

Análisis Modal Experimental de Estructuras Laminares

PROYECTO FIN DE CARRERA REALIZADO POR
OMAR GÓMEZ DÍAZ

TUTORIZADO POR
RUTH GUTIÉRREZ FERNÁNDEZ

Laboratorio de Ingeniería Mecánica



Universidad de A Coruña-Escuela Politécnica Superior

- Introducción
- Objetivos
- Análisis Teórico de Vibraciones
- Análisis Modal Experimental
- Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares {
 - Lámina Rectangular de Acero
 - Guardabarros Laminar
- Conclusiones

□ **Introducción**

□ Objetivos

□ Análisis Teórico de Vibraciones

□ Análisis Modal Experimental

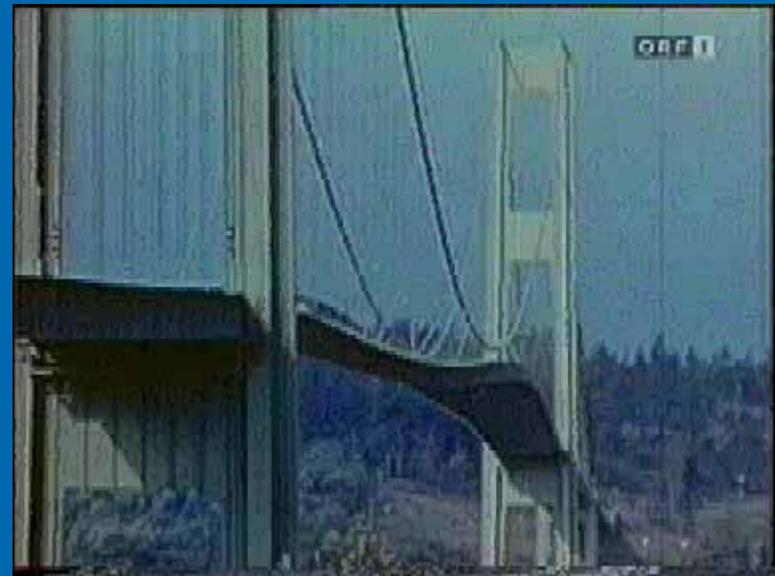
□ Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares

□ Conclusiones

Introducción (I)

- ❑ La **integridad de una estructura** vendrá dada, en algunas ocasiones, por su **respuesta dinámica**
- ❑ Cargas dinámicas menores a la carga crítica estática pueden ocasionar el fallo de la estructura

- ❑ Fallo Estructural:
Colapso del Sistema
debido a **acciones del viento**



Desplome del Puente de Tacoma (Washintong), 7 Noviembre de 1940

Introducción (II)

- Fallo Estructural: **Colapso del sistema** debido a **acciones sísmicas**



Terremoto de Kobe —Japón—, 17 de Enero de 1995

Introducción (III)

- ❑ Fallo estructural: Incumplimiento de las **condiciones de servicio**. Concepto de confort



Análisis de vibraciones de Airbus A340. Onera France (Office national d'etudes et de recherches aerospaciales)



Análisis de vibraciones de un automóvil. Navcar Engineering Network. California

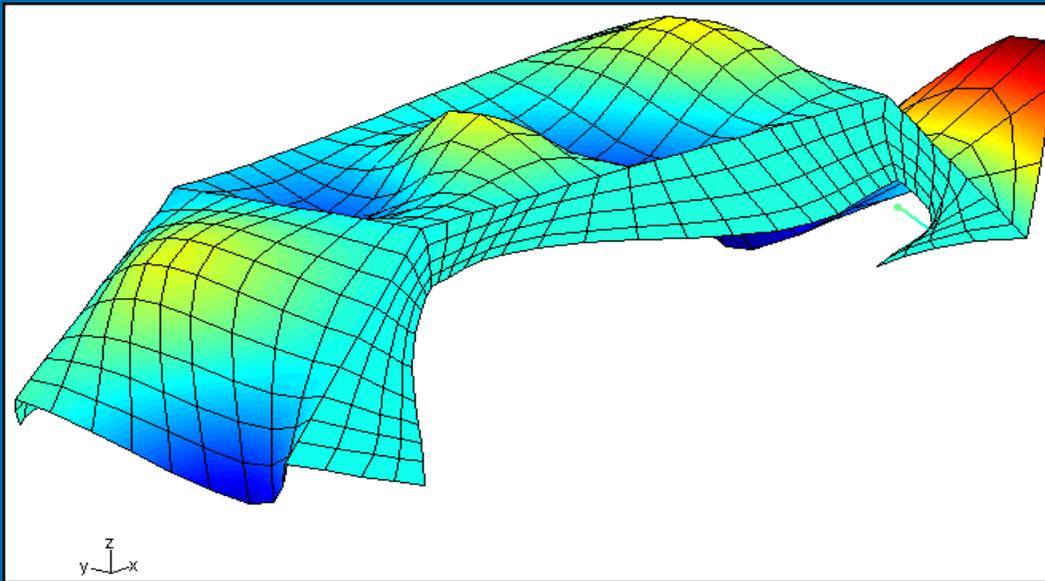
Introducción (IV)

