

ENTREGABLE 2.2

PROYECTOS—

2024-2025

Estudio tensional de componentes metálicos mediante sensores piezoeléctricos por impedancia

“PIEZO”

Entregable: 2.2. Informe publicable de resultados.

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas

Referencia proyecto en AIDIMME: 22400051

Expediente: IMDEEA/2024/73

Duración: Del 01/06/2024 al 31/10/2025

Coordinado en AIDIMME por: Rubén Niñerola González

Contenido

1	<u>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO</u>	<u>2</u>
1.1	EMPRESAS COLABORADORAS.....	3
2	<u>ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO Y CONCLUSIONES.....</u>	<u>4</u>
2.1	SELECCIÓN Y DISEÑO DE LOS COMPONENTES A ANALIZAR EN AIDIMME.....	5
2.1.1	BASES DE COLUMNA CON RIGIDIZADORES.....	5
2.1.2	UNIONES DE PLACA CON COLISOS (UNIONES MODULARES).	6
2.2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO UTILIZADO	9
2.2.1	DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO UTILIZADAS	9
2.2.2	CARGAS E HIPÓTESIS DE CARGA.	10
2.3	DETECCIÓN DE PERDIDA DE PAR MEDIANTE EMI.....	19
2.4	DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL MONTAJE Y CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL.....	20
2.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE PAR MEDIANTE IMPEDANCIA ELECTROMECÁNICA ANALIZANDO LA SEÑAL DE FASE.....	26
2.6	DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE COMPARACIÓN	27
2.7	ANÁLISIS DETALLADO DEL SENSOR PZT 1 (UBICACIÓN PERIFÉRICA)	28
2.8	ANÁLISIS DETALLADO DEL SENSOR PZT 2 (UBICACIÓN CENTRAL)	29
2.9	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE PAR MEDIANTE IMPEDANCIA ELECTROMECÁNICA ANALIZANDO LA SEÑAL DE FASE. RMSD MODIFICADO.	31
2.10	COMPARATIVA GLOBAL DE LOS MODELOS	34
2.11	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE PAR MEDIANTE IMPEDANCIA ELECTROMECÁNICA ANALIZANDO LA SEÑAL REAL DE IMPEDANCIA. RMSD TRADICIONAL.	35
2.12	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE PAR MEDIANTE IMPEDANCIA ELECTROMECÁNICA ANALIZANDO LA SEÑAL REAL DE IMPEDANCIA. RMSD MODIFICADO. PERDIDAS DE PAR GENERALES.....	40
3	<u>VALIDACIÓN LAS EMPRESAS COLABORADORAS.....</u>	<u>44</u>

1 Introducción y objetivos del proyecto

El presente proyecto se enmarca en el desarrollo tecnológico asociado a la monitorización de la salud estructural de diversos componentes, y en particular de estructuras metálicas, que requieren de un control minucioso y detallado que pueda ser empleado dentro del sistema de mantenimiento predictivo. Un estado de funcionamiento a lo largo del tiempo requiere de garantía de que su rendimiento permanece conforme a especificaciones durante todo su ciclo de vida. Los sistemas atornillados son empleados en diversos sectores debido a su versatilidad y es notable la importancia de su óptimo funcionamiento para garantizar así que su rendimiento permanece conforme a sus especificaciones durante todo su ciclo de vida.

Por otro lado, el desarrollo de sensores capaces de entregar información en tiempo real de estructuras de compromiso requiere de inversiones importantes que en muchas ocasiones no son asumibles, y es precisamente dentro de este marco donde los nuevos sensores y sistemas de detección novedosos comienzan a desarrollarse con el objetivo de satisfacer esta necesidad. La puesta a punto y desarrollo de sensores piezoeléctricos los cuales pueden interpretar una respuesta de la estructura mediante la medición de la impedancia electromecánica marcan un camino a explorar que puede permitir a la industria la posibilidad de lograr una monitorización global con un coste menor en comparación con los sistemas actuales. La eficacia de estos sistemas depende en gran medida de la capacidad dinámica de la propia estructura a analizar, de lo que se desprende que el empleo de estos sistemas requiere de pruebas de validación y/o calibración de los sensores.

La monitorización estructural puede desarrollarse de forma global o centrarse en zonas de mayor compromiso, como puedan ser las zonas donde se hayan sistemas de uniones mecánicas, donde la pérdida de par de apriete puede poner en riesgo cualquier estructura. La manera de asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de fijación se basa en la transmisión de tensión de carga sobre los vástagos. Este hecho resulta complicado debido a las particularidades de las uniones atornilladas, en las que no existe una relación directa entre par de apriete y tensión del vástago. Factores como los materiales involucrados, la geometría, los coeficientes de fricción estático y dinámico, la presencia de cuerpos extraños en la zona de unión o el método o sistemática de apriete puede afectar de manera importante a la relación entre par de apriete y tensión final real del vástago.

Las actividades llevadas a cabo en el presente proyecto buscan determinar a través de

diversas configuraciones de componentes mecánicos y sus sistemas de unión la respuesta y validación de sensores basados en la medición de la impedancia electromecánica, los cuales serán comparados con los sensores que actualmente nos encontramos en el mercado con técnicas más consolidadas, pero que tiene un coste elevado que hacen inviable la sensorización de gran parte de las estructuras.

Actividad de I+D de carácter no económico

Las tareas incluidas en el presente proyecto se clasifican como “actividad de carácter no económico” en base al apartado tercero del Marco Comunitario sobre Ayudas Estatales de I+D+I, 2006/C323/01.

De acuerdo con lo establecido en el mencionado Marco Comunitario, AIDIMME distingue con claridad entre actividad económica y actividad no económica, y entre sus respectivos costes y financiación. Además, las actividades del proyecto, tal y como indica el Marco Comunitario:

- Suponen un aprendizaje y mejora en la cualificación del equipo investigador que se encuentran trabajando en el proyecto;
- Mejora los conocimientos y la comprensión de la línea de investigación donde se incluye el proyecto;
- El proyecto lleva asociadas unas acciones de difusión las cuales son abiertas y accesibles para el entorno empresarial;
- La transferencia tecnológica derivada de los resultados del proyecto no es de carácter económico, y en caso de llegar a serlo (patentes, concesión de licencias, etc.) cualquier ingreso generado volvería a emplearse en actividades de I+D de carácter no económico del centro.

1.1 Empresas colaboradoras

Las empresas colaboradoras en el proyecto son:

KAMAX SLU

FACTOR INGENIERIA Y DECOLETAJE, S. L.

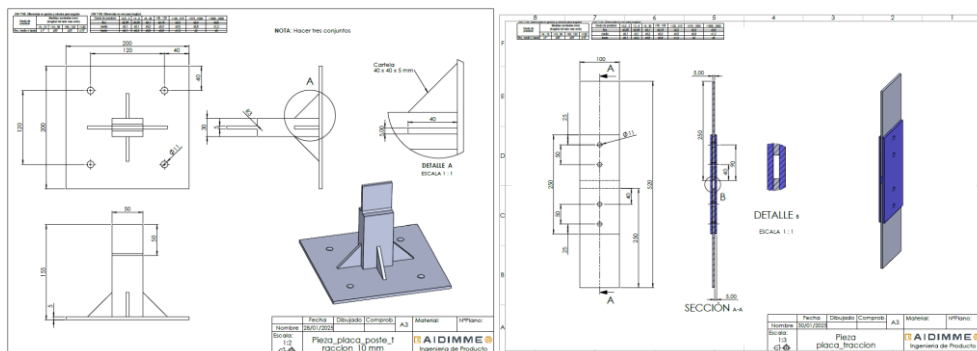
TSV TECNOLOGÍA SEGURIDAD VIAL S.L.

2 Actividades realizadas, desarrollo del proyecto y conclusiones.

Con lo que respecta a la parte técnica el desarrollo del proyecto ha consistido en la calibración y validación de los sensores en base a estructuras tipo previamente definidas con interés en el ámbito industrial. Como puntos importantes destacamos las siguientes tareas:

- El trabajo técnico se inicia con la definición de los sistemas tipo y plan de experiencias. Los componentes tipo metálicos han sido diseñados para asemejarse a componentes reales y con las casuísticas de la industria, como conexiones de pilares estructurales de acero o uniones atornilladas.
- Se ha llevado a cabo un estudio de simulación de carga mediante FEM, un análisis detallado para evaluar la integridad y el comportamiento de las estructuras tipo. Modelado de la geometría, condiciones de contorno, estado tensional inicial, y la simulación de conjuntos de cargas que representen escenarios de utilización (incluyendo fuerzas como el viento).
- Los datos obtenidos mediante los sensores en el laboratorio se han comparado con los resultados del análisis FEM para verificar la precisión del modelo matemático, lo que permite representar virtualmente los elementos físicos.
- Construcción y optimización de los sensores a nivel de laboratorio a través de componentes tipo
- Desarrollo de sensores para la detección de las variaciones del par de apriete en banco de ensayo.
- Estudios preliminares para la calibración del banco de ensayos utilizando principalmente sensores piezoeléctricos y la medición del sistema de impedancia electromecánica
- Se desarrolla y se realiza la Investigación, correlación y validación de los nuevos sensores en estructuras tipo. Se busca que los dispositivos desarrollados sean capaces de medir parámetros críticos como pares de apriete.
- Para validar su efectividad, los dispositivos basados en tecnología de impedancia electromecánica (una técnica apropiada para la vigilancia estructural temprana) son comparados con sistemas más convencionales y de mayor coste/precisión, como los sensores basados en galgas extensométricas.
- Validación sobre estructuras reales de colaboradores

2.1 Selección y diseño de los componentes a analizar en AIDIMME



De las diferentes casuísticas y tras las diversas conversaciones con colaboradores se llevan a cabo unos diseños de componentes para ser fabricados durante el proyecto y poder realizar el plan de experiencias.

2.1.1 Bases de Columna con Rigidizadores

Este componente representa una placa base de anclaje diseñada para unir una columna (típicamente un perfil de acero, como el perfil I o H) a una cimentación de hormigón, con la placa base que es la pieza que transfiere las cargas del poste a la cimentación, anclada mediante pernos, y poste rigidizado o cartelas soldados entre el alma del poste y la placa base. Estos elementos aumentan la rigidez a flexión de la unión poste-placa. La inclusión de esta base rigidizada es fundamental porque maximiza los desafíos de la monitorización en entornos dinámicos, ya que las estructuras altas generan grandes momentos flectores en la base debido a las cargas de viento, succión aerodinámica del tráfico, y las vibraciones. La rigidez añadida por las cartelas reduce la deformación en el poste, concentrando la deformación y la tensión en la propia placa base y los pernos de anclaje.

