

1. Presentación

1.1 Introducción

Este trabajo surge tras el interés del autor por la teoría y conceptos relacionados con la parte experimental de las vibraciones.

En el diseño de cualquier estructura o mecanismo, bien aeronáutica o de cualquier otro campo de la industria, se necesita de un modelo numérico para validar su diseño, mediante el cual se realizarán estudios de viabilidad de la función que debe realizar. Sin embargo, debido a los requisitos de seguridad, este modelo debe ser contrastado con la realidad. La única vía es la experimentación.

Antes de ir al laboratorio y validar cualquier solución de la que se disponga, bien numérica o analítica –estas últimas no son usuales debido a la complejidad de las estructuras-, se necesita de un conocimiento profundo de la física involucrada y de las herramientas necesarias. Si ese último punto no se valora lo suficiente, el experimento podría proporcionar datos erróneos, acompañado del gasto de capital.

Debido a la importancia, tanto a nivel de seguridad y económico de este tipo de fenómenos, es de interés general conocer los sistemas utilizados y los procesos involucrados en esta materia. Así, este proyecto intenta dar una visión general de la teoría usada en el estudio modal de sistemas dinámicos, con una parte práctica llevada a cabo en el laboratorio de una estructura construida para dicho fin, con el objetivo de enriquecer el propio análisis.

1.2 Vibraciones y análisis modal

La vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Es el resultado de fuerzas dinámicas en las máquinas o estructuras que tienen partes en movimiento o sometidas a acciones variables. Las diferentes partes del sistema vibrarán con distintas frecuencias y amplitudes. Normalmente, tiene su origen en los efectos dinámicos de las tolerancias de fabricación, rozamientos, fuerzas desequilibradas en elementos en rotación, el contacto entre elementos que están rodando, balanceando o deslizando, etc.

A menudo, pequeñas fuerzas aplicadas pueden excitar las frecuencias de resonancia de partes de la estructura. Si el aporte de energía se hace a una frecuencia determinada, la tasa de absorción es la máxima posible... Este fenómeno puede causar fallo por fatiga y, a menudo, es la responsable del agotamiento de la vida útil de la máquina u a su fallo estructural.

El análisis modal experimental se lleva practicando hace más de cincuenta años. Se usaba para validar cualquier modelo teórico construido, con la finalidad de predecir el comportamiento de la estructura ante condiciones de cargas dinámicas. Hoy día, estos modelos analíticos provienen de los elementos finitos.

Los primeros métodos experimentales en análisis modal datan de 1940s, cuando los ingenieros realizaban ensayos de vibraciones en estructuras aeronáuticas con el fin de obtener las cargas que la hacían colapsar. Sin embargo, en aquellos tiempos no se disponían de los transductores y sistemas de tratamiento de señal que se dispone hoy día, y la fiabilidad no era grande.

Con la llegada de las computadoras modernas y el desarrollo de las técnicas de análisis de las FFT, en los sesenta, comienza realmente el análisis modal experimental como se conoce hoy día.

Desde entonces hasta ahora, el progreso en este campo ha ido creciendo exponencialmente, apareciendo nuevos métodos aplicados, con el avance en la precisión de los sistemas de adquisición y tratamientos de señal, unido a una filosofía de plantear qué parámetros deben ser medidos y cuáles no, así como el nivel de precisión deseado.

1.3 Necesidad de estudios dinámicos

Cualquier estructura está sometida a ciertos tipos de cargas. Estas pueden tener componentes que exciten las distintas frecuencias de resonancia del sistema. Para evitar el fallo de la misma se debe disminuir en ocasiones las oscilaciones producidas, siendo necesario un conocimiento profundo del sistema bajo estudio.

Bien conocido es el fallo del antiguo puente colgante de *Tacoma Narrows*, cerca de Seattle. En 1940, pocos meses después de haber sido inaugurado el puente, un día de viento, comenzó a ondear. Tras poco más de una hora de sacudidas y vaivenes, el puente de 1.600 metros de longitud se derrumbaba y caía hecho pedazos al agua. Afortunadamente no hubo víctimas.

El viento que provocó la caída del puente se movía a una velocidad de 61 kilómetros por hora, y tenía 5 segundos de frecuencia, que resultó ser muy similar a la frecuencia natural del puente “con lo cual la energía transferida al sistema era máxima y las ondas estacionarias producidas en el puente empezaron a balancearlo y acabaron colapsándolo.”