- Una **herramienta** para buscar **soluciones eficientes** a los problemas presentados:
 - **Análisis Modal Experimental**: Proceso Teórico-Experimental por el cual se obtienen las propiedades dinámicas de un sistema real
- Proceso usado en la industria en el diseño de sistemas mecánicos y estructurales
- Trabajo previo en el LIM:
 - Análisis Modal Experimental de sistemas estructurales de barras: [U. Lugo. 2003]

- Introducción
- **Objetivos**
- Análisis Teórico de Vibraciones
- Análisis Modal Experimental
- Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares
- Conclusiones

Objetivos (I)

- Afrontar el proceso de Análisis Modal Experimental de sistemas laminares complejos con deformaciones en tres dimensiones



Modo de deformación obtenido para un guardabarros laminar perteneciente a un grupo electrógeno

Objetivos (II)

- Ajuste del equipo de medida disponible en el LIM abordar el análisis de estructuras laminares
 - Rangos frecuenciales estrechos
 - Frecuencias naturales bajas
- Análisis de dos estructuras laminares
 - Lámina rectangular
 - Guardabarros Laminar de grupo electrógeno
- Generación y validación de modelos numéricos de elementos finitos

- Introducción
- Objetivos
- **Análisis Teórico de Vibraciones**
- Análisis Modal Experimental
- Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares
- Conclusiones

Análisis Teórico de Vibraciones (I)

□ Ecuación general del movimiento para un NDOF:

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = f(t)$$

donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ constituyen las matrices de masas, amortiguamientos y rigideces; las cuales dan forma a la ecuación del movimiento.

□ En el Análisis de Vibraciones:

- Modelo Espacial
- Modelo Modal
- Modelo de Respuesta

Análisis Teórico de Vibraciones (II)

□ **Modelo espacial:** $[M]$, $[C]$, $[K]$

$$\{X\} = ([K] - \omega^2[M])^{-1} \{F\}$$

□ **Modelo Modal:** frecuencias naturales y modos de deformación solución al problema de autovalores

$$[\bar{\omega}^2], [\Phi]$$

□ **Modelo de Respuesta:** matriz de transferencia

- La matriz $H(\omega)$ es función de los parámetros modales
- La matriz $H(\omega)$ puede ser determinada experimentalmente

$$\{X\} = H(\omega) \{F\}$$

Análisis Teórico de Vibraciones (III)

□ Pero los sistemas reales son CONTINUOS:

- **MEF:** Permite resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento de un sistema de forma numérica y aproximada, se basa en la **discretización** de un sistema real en un conjunto de elementos interconectados en los nudos

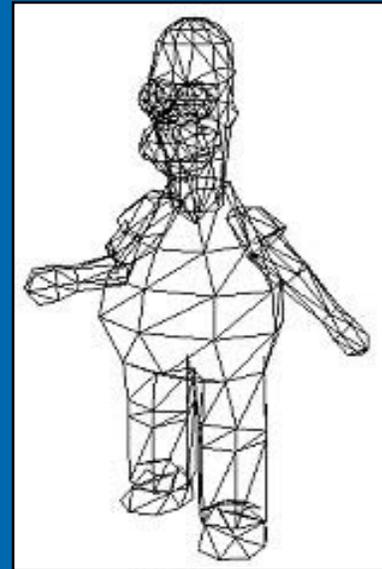
Sistema continuo



MEF



Sistema discretizado



- Introducción
- Objetivos
- Análisis Teórico de Vibraciones
- **Análisis Modal Experimental**
- Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares
- Conclusiones

Análisis Modal Experimental (I)