En una unión rigidizada, el fallo más probable no es la flexión del poste, sino la pérdida de precarga de los pernos de anclaje debido al efecto de fatiga por vibración, un sensor PZT colocado en la placa base rigidizada se convierte en un monitor sensible de la rigidez de la interfaz. Cualquier reducción en la tensión axial de los pernos se traduce inmediatamente en una disminución de la rigidez de la unión, lo que modula la

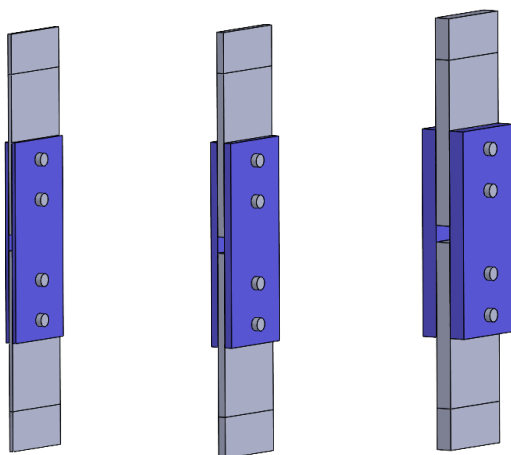
impedancia eléctrica.

2.1.2 Uniones de Placa con Colisos (Uniones Modulares).

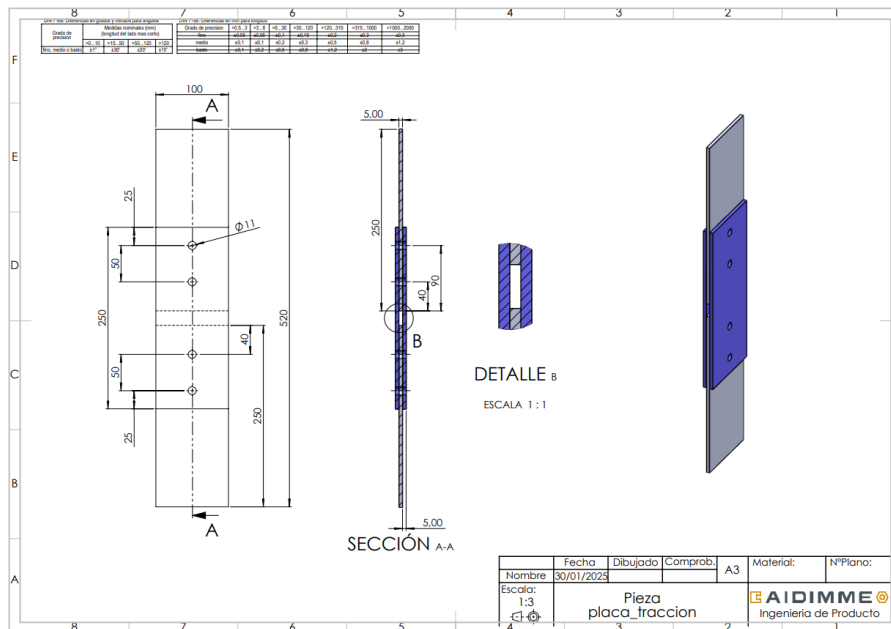
El componente muestra una unión atornillada a tracción/cortante entre dos perfiles planos o de alma. La característica más notable para el estudio son las holguras de montaje o colisos (mecanizaciones amplias o agujeros ovalados) indicadas en el detalle del plano de la placa. El diseño incorpora colisos para permitir una libertad de movimientos durante el montaje. Esto facilita la tolerancia de fabricación, el ajuste angular o la alineación de componentes prefabricados en obra. En este escenario si el par de apriete se pierde, la unión comienza a transferir carga por apoyo (contacto directo del perno con el borde del agujero), permitiendo movimientos indeseados. La presencia de colisos crea un escenario de riesgo máximo para el aflojamiento auto-inducido. La holgura proporciona un espacio libre que, bajo cargas dinámicas (vibraciones), facilita el deslizamiento cíclico de las placas. Este movimiento lateral cizalla el perno provoca la rotación infinitesimal de la tuerca y la pérdida de precarga. El sensor PZT colocado estratégicamente cerca del coliso sería ideal para detectar la transición de la rigidez por fricción a la rigidez por apoyo.

Se ha realizado un análisis de los diferentes componentes que forman los conjuntos seleccionados en un cálculo de conjunto, de forma que se ha podido caracterizar mejor la transmisión de esfuerzos entre los diferentes componentes. En el cálculo se han tenido en cuenta 3 tipos de espesores para cada componente.

-Conjunto placa tracción en 3 espesores

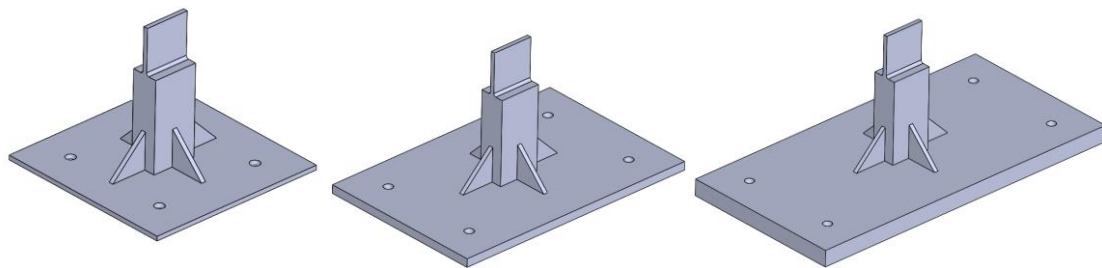


Espesores de 5, 10 y de 20 mm

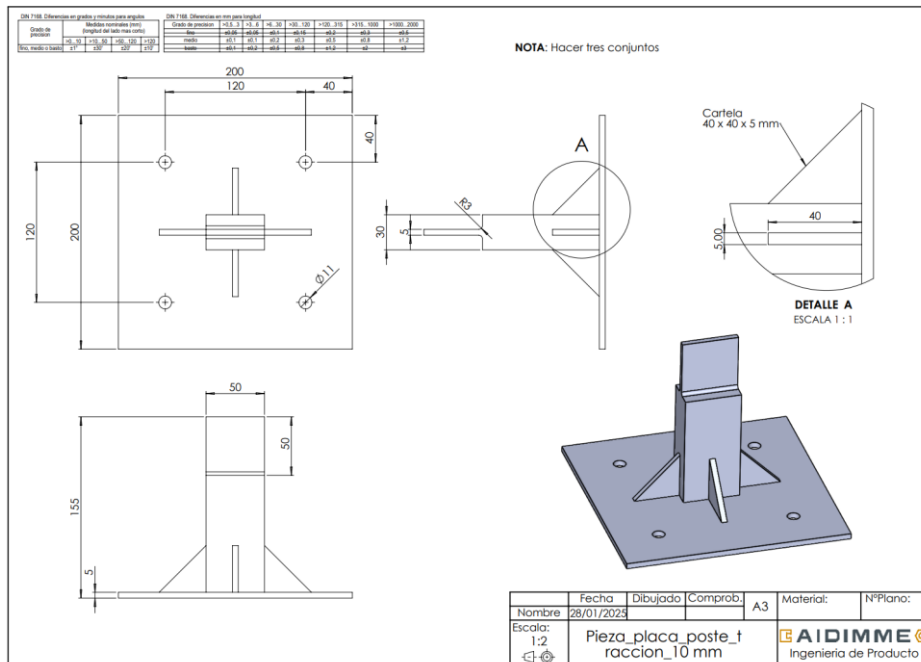


Plano 2D

-Conjunto poste de tracción en 3 tamaños de placas y espesores



Modelo CAD 3D. Espesores de 5, 10 y de 20 mm



Plano 2D

Para la realización de los distintos cálculos se ha utilizado el método de los elementos finitos. Las hipótesis de análisis, los modelos utilizados, materiales, condiciones de contorno, serán descritas en este apartado.

Las hipótesis de cálculo utilizadas se basan en un empleo de un análisis de comportamiento del material no lineal, condiciones de contorno no lineales y grandes desplazamientos. En cuanto al análisis de tensiones estático, este ha sido en base a un comportamiento del material isótropo y homogéneo. Los criterios de fallo utilizados para la obtención de tensiones de comparación serán descritos posteriormente.

La carga de tracción que se ha aplicado es la misma que en los ensayos posteriores de 5KN, y con un par de apriete de 60Nm por tornillo, como par máximo. Se han realizado varios casos de carga variando el par de apriete en los tornillos. Los casos de carga y modelos utilizados:

Del conjunto placa de traccion se han utilizado las siguiente configuraciones para las simulaciones:

1-Placa traccion 5 mm de espesor y aplicando el 100% de par de apriete en los cuatro tornillos.

2-Placa traccion 5 mm de espesor y aplicando el 100% de par de apriete en tres tornillos y el 80% en el otro.

3-Placa traccion 5 mm de espesor y aplicando el 100% de par de apriete en dos tornillos y el 80% en los otros dos.

4-Placa traccion 5 mm de espesor y aplicando el 100% de par de apriete en tres tornillos y el 60% en el otro.

5-Placa traccion 5 mm de espesor y aplicando el 100% de par de apriete en dos tornillos y el 60% en los otros dos.

6-Placa traccion 10 mm de espesor al 100% de par de apriete en el cuatro tornillos.

7-Placa traccion 20 mm de espesor al 100% de par de apriete en el cuatro tornillos.

Del conjunto poste de traccion se han utilizado las siguiente configuraciones para las simulaciones:

1-Poste de tracción, con placa de 200x200 con espesor de 5 mm, con el 100% del par de apriete para los cuatro tornillos.

2-Poste de tracción, con placa de 300x200 con espesor de 10 mm, con el 100% del par de apriete para los cuatro tornillos

3-Poste de tracción, con placa de 400x200 con espesor de 20 mm, con el 100% del par de apriete para los cuatro tornillos

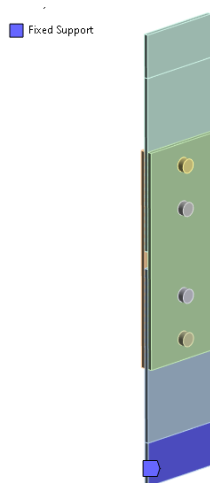
2.2 Descripción del modelo utilizado

Para discretizar las diferentes partes que componen el conjunto, se han utilizado elementos 3-D de alto orden del tipo tetraedro parabólico, los cuales nos permitirán obtener una distribución de tensiones detallada a lo largo de los elementos. Para el estudio de los elementos comentados se ha utilizado el software mediante el método de elementos finitos. El programa considera un comportamiento elástico y no lineal de los materiales. Por indicación de los requerimientos de diseño establecidos por los materiales utilizados y sus características se relatan a continuación.