En las siguientes figuras se pueden apreciar los niveles de desplazamiento de algunos de los tramos del puente, así como el momento del colapso:



Fig. 1. 1 Vista lateral del puente de Tacoma



Fig. 1. 2 Vista frontal del puente de Tacoma

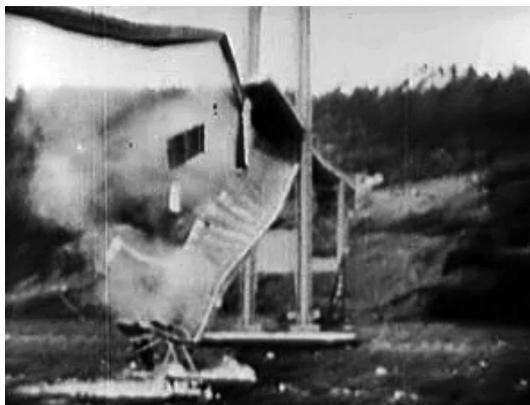


Fig. 1. 3 Colapso del puente de Tacoma

Sin embargo, existen multitudes de ejemplos que pueden citarse y que reflejarían la necesidad de estos estudios dinámicos para evitar fallos estructurales.

Otro ejemplo es el colapso producido en unas pruebas llevadas a cabo en un helicóptero CH-47 Chinook. Tanto éste helicóptero bimotor de transporte medio fabricado por Boeing, como todas las aeronaves fabricadas en el sector aeronáutico, deben pasar unas pruebas dinámicas para su certificación.

En este caso concreto, unas pruebas realizadas en tierra en el arranque de los rotores produjeron un fallo total del mástil del rotor trasero (Fig.1.4 y Fig.1.5):



Fig. 1. 4 Test de resonancia en tierra CH-47



Fig. 1. 5 Colapso del mástil trasero CH-47

Las cargas aerodinámicas e inerciales que aparecen sobre la pala varían considerablemente a medida que ésta rota. Las cargas, fuerzas y momentos, son transmitidas desde la pala al buje y por medio del eje del rotor llegan a la caja principal de engranajes y finalmente al fuselaje, a través de los puntos de unión de la caja de engranajes con el fuselaje. Estas cargas se traducen en la creación de importantes vibraciones transmitidas al fuselaje.

El control de estas vibraciones es fundamental para mejorar el confort de los pasajeros y pilotos, para garantizar la seguridad de operación, para mejorar la fiabilidad de los sistemas de instrumentación y aviónica y por supuesto, alargar la vida a fatiga de los diversos componentes estructurales.

Supongamos un rotor con un número b de palas. Se considera la posición de la pala, m , definida por su azimut $\psi_m = \psi + 2\pi m/b$. Como se puede ver en [9], las cargas generadas por las palas son de naturaleza periódica. Por tanto las cargas de la pala m expresadas en el sistema de ejes giratorios (1: dirección cuerda, 2: envergadura, 3: perpendicular a la pala) se pueden expresar como series de Fourier de ψ_m como:

$$\begin{bmatrix} R_1^{(m)} \\ R_2^{(m)} \\ R_3^{(m)} \end{bmatrix} = \sum_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} R_{1,n} \\ R_{2,n} \\ R_{3,n} \end{bmatrix} e^{in\psi_m} \quad (1.1)$$

Donde los términos $R_{j,n}$ son los coeficientes de Fourier de las fuerzas generadas en las palas. Estas dependen de la forma y características de las mismas.

Estas reacciones se deben transformar en ejes cuerpos según:

$$\begin{bmatrix} X^{(m)} \\ Y^{(m)} \\ Z^{(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\psi_m) & \text{sen}(\psi_m) & 0 \\ \text{sen}(\psi_m) & \cos(\psi_m) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1^{(m)} \\ R_2^{(m)} \\ R_3^{(m)} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Las cargas transmitidas al buje y por tanto a la estructura serán la superposición de las reacciones de todas las palas:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \sum_{m=1}^b \begin{bmatrix} X^{(m)} \\ Y^{(m)} \\ Z^{(m)} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Para cada dirección (X Y Z), si se realizan las operaciones definidas en bibliografía las fuerzas son:

$$\begin{aligned} Z &= -\sum_{p=-\infty}^b b R_{3,pb} e^{ipb\psi} \\ X &= \sum_{p=-\infty}^b HX_{pb} \frac{b}{2} e^{ipb\psi} \\ Y &= \sum_{p=-\infty}^b HY_{pb} \frac{b}{2} e^{ipb\psi} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Donde HX y HY dependen de una combinación de R_1 y R_2 .

Se puede observar que en la dirección Z, las cargas transmitidas a la estructura son los armónicos cuyas frecuencias son múltiplos del número de palas y la frecuencia de excitación serán también en múltiplos del número de palas. Por ejemplo, si el rotor tiene cuatro palas, sólo los armónicos en $4\Omega, 8\Omega \dots$ contribuirán a la resultante de las cargas en esa dirección y a esa frecuencia.