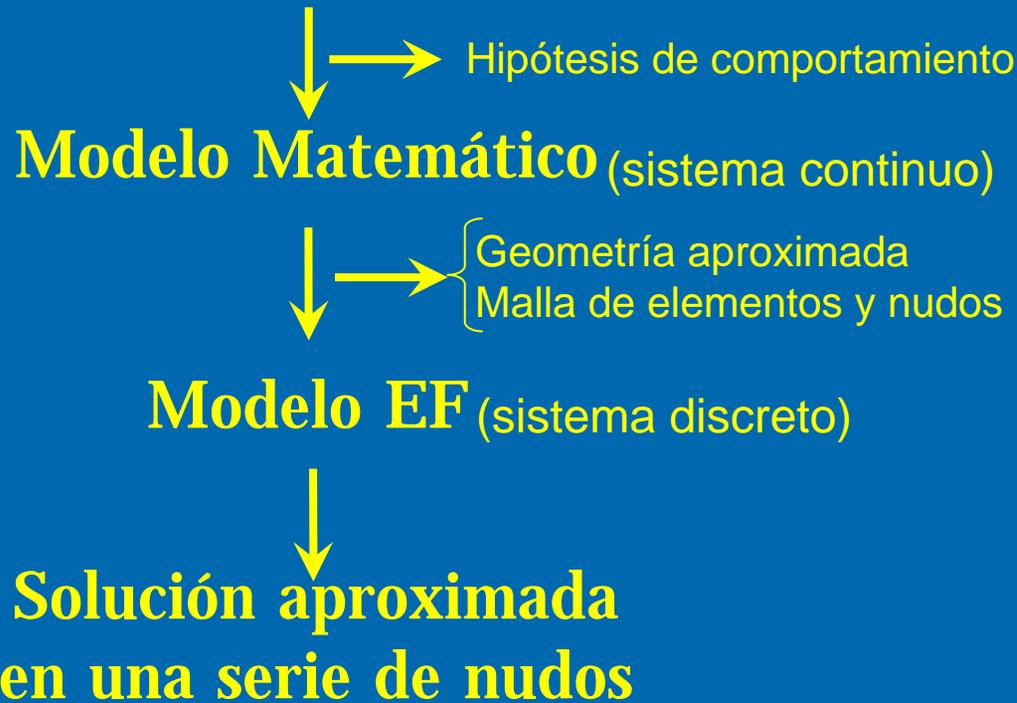
- El **Comportamiento Dinámico** de una Estructura queda totalmente definido por el **Modelo Modal**
 - Modelo Numérico (MEF) → **Modelo Modal Numérico ?**
 - Ensayos Experimentales → **Modelo Modal Experimental**
 - Correlación de Modelos Modales
 - Correlación en frecuencias
 - Correlación de modos de deformación } **Validación**

- Queda determinada la **respuesta dinámica** del sistema; **validado** el **Modelo Numérico**; y determinados los **parámetros disipativos** del sistema que inicialmente son desconocidos y de difícil estimación

Análisis Modal Experimental (II)

- ❑ Necesidad de validar Modelos Numéricos

Sistema Real



- ❑ Necesidad de conocer los modos de disipación de energía del sistema

- Amortiguamiento inicialmente desconocido, de difícil estimación

NECESIDAD DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

- En ocasiones, se desprecia el amortiguamiento para el modelo numérico

Análisis Modal Experimental (III)

- Proceso Global de Análisis Modal Experimental
 - Generación Modelo Numérico: **Modelo Modal Numérico**
 - Definición de un modelo de test para los ensayos
 - Proceso Experimental: FRF
 - Ajuste de Curvas: **Modelo Modal Experimental**
 - **Correlación**

Análisis Modal Experimental (IV)

□ **Modelo Numérico (MEF):**
$$([K] - \omega^2 [M]) \{X\} = 0$$

- La solución al problema de autovalores:

$$[\bar{\omega}^2], [\Phi]$$

MODELO MODAL NUMÉRICO A VALIDAR

- Definición de un modelo reducido que será el **Modelo de Test** para los ensayos

- Resultados numéricos → Definición de un número reducido de puntos de test

Análisis Modal Experimental (V)

- Análisis de Fourier → **FRF** para el rango frecuencial de ensayo
- Método de los Residuos → Ajuste de curvas
 - Se obtienen funciones analíticas que se ajustan a los datos experimentales:

$$\underline{\alpha}_{jk}(\omega) \cong -\frac{1}{\omega^2 M_{jk}^R} + \sum_{r=m1}^{m2} \frac{{}_r A_{jk}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + i\eta_r \omega_r^2} + \frac{1}{K_{jk}^R}$$

Análisis Modal Experimental (VI)

- Obtención de **modos de deformación** a partir de las constantes modales obtenidas ${}_r A_{jk}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{kr} = \sqrt{{}_r A_{kk}} \\ \phi_{jr} = \frac{{}_r A_{jk}}{\phi_{kr}} \end{array} \right\} ; r = 1, \dots, m ; j, k = 1, \dots, n$$

- r : número de modos asociados al rango frecuencial del ensayo
- j y k : DOF de respuesta y excitación