2.2.1 Descripción de las condiciones de contorno utilizadas

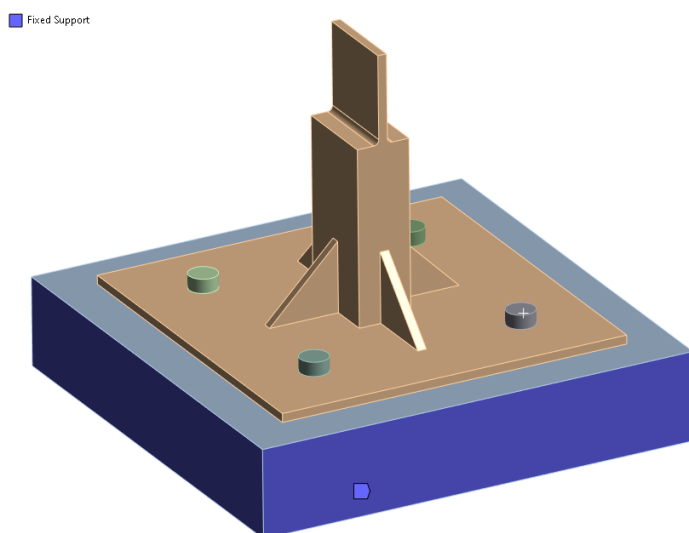
Las restricciones aplicadas que van a estar fijas durante la simulación para las hipótesis estudiadas.

- Se aplica una restricción fija en la chapa inferior.



Modelo placas tracción

- Se aplica una restricción fija de los tornillos con el suelo.



Modelo placas soporte

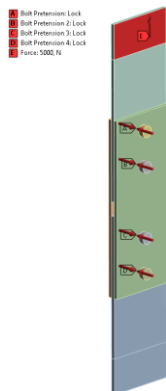
2.2.2 Cargas e hipótesis de carga.

Se han realizado los cálculos siguiendo las indicaciones marcadas por los escenarios más desfavorables. Cargas aplicadas a los modelos estudiados.

Modelo placa de tracción

-Carga de tracción: $F=5\text{KN}$ aplicada en la chapa superior en la dirección de tracción

-Par de apriete: dependerá del modelo estudiado 60 Nm para el 100%, 48 Nm para el 80 % y 36 Nm para el 60%.

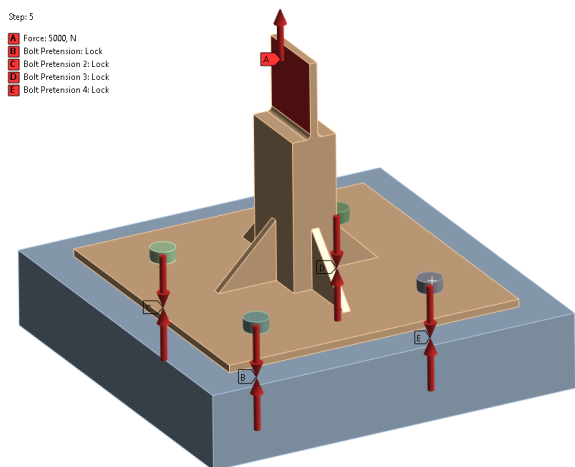


Modelo indicando las fuerzas actuantes

Modelo poste de tracción

-Carga de tracción: $F=5\text{kN}$ aplicada en la chapa superior en la dirección de tracción

-Par de apriete: dependerá del modelo estudiado 60 Nm para el 100 y 36 Nm para el 60%.

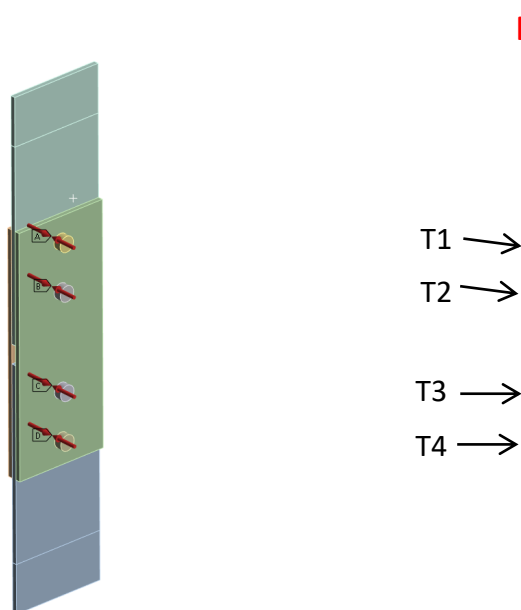


Modelo indicando las fuerzas actuantes

Se muestra a continuación un resumen de los resultados gráficos de los análisis de tensiones y deformaciones realizados. Se recogen, las tensiones equivalentes de VON MISES basadas en las tensiones principales, que nos indican los puntos con mayor probabilidad de ser críticos y que se pueden comparar directamente con el límite

elástico del material, en Newtons por milímetro cuadrado (N/mm^2 ó MPa).

A continuación, se recoge un resumen de las Tensiones Máximas observadas en los distintos elementos estudiados más desfavorables. Para la comparativa de tensiones se ha tomado el límite elástico del material, para el acero estructural con un límite elástico de 250 MPa y para la tornillería con un límite elástico de 640 MPa.



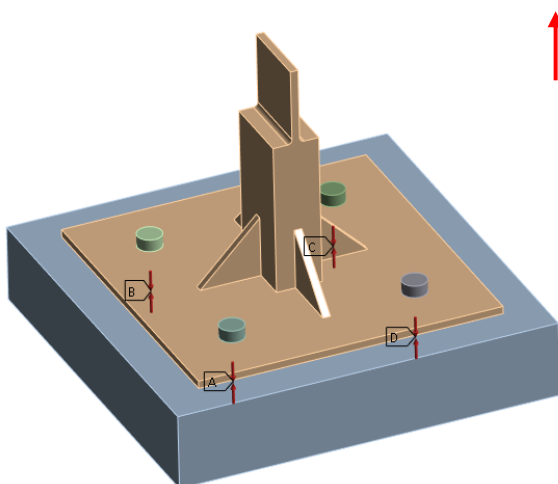
Modelo indicando las fuerzas actuantes

	Tensión de Non Mises (Mpa)				
Modelo placa tracción e=5 mm	T1	T2	T3	T4	Punto Max en Chapa inferior
4 tornillos a 60 Nm	418,7	418,69	418,58	418,51	286
1 tornillo a 36 Nm y 3 tornillos a 60Nm	255,02	417,61	418,54	418,65	287
2 tornillos a 36 Nm y 2 tornillos a 60Nm	253,98	250,32	418,37	418,35	351

	Tensión de Non Mises (Mpa)				
Modelo placa tracción e=10 mm	T1	T2	T3	T4	Punto Max en Chapa inferior

4 tornillos a 60 Nm	413,3	413,1	413,2	413	110,8
---------------------	-------	-------	-------	-----	-------

	Tensión de Non Mises (Mpa)				
Modelo placa tracción e=20 mm	T1	T2	T3	T4	Punto Max en Chapa inferior
4 tornillos a 60 Nm	398,9	396,5	396,2	396,29	85,6



Modelo indicando las fuerzas actuantes

	Tensión de Non Mises (Mpa)				
Modelo Poste de tracción e=5 mm	T1	T2	T3	T4	Punto Max en la base
4 tornillos a 60 Nm	677,9	677,7	677,4	677,6	328
2 tornillo a 36 Nm y 2 Tornillos a 60Nm	411,1	411,3	677,7	677,6	348

	Tensión de Non Mises (Mpa)				
Modelo Poste de tracción e=10 mm	T1	T2	T3	T4	Punto Max en la base
4 tornillos a 60 Nm	631,3	631,2	631,5	631,1	251,3

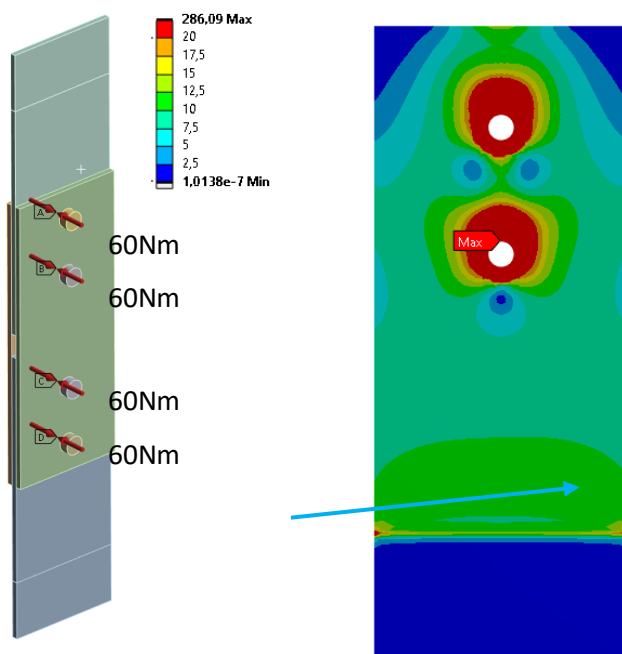
2 tornillo a 36 Nm y 2 Tornillos a 60Nm	418,4	417,9	633,2	632,2	257,2
---	-------	-------	-------	-------	-------

	Tensión de Non Mises (Mpa)				
Modelo Poste de tracción e=20 mm	T1	T2	T3	T4	Punto Max en la base
4 tornillos a 60 Nm	548,4	548,1	547,8	551,8	232

A continuación, se muestran la distribución de tensiones en la placa inferior.

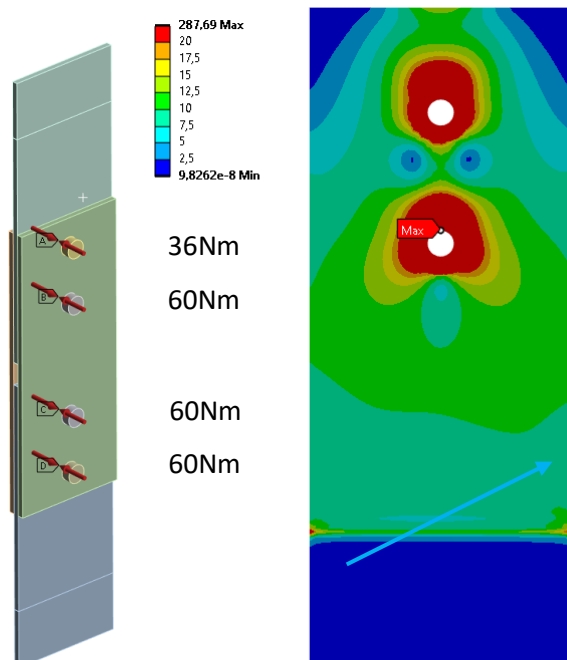
Modelo placa tracción e=5 mm

- Los 4 tornillos a 60Nm.



