista de todos los resultados obtenidos, tanto los favorables como los desfavorables, y todas las prácticas usadas en esta investigación, podemos llegar a una primera conclusión: existe una relación directa entre las frecuencias resonantes de la placa del experimento y la entropía espectral. Esta relación ha sido probada gracias a los cambios de la entropía espectral cuando se produce daño. Esta variación es mayor que la que se pueda producir en cualquier otra medida. Hay que señalar que esta variación en la medida de la entropía espectral, dependiendo de la posición, puede aumentar o disminuir a medida de que el daño va creciendo. Esto significa que la cantidad del daño producido y su localización puede ser relacionado con la variación de la entropía espectral.

Lo que se ha conseguido en este proyecto es dar un primer paso para hallar un nuevo método de detección y prevención de daños en estructuras mediante procesos no destructivos, ya que este en un campo en constante crecimiento durante los últimos años y el uso de la entropía espectral en este campo es prácticamente inexistente, por lo que esperamos abrir una pequeña ventana para que en el futuro, este sea un método de gran eficiencia e importancia en el sector de la ingeniería civil.

La extrapolación de estas conclusiones a construcciones civiles monitorizadas permitirían reconocer de forma inmediata el tipo de daño que se está produciendo en la estructura, el lugar de la misma en el que se está registrando y sobre todo el preciso momento en que está ocurriendo, ya que detectar el problema con el tiempo de antelación suficiente es de vital importancia a la hora de tratar la estructura para evitar precances mayores, que a fin de cuentas es el primordial objetivo de toda monitorización de daños estructural.

Capítulo 11

Bibliografía

- [1] A. Rytter "Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures" PhD-Thesis. Aalborg University, Denmark (1993).
- [2] "Monitoreo de salud estructural" <http://www.ingenieria.peru-v.com>
- [3] Enrique Castro Rodríguez. "Simulación de ondas elásticas en vigas mediante el Método de Redes y detección de daño mediante la Transformada Wavelet". Tesis doctoral. Universidad de Granada. (2005)
- [4] A. Haar, Zur theorie der Orthogonalen Functionensysteme. Math Ann. 69, 331-371.
- [5] Asociación Española de Ensayos No Destructivos <http://www.aend.org>
- [6] Pablo Moreno García "Simulación y ensayos de vibraciones en placas de material compuesto de fibra de carbono y detección de daño mediante la Respuesta en Frecuencia y la Transformada Wavelet" Tesis doctoral. Universidad de Granada. (2012).
- [7] Zhi-Fang Fu, Jimin He "Modal Analysis" (2001).
- [8] Castro, E. Moreno García, P. Gallego, A. "Damage detection in CFRP plates using spectral entropy" (2014).
- [9] Nunes, Rogean Rodrigues (Universidade de Fortaleza, UFC, Sociedade Brasileira de Engenharia Biomédica, Hospital São Lucas. Serviço de Anestesiologia); Almeida, Murilo Pereira de (Brown University, UFC. departamento de Física, PUC/RJ); Sleight, James Wallace (University of Auckland. Waikato Clinical School, Medical and Health Sciences). "Entropía espectral: un nuevo método para adecuación anestésica " Revista Brasileña de Anestesiología; volume 54, número 3, páginas 404-422. (2004).
- [10] C. Espí, P. Vila, S. Muñoz, M. Moneris, V. Mazo, J. Canet. "Estudio comparativo del índice biespectral y la entropía espectral en cirugía ginecológica" (Rev. Esp. Anestesiol. Reanim. 52: 459-465) (2005)