Análisis Modal Experimental (VII)

- Reducción del modelo numérico para establecer la correlación entre Modelo Modal Numérico y experimental
- **Correlación**
 - Correlación en frecuencias naturales
 - Correlación en modos de deformación:

$$MAC(N, X) = \frac{\left| \sum_{j=1}^N (\phi_N)_j (\phi_X)_j^* \right|}{\left(\sum_{j=1}^N (\phi_X)_j (\phi_X)_j^* \right) \left(\sum_{j=1}^N (\phi_N)_j (\phi_N)_j^* \right)}$$

- Introducción
- Objetivos
- Análisis Teórico de Vibraciones
- Análisis Modal Experimental
- **Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares**
- Conclusiones

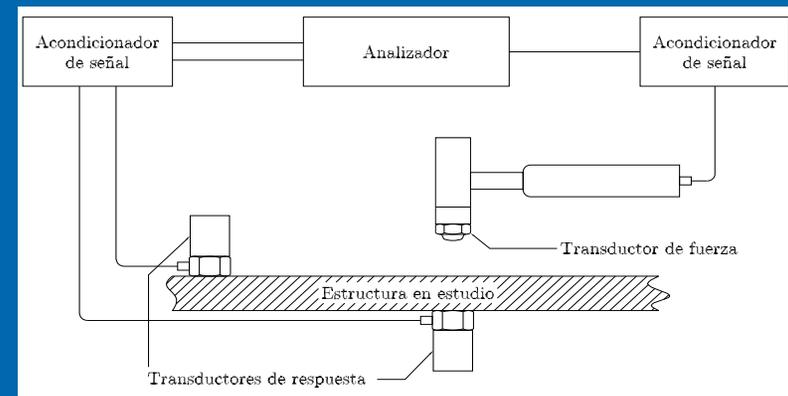
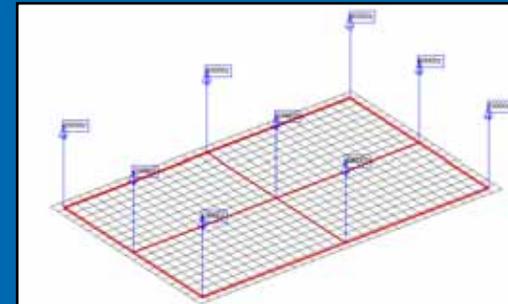
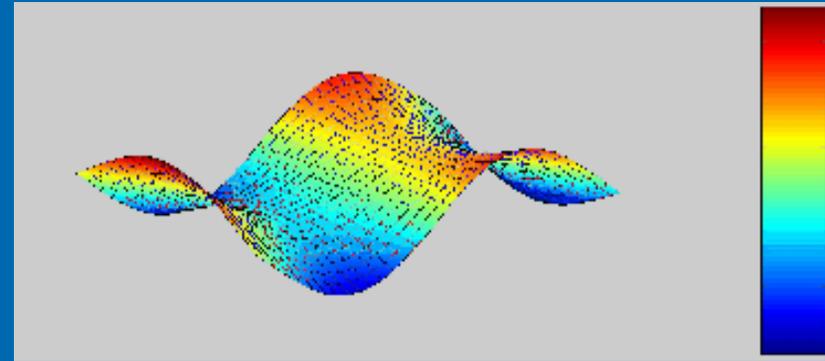
Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares (I)