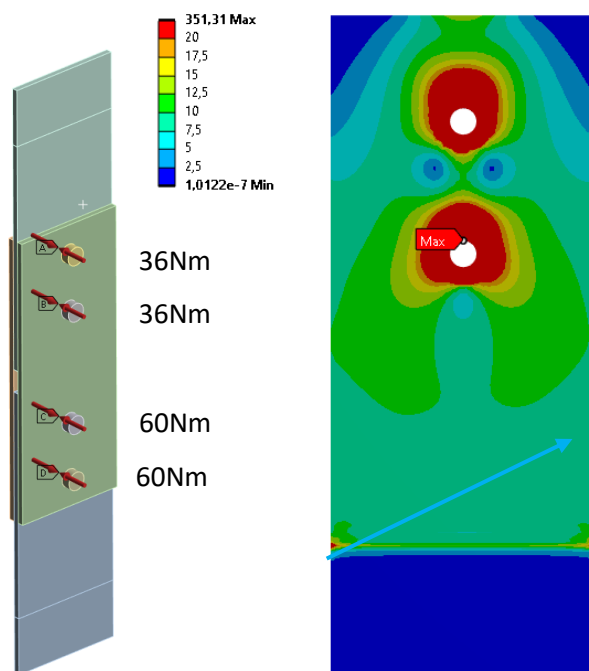
Modelo indicando distribución de tensiones

- 1 tornillo a 36 Nm y 3 tornillos a 60N



Modelo indicando distribución de tensiones

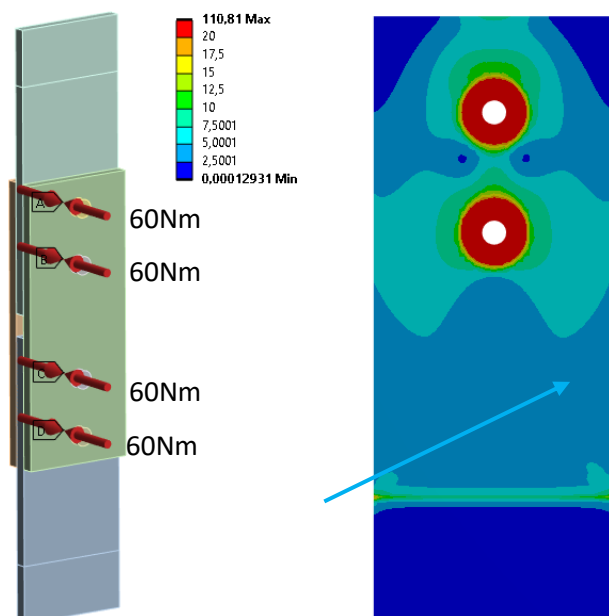
- 2 Tornillo a 36 Nm y 2 Tornillos a 60Nm



Modelo indicando distribución de tensiones

Modelo placa tracción e=10 mm

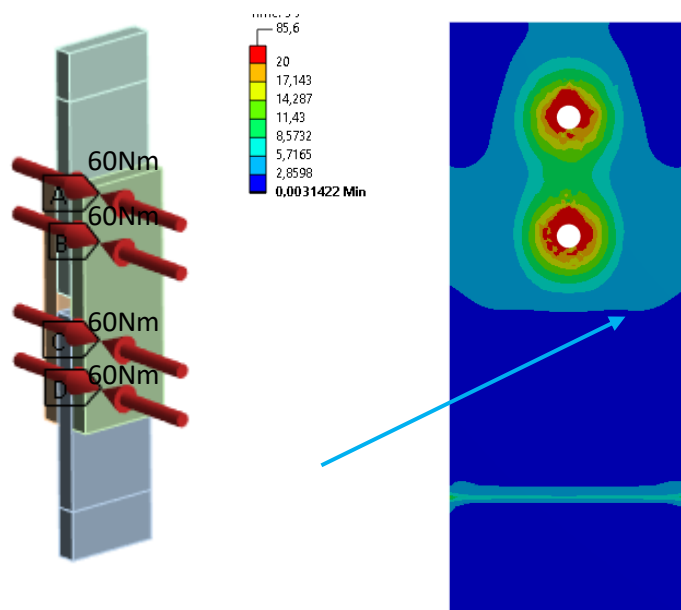
- 4 Tornillos a 60 Nm



Modelo indicando distribución de tensiones

Modelo placa tracción e=20 mm

- 4 Tornillos a 60 Nm

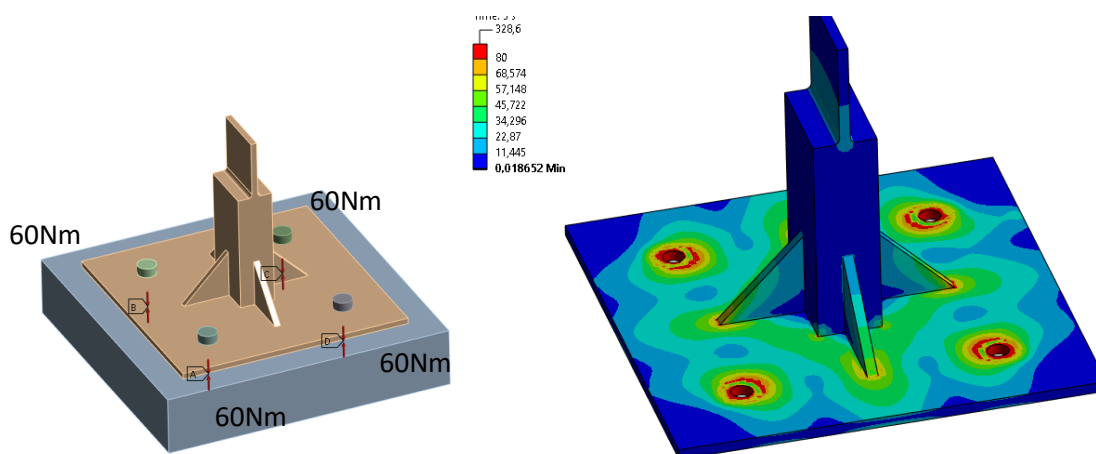


Modelo indicando distribución de tensiones

Modelo Poste tracción 200x200 con e=5 mm

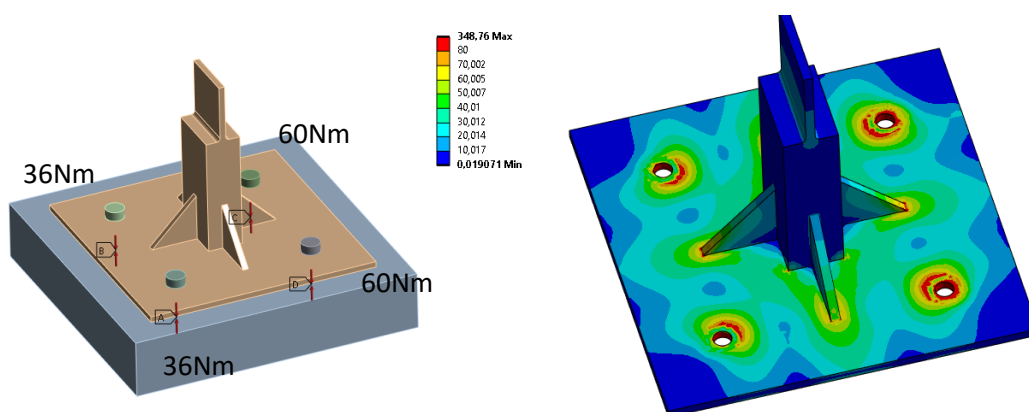
A continuación, se muestran la distribución de tensiones en la placa base.

-4 Tornillos a 60 Nm



Modelo indicando distribución de tensiones

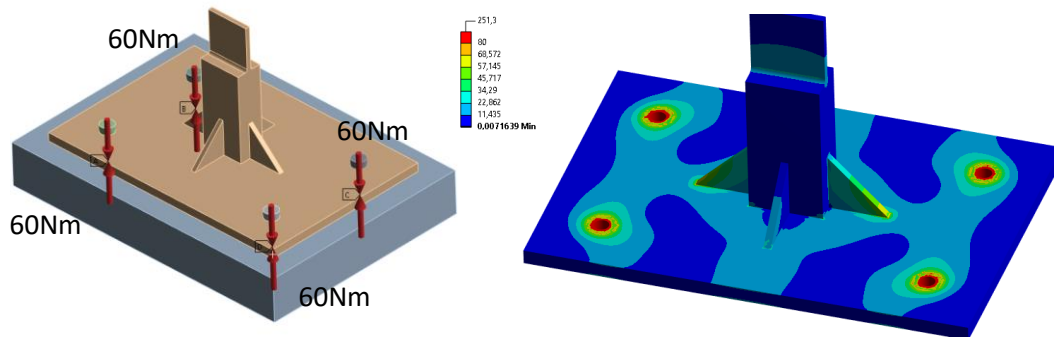
-2 Tornillo a 36 Nm y 2 Tornillos a 60Nm



Modelo indicando distribución de tensiones

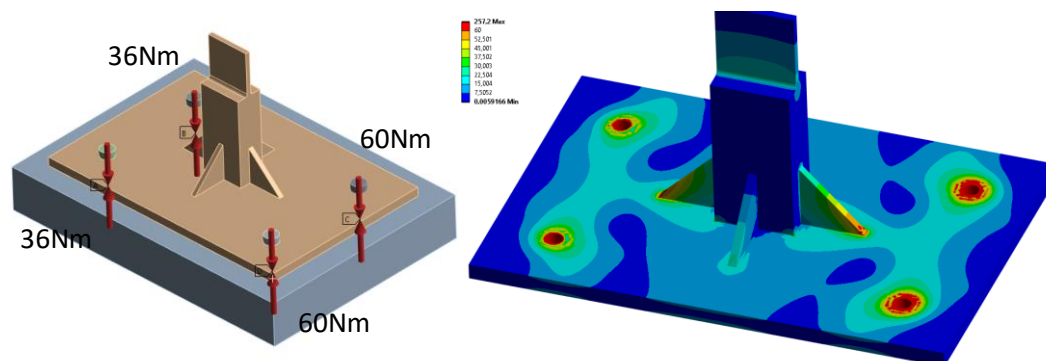
Modelo Poste tracción 300x200 con e=10 mm

-4 Tornillos a 60 Nm



Modelo indicando distribución de tensiones

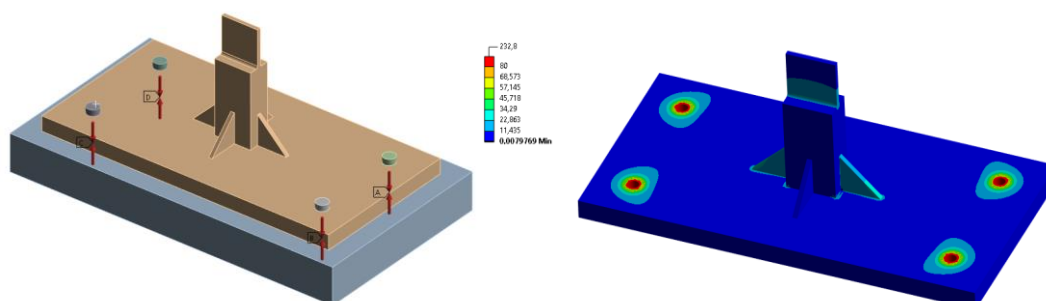
-2 Tornillo a 36 Nm y 2 Tornillos a 60Nm



Modelo indicando distribución de tensiones

Modelo Poste tracción 400x200 con e=20 mm

-4 Tornillos a 60 Nm



Modelo indicando distribución de tensiones

2.3 Detección de pérdida de par mediante EMI

El aflojamiento de un perno no es una pérdida de material, sino una pérdida de fuerza de contacto en la interfaz de la unión. Esta reducción en la precarga altera la rigidez de contacto local y las características de amortiguamiento de la unión.