Para las cargas en el plano del rotor (X e Y) que las b palas transmiten serán los armónicos cuyas frecuencias propias son $(pb+1)$. La frecuencia de excitación transmitida a la estructura es en múltiplos del número de palas.

Este resultado considera que las palas se encuentran perfectamente equilibradas. La realidad es que las palas nunca se encontrarán en este estado, por lo que siempre existirán contribuciones en otros armónicos diferentes. Sin embargo estos calculados serán los que tengan mayor peso.

Volviendo al caso del Chinook y observando los resultados del test, a medida que el rotor gira y se estabiliza en un régimen de giro, las fuerzas laterales y perpendiculares (X Y Z) van variando en intensidad y frecuencia.

Dependientes de las condiciones de contorno, que pueden ir cambiando a lo largo del test, los modos de vibración a determinadas frecuencias de resonancia han podido ser excitados. Estos desplazamientos van produciendo en la estructura del mástil trasero unas deformaciones, con unas tensiones asociadas que no ha podido soportar, acabando en el colapso final.

1.4 Objetivo del proyecto

Ha quedado claro en los detalles anteriores que si las distintas sollicitaciones hacen que un sistema entre en resonancia, la amplitud de las vibraciones puede alcanzar valores críticos, conllevando posiblemente el colapso en la estructura. Es necesario entonces un control exhaustivo y apropiado para mantener el nivel de eficiencia del diseño, prolongando así la vida útil de la máquina o estructura.

Las implicaciones que en el diseño de cualquier sistema estructural tiene la caracterización dinámica del mismo no sólo llevarían a pérdidas económicas si fallasen, sino posiblemente a fallos que pongan en juego vidas humanas, como el caso del Chinook visto.

En este proyecto se parte de la base de las necesidades de estudios destinados a generar un modelo dinámico de cualquier estructura tras ver distintos casos de fallos (Chinook y puente de Tacoma).

En el segundo punto se presentan las bases esenciales para realizar un estudio dinámico teórico de un sistema estructural. Se diferencia entre los sistemas de un grado de libertad, presentados en primer lugar por ser más sencillos, pasando luego a sistemas de multitud de grados de libertad (necesarios y más próximos a la estructura real). En ellos se discute las distintas características y los modelos usados.

El punto siguiente está dedicado al análisis del dominio de la frecuencia. Por ser este dominio el medio usado para caracterizar el comportamiento de la estructura, presenta un contenido extenso de los distintos aspectos relacionados. Mediante la transformada de Fourier (y en el caso de análisis modal experimental con la evolución a FFT) se puede descomponer las sollicitaciones y respuestas en funciones sinusoidal con una determinada frecuencia, que facilitan su manejo y comprensión de las fuerzas implicadas en las distintas respuestas. Además, se presta atención a conceptos relacionados con la adquisición de las señales y procesado de las mismas. Características que alejan del ideal al método matemático, pero necesarios para llevar a cabo los ensayos en laboratorio.

El punto cuarto se describe distintos elementos usados en un ensayo de análisis modal. Se describen algunos medios de excitación, los transductores de vibración (acelerómetros) y los sistemas de análisis (analizadores).

El quinto punto es quizás el núcleo de este trabajo: se describe el análisis modal experimental. Los puntos anteriores sirven de base para este mismo. Se presentan los pasos que se llevan a cabo en la realización de un test de análisis modal. Estos conllevan desde la preparación del test hasta la validación del modelo obtenido, pasando entre estas etapas por los métodos de extracción de los parámetros modales. Se describen las variables a tener en cuenta antes del ensayo para evitar errores importantes, distintos métodos de extracción de los parámetros modales, modos de realizar las primeras validaciones...

En el siguiente capítulo, el sexto, se realiza un análisis teórico y experimental de una estructura. En este capítulo se presenta una aplicación real de la teoría vista a un sistema dinámico.

La estructura escogida es una barra de sección rectangular. En los primeros puntos se obtienen las soluciones analíticas, mediante la aplicación de la teoría de resistencia de materiales primero y mediante cálculo matricial después. Para realizar la parte experimental, se necesita un medio para excitar la estructura. Se han escogido dos medios, enriqueciéndose así el estudio. Primero se excita a la estructura mediante un martillo instrumentado (impacto). Luego, mediante una mesa vibrante (barrido en frecuencia). Ambos sistemas de excitación conllevan una serie de estudios previos para poder planificar el ensayo de una manera satisfactoria.

En este capítulo se realiza también la validación entre el modelo teórico y los experimentales obtenidos. Finalmente se genera un modelo numérico con la información obtenida de la experimentación, con la finalidad de tener un modelo para estudios posteriores más semejante al comportamiento real que el primero que se obtuvo.

En los distintos anexos que siguen a los capítulos presentados, se recoge distinta información y cálculos usados en el planteamiento y realización de la aplicación práctica.