□ Lámina Rectangular de Acero

- **Modelo Modal Numérico**

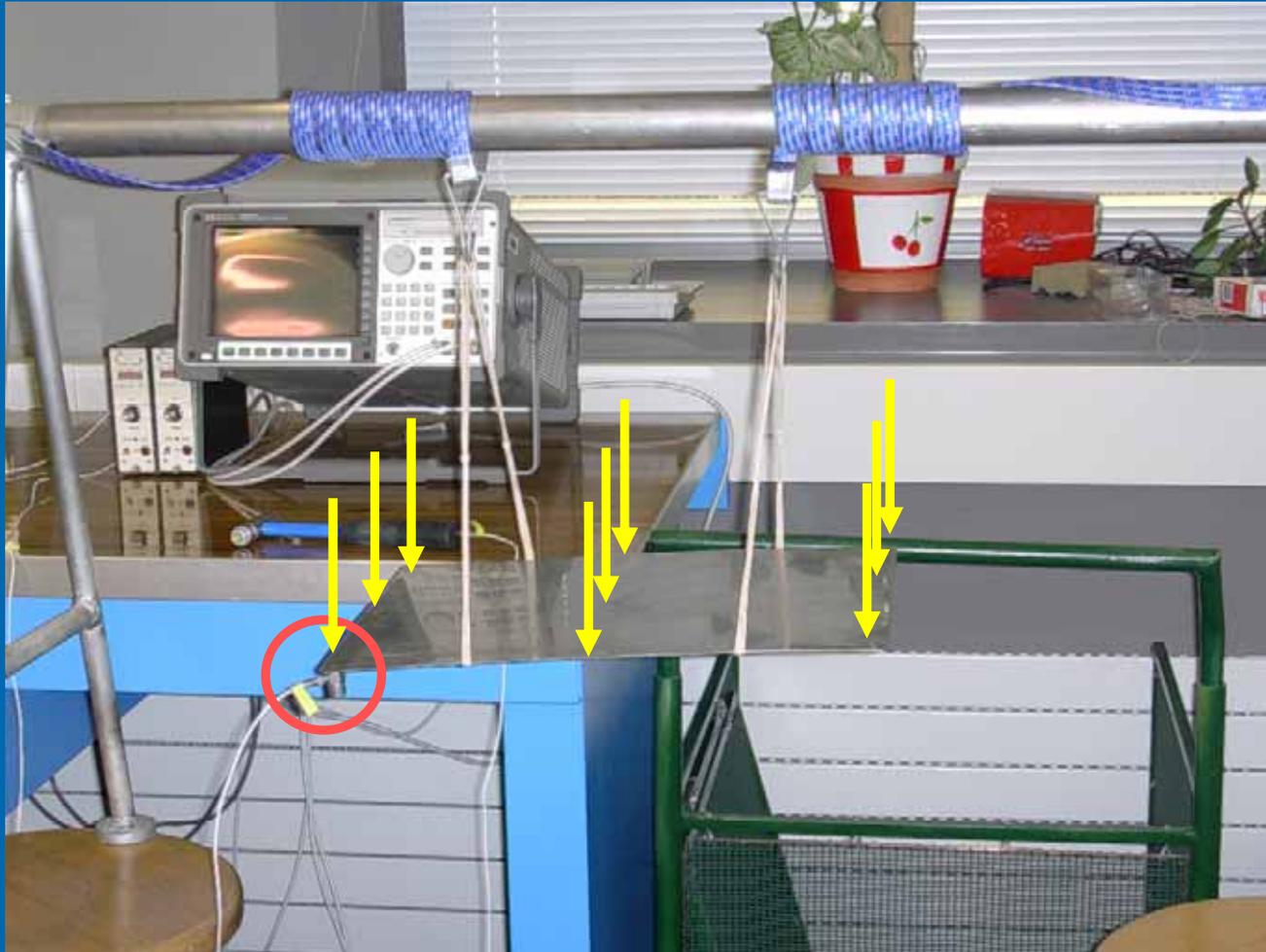
- **Modelo de Test:** definido a partir de los resultados numéricos

- Esquema general de un sistema de obtención de medidas experimentales



Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares (II)

- Montaje Experimental



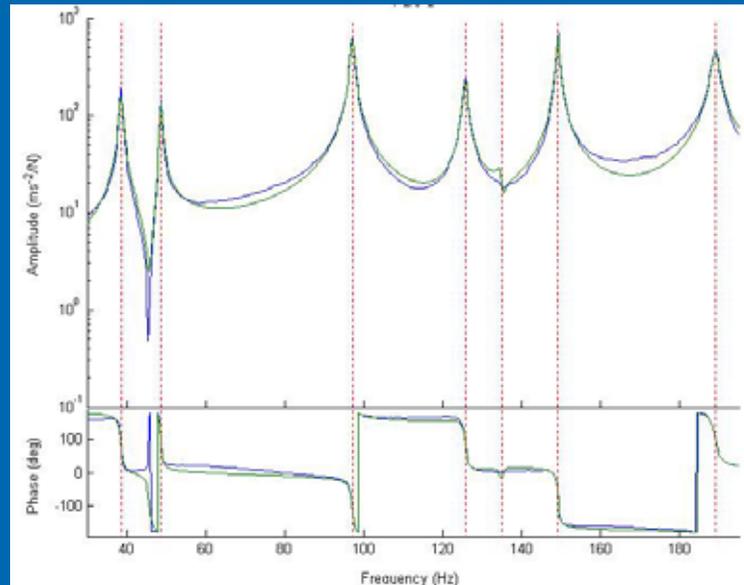
Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares (III)