Cuando un perno está correctamente apretado, la interfaz entre las placas conectadas, así como entre las roscas y la tuerca, presenta una alta rigidez de contacto, comportándose casi como un cuerpo sólido continuo en el rango de frecuencias ultrasónicas. Al producirse un aflojamiento (incluso incipiente), la presión de contacto disminuye. Esto introduce no linealidades y reduce la rigidez dinámica local. En la señal de impedancia (generalmente analizando la parte real de la impedancia o la conductancia), esto se observa típicamente como:

1. Desplazamiento de frecuencia: Los picos de resonancia en el espectro de impedancia tienden a desplazarse hacia la izquierda (frecuencias más bajas) a medida que disminuye la rigidez de la unión.
2. Cambio en la amplitud: La magnitud de los picos de resonancia varía, a menudo disminuyendo debido al aumento del amortiguamiento por fricción en las interfaces que ahora tienen mayor micro-movilidad.
3. Aparición de nuevos picos: En estados avanzados de aflojamiento, pueden aparecer nuevos modos de vibración locales que antes estaban restringidos por la alta presión de contacto.

Para cuantificar estas variaciones visuales en los espectros y automatizar la detección, los investigadores emplean índices de daño estadísticos. Los más citados en la literatura revisada incluyen:

- RMSD (Root Mean Square Deviation): Es quizás el índice más utilizado. Calcula la desviación cuadrática media entre la señal de impedancia del estado actual (desconocido) y la señal del estado base (o referencia, cuando el perno estaba apretado). Un aumento en el valor RMSD indica una mayor disparidad respecto a la condición sana, correlacionándose con la severidad del aflojamiento. Estudios como los de Park et al. (2012) han demostrado que el RMSD escala de manera monótona con la pérdida de par en ciertas bandas de frecuencia.

$$RMSD(\%) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(\operatorname{Re}(Z_0(\omega_i)) - \operatorname{Re}(Z_1(\omega_i)))^2}{\operatorname{Re}(Z_0(\omega_i))^2} \right)} \times 100$$

Algunos autores introdujeron modificaciones a la formula anterior que ha sido la empleada en este trabajo (Tseng, 2002).

$$RMSD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\operatorname{Re}(Z_0(\omega_i)) - \operatorname{Re}(Z_1(\omega_i)))^2}{\sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(Z_0(\omega_i))^2}} \times 100$$

2.4 Descripción detallada del montaje y configuración experimental

El banco de ensayos empleado en el presente proyecto se ha configurado utilizando una máquina universal de ensayos MTS (Material Testing System) de la serie Landmark, equipada con celdas de carga de alta precisión y un sistema de control de desplazamiento servohidráulico. La elección de este equipo no es trivial; permite garantizar una sujeción rígida y repetible de la probeta mediante mordazas hidráulicas, eliminando ruidos mecánicos externos que podrían contaminar las lecturas de impedancia de alta frecuencia.

La estructura bajo estudio consiste en un ensamblaje metálico vertical, diseñado específicamente para simular una unión estructural típica sometida a esfuerzos de cortadura y tracción, comunes en aplicaciones que pudieran ser relacionado con fuselajes, puentes metálicos o incluso la base de postes verticales que podríamos encontrarnos en sistemas como paneles acústicos, poste de señalización, estructuras para cartelerías en vías de automoción o transporte por ferrocarril. La geometría de la probeta favorece la transmisión de ondas elásticas a través de la interfaz de contacto, lo cual es vital para la técnica de impedancia.

La zona crítica de análisis se centra en la unión solapada asegurada mediante una combinación de cuatro tornillos equidistantes entre ellos, identificados en el plan experimental como T1, T2, T3 y T4. Esta disposición geométrica es deliberada y fundamental para el estudio: al utilizar cuatro puntos de anclaje, se genera un sistema hiperestático de grado considerable.

En un sistema isostático (un solo perno), el fallo del perno implica el fallo de la unión. En un sistema hiperestático como este, el aflojamiento de un tornillo (ej. T3) provoca una redistribución inmediata de las líneas de fuerza hacia los tornillos adyacentes (T1, T2,

T4). Esta redistribución altera el campo de deformaciones local y la rigidez dinámica global de la placa. El reto del sistema SHM es detectar esta redistribución interna antes de que los tornillos remanentes fallen por sobrecarga.

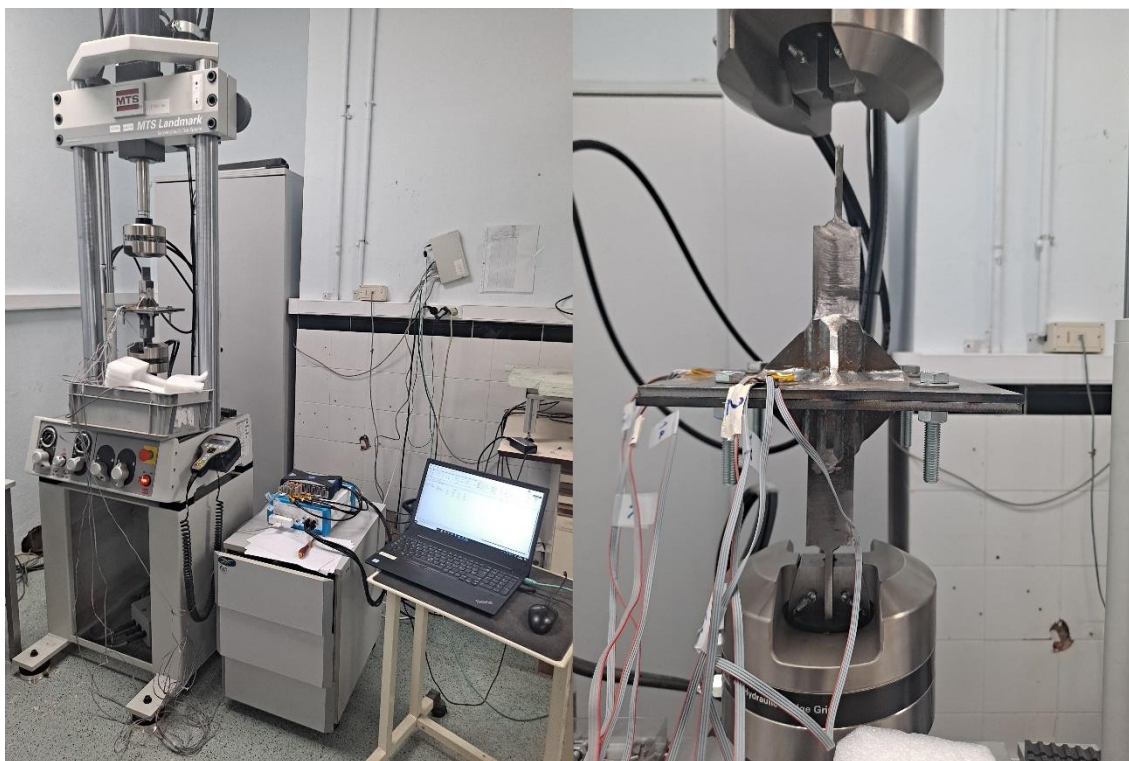
El diseño del experimento se basa en una matriz de pruebas exhaustiva, definida en la tabla de planificación, que cubre el espectro completo de degradación de la unión. La variable independiente principal es el par de apriete aplicado a cada uno de los cuatro tornillos, mientras que las variables dependientes son las señales adquiridas.

Se ha establecido un valor de referencia del 100% del par de apriete correspondiente a 60 Nm. Este valor ha sido calculado para garantizar que los tornillos operen dentro de su rango elástico óptimo. A partir de esta línea base, se han definido niveles de degradación escalonados al 80% (48 Nm), 60% (36 Nm) y 40% (24 Nm). El límite inferior del 40% se ha seleccionado porque representa una pérdida severa de la fuerza de amarre donde la separación de las placas es inminente bajo carga, pero sin llegar al desmontaje total.