- Obtención de curvas **FRF**: se golpea en el grado de libertad k y se mide la respuesta en el grado de libertad j , obteniendo así:

$$H_{jk}(\omega)$$

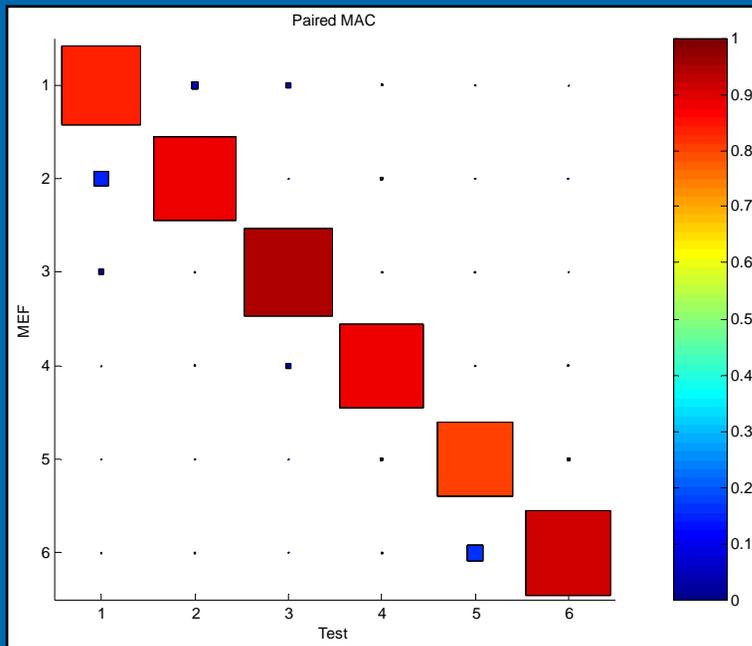
- De esta forma se van obteniendo componentes de la matriz de transferencia experimental

- Ajuste de curvas, curvas analíticas obtenidas

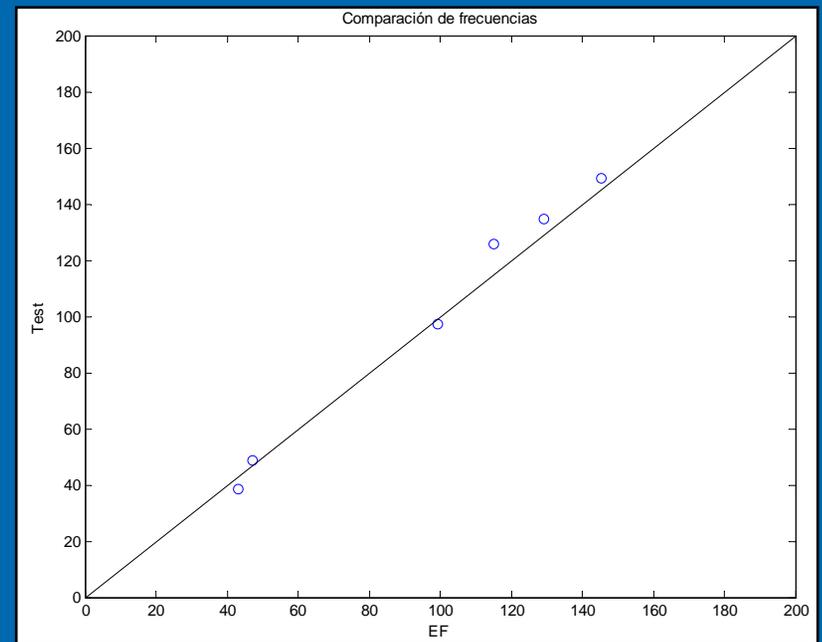


Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares (IV)

- Obtención de **modos de deformación** experimentales
- Preparación del modelo modal numérico para la **correlación** de modelos modales



Correlación en Modos de Deformación

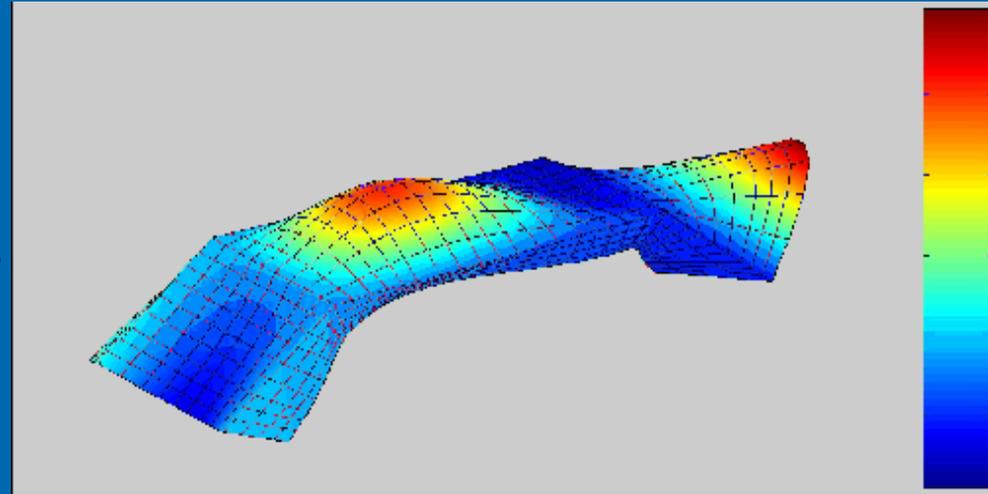


Correlación en Frecuencias

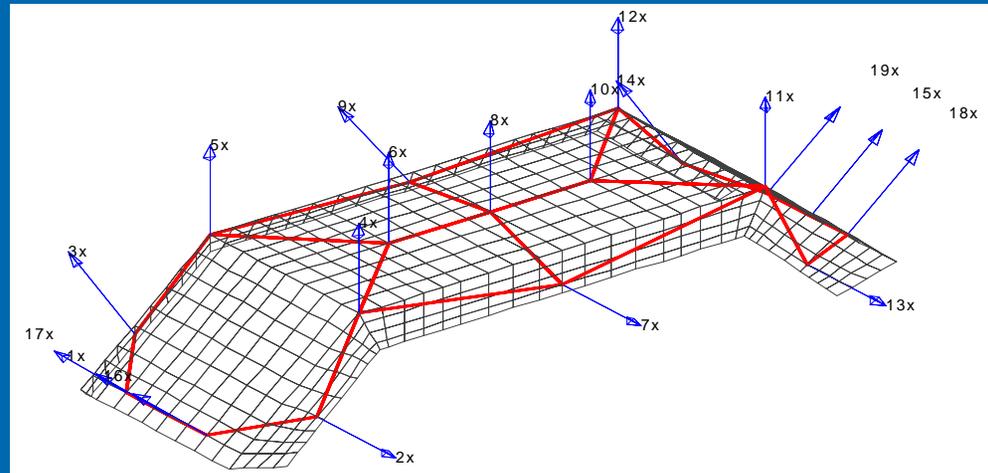
Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares (V)