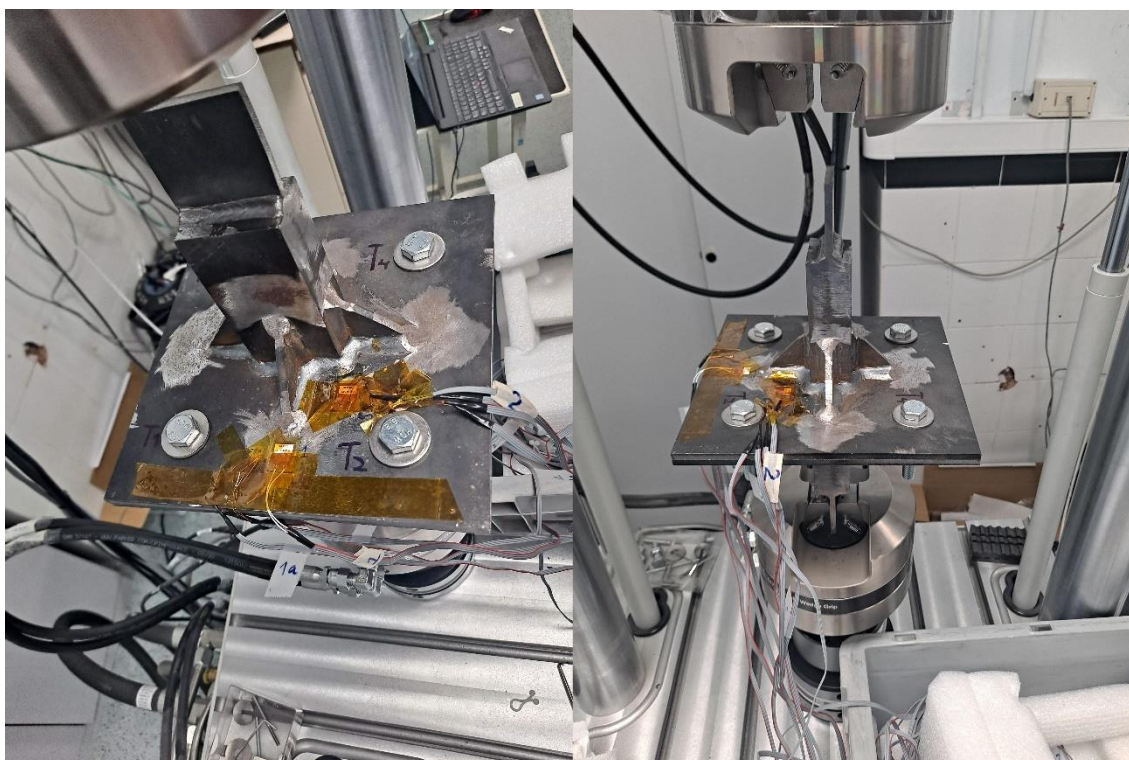
Numeración	Modo	kN								
			T1		T2		T3		T4	
			%	Nm	%	Nm	%	Nm	%	Nm
			0	60	0	60	0	60	0	60
1	Estático	Peso propio conexión inferior	100	60	100	60	100	60	100	60
2		5KN								
3	Estático	Peso propio conexión inferior	80	48	80	48	80	48	80	48
4		5KN								
5	Estático	Peso propio conexión inferior	60	36	60	36	60	36	60	36
6		5KN								
7	Estático	Peso propio conexión inferior	40	24	40	24	40	24	40	24
8		5KN								
9	Estático	Peso propio conexión inferior	80	48	100	60	100	60	100	60
10		5KN								
11	Estático	Peso propio conexión inferior	100	60	80	48	100	60	100	60
12		5KN								
13	Estático	Peso propio conexión inferior	100	60	100	60	80	48	100	60

14		5KN				
15	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	100 60	100 60	80 48
16		5KN				
17	Estático	Peso propio conexión inferior	80 48	80 48	100 60	100 60
18		5KN				
19	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	80 48	80 48	100 60
20		5KN				
21	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	100 60	80 48	80 48
22		5KN				
23	Estático	Peso propio conexión inferior	80 48	100 60	80 48	100 60
24		5KN				
25	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	80 48	100 60	80 48
26		5KN				
27	Estático	Peso propio conexión inferior	60 36	100 60	100 60	100 60
28		5KN				
29	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	60 36	100 60	100 60
30		5KN				
31	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	100 60	60 36	100 60
32		5KN				
33	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	100 60	100 60	60 36
34		5KN				
35	Estático	Peso propio conexión inferior	60 36	60 36	100 60	100 60
36		5KN				
37	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	60 36	60 36	100 60
38		5KN				
39	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	100 60	60 36	60 36
40		5KN				
41	Estático	Peso propio conexión inferior	60 36	100 60	60 36	60 36
42		5KN				

43	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	60 36	100 60	60 36
44		5KN				
45	Estático	Peso propio conexión inferior	40 24	100 60	100 60	100 60
46		5KN				
47	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	40 24	100 60	100 60
48		5KN				
49	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	100 60	40 24	100 60
50		5KN				
51	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	100 60	100 60	40 24
52		5KN				
53	Estático	Peso propio conexión inferior	40 24	40 24	100 60	100 60
54		5KN				
55	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	40 24	40 24	100 60
56		5KN				
57	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	100 60	40 24	40 24
58		5KN				
59	Estático	Peso propio conexión inferior	40 24	100 60	40 24	40 24
60		5KN				
61	Estático	Peso propio conexión inferior	100 60	40 24	100 60	40 24
62		5KN				



Disposición de una de las muestras analizadas.



Parte superior de las muestra con los sensores ROS y PZT situados en la placa.

Estudios que destacar:

P1	Estático (0 kN)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	Estado inicial sin carga externa.
P2	Dinámico (5 kN)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	Referencia bajo carga operativa. Verifica la estabilidad del montaje.
P3 - P4	0 kN / 5 kN	48 (80%)	48 (80%)	48 (80%)	48 (80%)	Inicio de relajación global. Simulación de asentamiento térmico o vibratorio leve.
P5 - P6	0 kN / 5 kN	36 (60%)	36 (60%)	36 (60%)	36 (60%)	Degradación moderada. Reducción significativa de la presión de contacto.
P7 - P8	0 kN / 5 kN	24 (40%)	24 (40%)	24 (40%)	24 (40%)	Degradación severa. Riesgo de deslizamiento entre placas bajo carga.

P45	40% (24Nm)	100% (60Nm)	100% (60Nm)	100% (60Nm)	Fallo único en T1. Se espera máxima desviación en sensores cercanos a T1 y menor en lejanos.
P49	100%	100%	40%	100%	Fallo único en T3. Caso

	(60Nm)	(60Nm)	(24Nm)	(60Nm)	crítico para evaluar si el sistema distingue T3 de T1.
P53	40% (24Nm)	40% (24Nm)	100% (60Nm)	100% (60Nm)	Fallo de fila superior/lateral. Simula un fallo en cascada de tornillos adyacentes.
P55	100% (60Nm)	40% (24Nm)	40% (24Nm)	100% (60Nm)	Fallo central o diagonal. Evalúa la interacción de campos de deformación complejos.

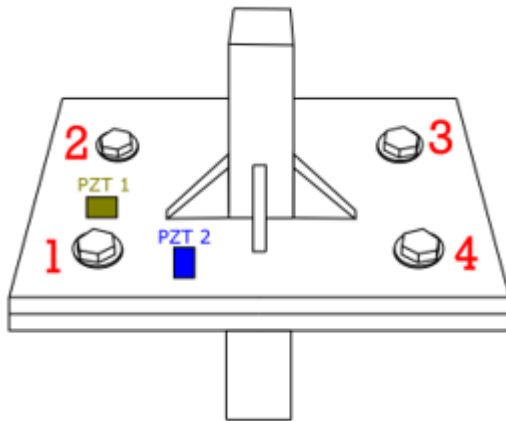
P1	60	60	60	60	Baseline Prístina	100%
P9	48	60	60	60	Daño Leve Localizado	80%
P27	36	60	60	60	Daño Moderado Localizado	60%
P45	24	60	60	60	Daño Severo Localizado	40%

2.5 **Análisis de resultados experimentales y conclusiones de la evaluación de pérdida de par mediante impedancia electromecánica analizando la señal de fase.**

El presente capítulo detalla los resultados obtenidos tras la ejecución del plan experimental diseñado para la evaluación de la pérdida de precarga en uniones atornilladas mediante la técnica de Impedancia Electromecánica (EMI). El objetivo principal de este análisis no es solo validar la capacidad de detección binaria (apretado/flojo), sino caracterizar la sensibilidad, la linealidad y la robustez del índice de daño estadístico RMSD frente a escenarios complejos que combinan la pérdida de par de apriete con solicitaciones de carga externa.

El análisis se centra en la comparativa de la respuesta espectral de dos transductores piezoeléctricos, PZT1 y PZT2, ubicados estratégicamente en la placa de unión de la

estructura tipo.



Disposición de sensores en la muestra representativa.

2.6 Definición de los Escenarios de Comparación

Para este análisis, se ha establecido el Escenario 1 (P1) como la línea base absoluta o referencia estado saludable, definido por un par de apriete del 100% (60 Nm) en los cuatro pernos y ausencia de carga externa (0 kN).

La evaluación del desempeño de los sensores se realiza contrastando esta referencia con tres escenarios operativos críticos extraídos de la matriz experimental:

- I. Efecto de la Carga (P1 vs P2): Comparación del estado base (0 kN) frente al estado operativo con carga de tracción de 5 kN, manteniendo el par al 100%. Esto permite evaluar la estabilidad del sistema y la probabilidad de "falsos positivos" inducidos puramente por la tensión mecánica de trabajo.
- II. Efecto del Daño Puro (P1 vs P3): Comparación frente a una reducción del par al 80% (48 Nm) sin carga externa. Evalúa la sensibilidad pura a la pérdida de rigidez de contacto.
- III. Efecto Combinado Carga-Daño (P1 vs P4): Comparación frente a una reducción del par al 80% bajo una carga de 5 kN. Este es el escenario más realista, donde la carga externa puede abrir micro desplazamientos en una unión debilitada.

2.7 Análisis Detallado del Sensor PZT 1 (Ubicación Periférica)

El sensor PZT1 se encuentra ubicado en la proximidad del perno 1 y el perno 2, en una zona periférica de la placa. Debido a su posición, se espera que su respuesta esté dominada por los modos locales de vibración de los pernos adyacentes y sea sensible a los efectos de borde.

A continuación, se presenta la matriz de resultados consolidada para el PZT1, segmentada por bandas de frecuencia, indicando la evolución del índice RMSD y el diagnóstico cualitativo de la tendencia.

Tabla sensor PZT 1

Frecuencia (Hz)	P1 vs P2 (Carga 5kN) RMSD [%]	P1 vs P3 (Daño 80%) RMSD [%]	P1 vs P4 (Daño+Carga) RMSD [%]	Tendencia y Diagnóstico Cualitativo
15,000	1.6004	1.6652	1.5163	▲ Crecimiento leve:
25,000	0.8572	1.2338	1.3426	▲ Tendencia positiva:
35,000	1.4311	1.8920	1.7846	▲ Crecimiento lineal:
45,000	2.1099	2.3679	2.5010	▲▲ Banda crítica de detección:
55,000	1.2890	1.8779	1.5939	— Estabilidad: sensibilidad moderada.
65,000	1.6167	2.4481	2.2198	▲ Tendencia positiva:
75,000	1.3397	1.4450	1.4464	— Saturación:
85,000	1.1263	1.6729	1.5035	▼ Baja
95,000	1.5137	1.5488	1.2006	▲ Respuesta local:
105,000	0.2113	0.3471	0.5265	▼ Zona ciega:

El análisis de los datos del PZT1 revela un comportamiento altamente dependiente de la frecuencia. Se observa que, en el rango de 45 kHz, el sensor alcanza su banda crítica

de detección. En este punto, la longitud de onda de la vibración excitada parece coincidir con las dimensiones características de la zona de influencia del perno 1, generando una resonancia local muy sensible a la presión de contacto.

Es notable que el PZT1 muestra una capacidad limitada para distinguir el efecto de la carga (P2) del efecto del daño (P3/P4) en frecuencias bajas (15 kHz). Esto se debe a que, a bajas frecuencias, la estructura vibra en modos globales; la aplicación de una carga de 5kN tensa toda la placa, cambiando su rigidez global de manera similar a como lo haría un aflojamiento, confundiendo al sensor.

2.8 **Análisis Detallado del Sensor PZT 2 (Ubicación Central)**

El sensor PZT2 se encuentra posicionado más cerca del centro geométrico de la placa y del refuerzo estructural. Esta ubicación le confiere una perspectiva digamos estructural diferente, estando teóricamente más acoplado a la rigidez global del conjunto y menos afectado por los efectos de borde libre que el PZT1.

Tabla sensor PZT 2

Frecuencia (Hz)	P1 vs P2 (Carga 5kN) RMSD [%]	P1 vs P3 (Daño 80%) RMSD [%]	P1 vs P4 (Daño+Carga) RMSD [%]	Tendencia y Diagnóstico Cualitativo
15,000	1.1800	1.4167	1.4385	▲ Diferenciación clara
25,000	2.3132	2.5964	3.0015	▲▲ Banda crítica de detección
35,000	1.5149	1.7640	1.7287	▲ Alta estabilidad
45,000	1.0660	1.2488	1.5177	▼ Inversión modal
55,000	1.5659	2.3525	1.9341	▲ Crecimiento lineal
65,000	1.6948	3.6196	2.3696	▲ Tendencia positiva
75,000	2.0829	1.5803	1.9573	▲▲ Segundo pico crítico
85,000	1.0382	1.1654	1.1873	▼ Decaimiento
95,000	1.5263	1.8064	1.5400	— Estabilidad

105,000	0.5328	0.4148	0.2146	▼ Zona ciega
---------	--------	--------	--------	--------------

El PZT2 demuestra ser un sensor más "agresivo" en términos de magnitud de RMSD. Su ubicación central le permite capturar modos de vibración que implican la flexión de la placa alrededor del refuerzo central.

Destaca el pico masivo en la banda de 25 kHz. Mientras que el PZT1 era moderado en esta frecuencia, el PZT2 identifica el daño con una claridad superior (RMSD de 3.00% para el escenario P4). Esto sugiere que a 25 kHz se excita un modo de vibración que involucra la zona central de la placa, la cual se ve muy afectada cuando los pernos pierden tensión y permiten mayor libertad de movimiento al conjunto.

La implementación de una red de sensores distribuida es, por tanto, obligatoria. Un sistema que confiara únicamente en el PZT2 fallaría en detectar daños si se analizara solo la banda de 45 kHz, mientras que un sistema basado solo en PZT1 sería menos robusto ante el ruido de carga en bajas frecuencias.

Uno de los hallazgos más relevantes de este estudio es la interacción no lineal entre la carga y el daño. Se hipotetizaba que la carga de tracción de 5 kN podría "enmascarar" el aflojamiento al volver a tensar las placas (efecto de cierre de grieta).

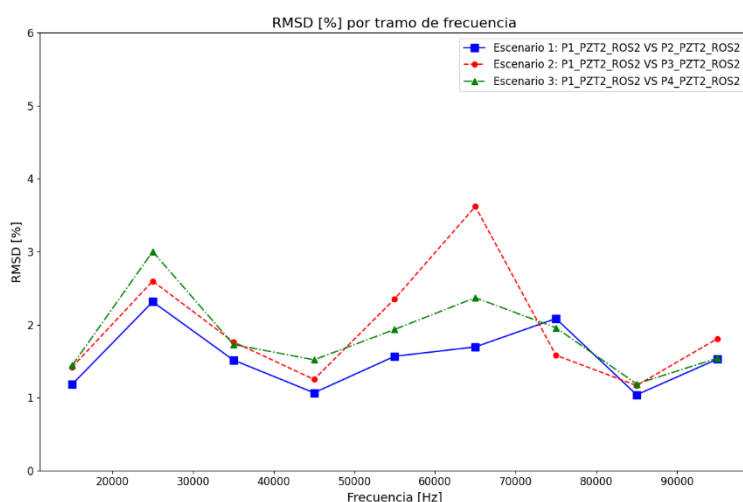
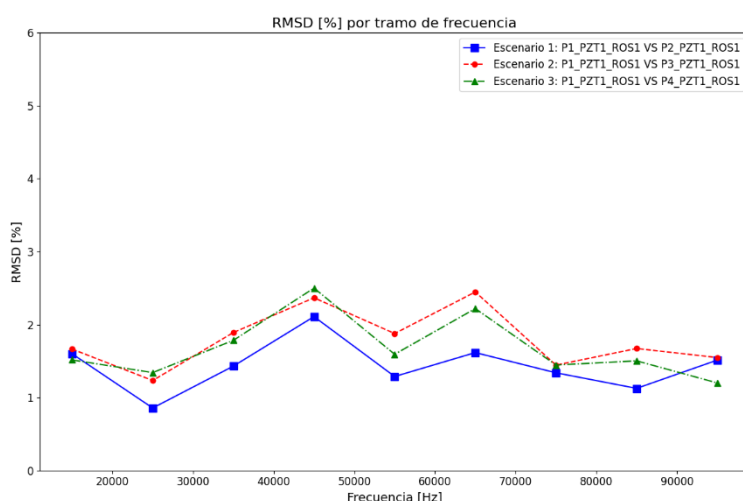
Sin embargo, los datos, especialmente en la banda de 45 kHz para el PZT1, muestran lo contrario: el escenario P4 (Daño 80% + Carga 5kN) presenta el mayor índice RMSD (2.5010%), superando al daño puro (2.3679%). Esto indica que, lejos de enmascarar el daño, la carga externa interactúa con la unión debilitada alterando aún más su respuesta dinámica.

La carga de 5kN no es suficiente para restituir la rigidez original de una unión floja; al contrario, introduce una tensión asimétrica en una placa que ya no está bien sujeta, magnificando la desviación espectral.

Como conclusiones de esta sección podríamos indicar:

- La técnica de impedancia electromecánica ha demostrado ser capaz de detectar una pérdida de par moderada (del 100% al 80%) con una variabilidad clara en el índice RMSD.
- Se han identificado las bandas de 25-35 kHz y 45-65 kHz como las más fiables para esta geometría específica. Las frecuencias superiores a 100 kHz presentan una relación señal-ruido debido al cálculo.
- El sistema es capaz de distinguir entre un cambio de estado de aplicación de carga de servicio y un cambio de aflojamiento, especialmente si se observa la tendencia en múltiples bandas de frecuencia simultáneamente.

- Para futuras aplicaciones en campo, se recomienda una configuración de sensores híbrida (centro/borde) y un algoritmo de procesamiento que priorice las bandas de 25 kHz y 45 kHz, descartando la banda de >100 kHz para optimizar el procesamiento de datos y reducir el consumo energético del sistema de monitorización inalámbrico.



Comparativas llevadas a cabo en este primer estudio con respecto a la señal de fase.

2.9 Análisis de resultados experimentales y conclusiones de la evaluación de pérdida de par mediante impedancia electromecánica analizando la señal de fase. RMSD modificado.

En este caso la elección de esta métrica se justifica por su capacidad superior para

normalizar las desviaciones espectrales. Mientras que el RMSD estándar puede verse sesgado por fluctuaciones de amplitud puramente resistivas, la formulación empleada aquí pondera la diferencia cuadrática respecto a la suma de los cuadrados de la firma base.

Esta normalización resulta en valores absolutos de escala más reducida (típicamente entre 0.1% y 0.6% en este estudio) comparados con el RMSD estándar, pero ofrece una mayor fidelidad en la detección de cambios de forma en la curva de impedancia, lo cual es crítico para distinguir entre cambios benignos (carga operativa) y cambios malignos (pérdida de par).

El análisis compara tres escenarios frente a la línea base (P1: 100% Par, 0kN):

1. Escenario P2 (Efecto Carga): 100% Par + 5kN Tracción.
2. Escenario P3 (Efecto Daño): 80% Par + 0kN.
3. Escenario P4 (Interacción): 80% Par + 5kN Tracción.

A continuación, se presenta la matriz de diagnóstico basada en los datos del RMSD Modificado.

Tabla Sensor PZT 1 (Métrica Tseng)

Frecuencia (Hz)	P1 vs P2 (Carga 5kN) RMSD [%]	P1 vs P3 (Daño 80%) RMSD [%]	P1 vs P4 (Daño+Carga) RMSD [%]	Tendencia y Diagnóstico Cualitativo
25,000	0.0907	0.1352	0.1230	▲ Crecimiento Leve
35,000	0.1813	0.1306	0.1421	▼ Inversión de Sensibilidad
45,000	0.2991	0.2396	0.2263	▲ Alta Reactividad a Carga
55,000	0.2056	0.3368	0.3555	▲▲ Banda Crítica de Detección
65,000	0.2756	0.2997	0.2541	— Saturación/Estabilidad
75,000	0.2483	0.4178	0.3785	▲▲ Máxima Sensibilidad al Daño

85,000	0.2204	0.2676	0.2683	— Estabilidad
95,000	0.3223	0.3281	0.2946	▼ Confusión Modal

El análisis mediante la fórmula de Tseng revela un comportamiento del PZT1 menos lineal que con el RMSD estándar. Destaca la banda de 55 kHz y 75 kHz como las ventanas de operación más fiables. Es crucial notar el fenómeno observado a 45 kHz: bajo la métrica modificada, el escenario de carga pura (P2) genera un índice de 0.299%, superior al daño (0.239%). Esto sugiere que, en esta frecuencia, el cambio en la impedancia está gobernado por la rigidez geométrica global más que por la rigidez de contacto local. El PZT1, al estar en el borde, "siente" la tensión de la placa de forma predominante en este modo. Por el contrario, a 75 kHz, el sensor logra desacoplarse de la carga global y enfocar su sensibilidad en el defecto local, marcando un claro 0.4178% para el daño, casi el doble que la carga operativa.

El sensor PZT2, ubicado cerca del refuerzo central, demuestra una mayor robustez diagnóstica con la métrica modificada. Sus valores de RMSD presentan picos más definidos y una mejor separación entre estados, lo que confirma su posición estratégica para la monitorización de la integridad estructural.