□ Guardabarros Laminar perteneciente a grupo electrógeno

• **Modelo Modal Numérico**

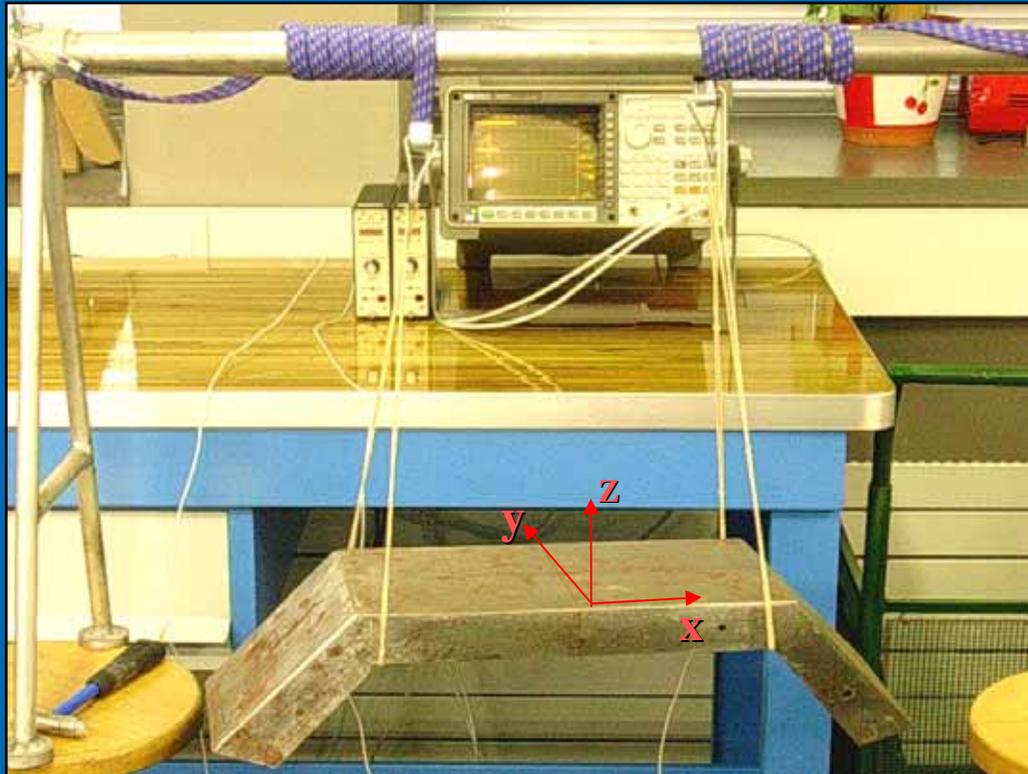


• **Modelo de Test**



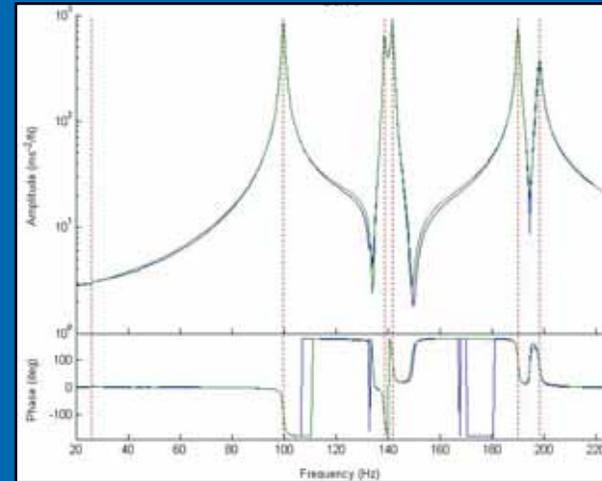
Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares (VI)

- Montaje Experimental



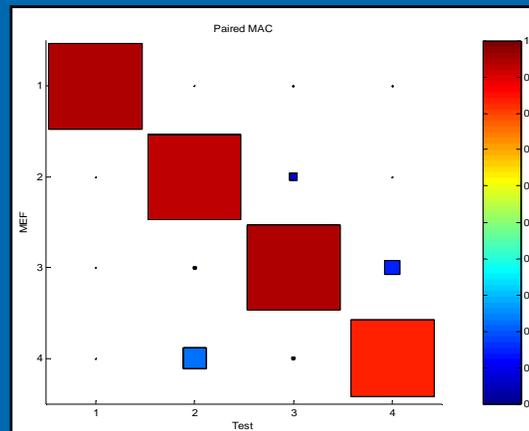
Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares (VII)

- Obtención de curvas **FRF**

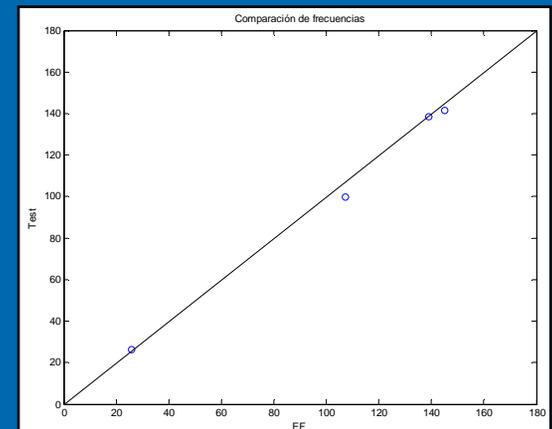


- Obtención de los **modos de deformación experimentales**

- **Correlación**



Correlación en Modos de Deformación



Correlación en Frecuencias

- Introducción
- Objetivos
- Análisis Teórico de Vibraciones
- Análisis Modal Experimental
- Análisis Dinámico de dos Sistemas Laminares
- **Conclusiones**

Trabajo realizado:

- Elaboración de modelos en CAD de las estructuras para apoyarse en estos en la generación de malla y geometría de los modelos de elementos finitos
- Generación de geometrías y mallado de superficies mediante la herramienta Structural Dynamic Toolbox (SDT) para el entorno de MATLAB
- Selección de un conjunto reducido de puntos del sistema que defina un modelo de test válido para el rango frecuencial del ensayo
- Obtención de frecuencias naturales y modos de deformación experimentales a partir del ajuste de curvas
- Cálculo de funciones de correlación para la validación de los modelos modales numéricos

Conclusiones (II)

Todo ello ha permitido:

- Desarrollo de la aplicación de un método para la obtención del **movimiento** de un sistema ante **cargas dinámicas**
- Se han desarrollado las metodologías a seguir para la **validación** de **modelos numéricos** de **estructuras laminares** generados mediante MEF
- **Anteriormente**, se había llevado a cabo en el LIM Análisis Modal Experimental en **sistemas de barras** [U. Lugués. 2003], abordar el análisis para sistemas laminares es complejo
- Los resultados obtenidos permiten **validar** los **modelos numéricos** de las dos estructuras objeto de estudio
- Queda **resuelta** la **respuesta dinámica** de ambas estructuras ante una excitación de tipo general