Tabla Sensor PZT 2 (Métrica Tseng)

Frecuencia (Hz)	P1 vs P2 (Carga 5kN) RMSD [%]	P1 vs P3 (Daño 80%) RMSD [%]	P1 vs P4 (Daño+Carga) RMSD [%]	Tendencia y Diagnóstico Cualitativo
25,000	0.0958	0.1151	0.1169	— Inicio de banda
35,000	0.2415	0.2724	0.3145	▲ Tendencia positiva
45,000	0.1918	0.2237	0.2189	— Estabilidad
55,000	0.1519	0.1783	0.2167	▲ Crecimiento lineal
65,000	0.2507	0.3762	0.3090	▲▲ Pico de resonancia de daño
75,000	0.2897	0.6186	0.4038	▲▲ Banda crítica de detección

				(máxima)
85,000	0.3864	0.2927	0.3627	▼ Inversión negativa
95,000	0.2036	0.2285	0.2328	— Atenuación

La aplicación del RMSD modificado sobre el PZT2 arroja resultados concluyentes. La banda de 75 kHz se establece como la huella digital del daño para esta configuración geométrica. Un valor de RMSD de 0.6186% en el escenario P3 (daño sin carga) contrasta radicalmente con el 0.2897% del estado de carga operativa.

Un fenómeno de alto interés físico se observa al comparar P3 y P4 en la banda de 65-75 kHz.

- En P3 (Daño 80%, sin carga), la falta de par permite una "micro-libertad" de las placas, generando un cambio masivo en la impedancia (RMSD alto).
- En P4 (Daño 80%, con carga 5kN), la tracción aplicada parece "estabilizar" o rigidizar ligeramente la unión floja, reduciendo el RMSD de 0.61% a 0.40%.

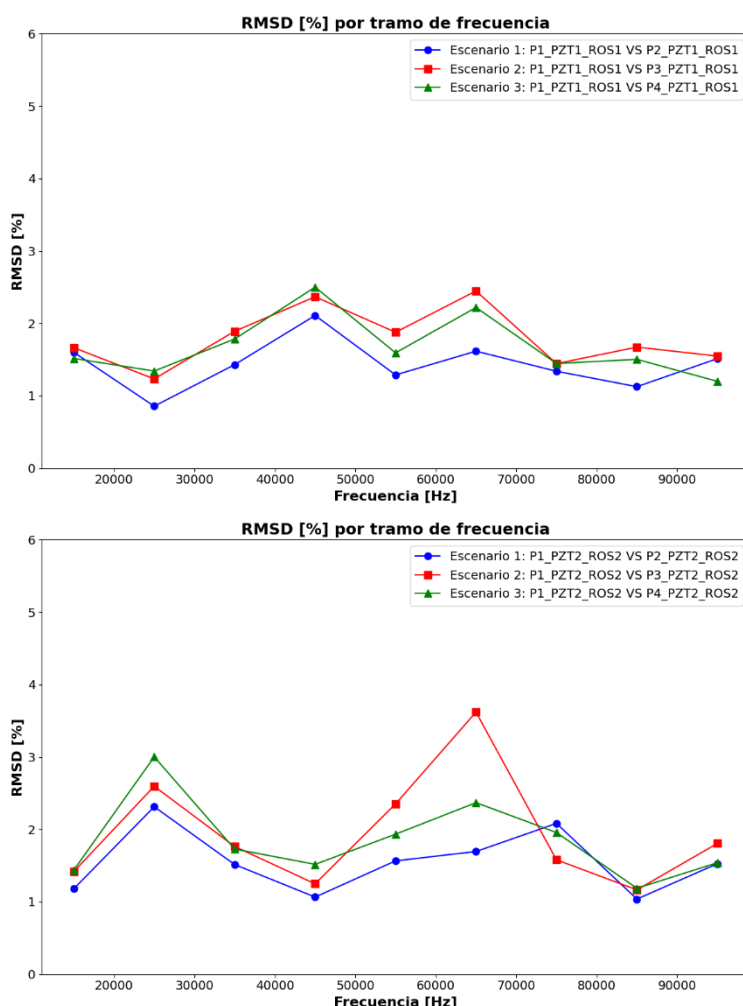
2.10 Comparativa global de los modelos

Bajo la métrica de Tseng (2002), la frecuencia de 75 kHz emerge como el punto óptimo de monitorización para ambos sensores, aunque con comportamientos distintos:

- PZT1: Detecta el daño (0.41%) pero mantiene una sensibilidad base a la carga (0.24%).
- PZT2: Amplifica la señal de daño al máximo (0.61%), ofreciendo el mejor ratio señal-ruido para la detección de anomalías.

El análisis detallado de los datos RMSD modificados confirma la hipótesis de que la carga externa puede enmascarar parcialmente el daño espectral. En el PZT2 (banda 75 kHz), la presencia de carga reduce la visibilidad del daño en un ~35% (bajando de 0.61% a 0.40%). Sin embargo, incluso con esta reducción, el índice se mantiene significativamente por encima del umbral base, garantizando la detección.

En conclusión, la métrica de Tseng, aunque arroja valores numéricos más bajos, proporciona una caracterización más estable y físicamente coherente de la interacción entre la pérdida de precarga y las solicitaciones externas, validando la eficacia del sistema de monitorización propuesto.



Comparativas llevadas a cabo en este primer estudio con respecto a la señal de fase.

2.11 Análisis de resultados experimentales y conclusiones de la evaluación de pérdida de par mediante impedancia electromecánica analizando la señal real de impedancia. RMSD tradicional.

Este análisis se diferencia de los anteriores en tres aspectos fundamentales definidos en el plan de experiencias:

1. Variable de Estudio: Se analiza exclusivamente la Parte Real de la Impedancia (Resistencia), la cual está directamente vinculada a la disipación de energía mecánica y la fricción en la interfaz de la unión.
2. Métrica: Se emplea el cálculo del RMSD Tradicional, lo que explica la magnitud

elevada de los valores porcentuales (superiores al 100% en muchos casos), ofreciendo una escala de sensibilidad distinta a la fórmula de Tseng.

3. Escenarios de Degradación: Se evalúa la progresión del aflojamiento sin la interferencia de cargas externas (0 kN), comparando el estado basal (P1, 100%) contra tres niveles de severidad: P3 (80%), P5 (60%) y P7 (40%).

El uso de la parte real de la impedancia electromecánica como variable primaria es estratégico. Mientras que la parte imaginaria y la magnitud están dominadas por el comportamiento capacitivo y la masa/rigidez, la parte real refleja las pérdidas resistivas mecánicas. En una unión atornillada, estas pérdidas provienen principalmente de la fricción entre las placas y el amortiguamiento estructural. A medida que el par de apriete disminuye (del 100% al 40%), la presión de contacto entre las placas se reduce, alterando drásticamente la capacidad de la unión para disipar energía y modificando los mecanismos de micro deslizamiento.

El sensor PZT1, situado cerca del borde de la placa y próximo a los pernos T1 y T2, muestra una sensibilidad excepcional bajo la métrica RMSD tradicional. Los valores obtenidos superan frecuentemente el 100%, lo que indica que la firma espectral de la impedancia real cambia radicalmente de forma y magnitud ante la pérdida de par.

Sensor PZT 1 (Parte Real)

Frecuencia (Hz)	P1 vs P3 (Daño Leve 80%) RMSD [%]	P1 vs P5 (Daño Medio 60%) RMSD [%]	P1 vs P7 (Daño Severo 40%) RMSD [%]	Tendencia y Diagnóstico Cualitativo de Severidad
15,000	136.25	145.68	153.98	▲ Crecimiento Monótono
25,000	98.69	108.74	141.66	▲ Crecimiento Monótono
35,000	131.32	180.28	142.35	▼ No Linealidad (Pico en Medio)
45,000	150.96	125.98	214.29	▲ ▲ Banda Crítica de Severidad
55,000	127.67	107.83	91.52	▼ Inversión de Tendencia
65,000	151.46	129.96	128.18	▼ Estabilidad en
75,000	92.19	168.10	92.91	▲ Sensibilidad a Daño Medio
85,000	117.61	118.09	82.93	▼ Decaimiento
95,000	102.55	52.87	63.86	▼ Baja Fiabilidad

El análisis del PZT1 revela dos comportamientos físicos distintos que dependen de la frecuencia de excitación:

1. Respuesta lineal en baja frecuencia (15-25 kHz): En este rango, la longitud de onda es suficiente para interactuar con la rigidez global de la unión. Observamos una correlación perfecta: a menor par, mayor índice RMSD. Esto valida el uso de estas frecuencias para estimar el par remanente de forma proporcional. Si el RMSD sube de 136% a 153%, podemos inferir que el par ha caído del 80% al 40%.
2. Sensibilidad extrema a la holgura en 45 khz: El valor de 214.29% en el escenario P7 (40% de par) es el hallazgo más significativo para este sensor. A este nivel de aflojamiento (24 Nm), la presión de contacto es tan baja que las micro-asperezas de las placas comienzan a separarse macroscópicamente durante la vibración. Esto genera una no linealidad abrupta en la resistencia mecánica, que el PZT1 detecta como un cambio masivo en la parte real de la impedancia. Es la "alarma roja" del sistema.

Sin embargo, se observa una inversión de tendencia a partir de 55 kHz. Aquí, el aflojamiento severo (P7) produce menos RMSD que el leve. Esto podría deberse a un fenómeno de "desacoplamiento". Cuando el perno está muy flojo, la transferencia de energía de alta frecuencia entre el perno y la placa disminuye tanto que el sensor deja de percibir los cambios en la dinámica del perno, viendo solo la placa local, cuya impedancia se estabiliza.

El sensor PZT2, ubicado cerca del refuerzo central, muestra un perfil de comportamiento radicalmente distinto. Su respuesta no tiende a la linealidad, sino que actúa como un detector de cambios de estado o de resonancias estructurales específicas. Los valores de RMSD son igualmente altos, confirmando que la Parte Real de la Impedancia es una métrica muy sensible.

Sensor PZT 2 (Parte Real)

Frecuencia (Hz)	P1 vs P3 (Daño Leve 80%) RMSD [%]	P1 vs P5 (Daño Medio 60%) RMSD [%]	P1 vs P7 (Daño Severo 40%) RMSD [%]	Tendencia y Diagnóstico Cualitativo de Severidad
15,000	123.29	148.43	128.95	— Pico central
25,000	171.25	188.87	153.90	▲ Alta sensibilidad general
35,000	130.77	138.45	146.00	▲ Crecimiento monótono

45,000	99.14	172.40	121.79	▼ Comportamiento modal
55,000	164.85	136.17	167.22	— Bimodalidad
65,000	232.99	166.87	153.77	▼ Alerta temprana
75,000	92.85	112.51	83.56	— Baja diferenciación
85,000	77.51	104.02	100.59	▲ Tendencia positiva
95,000	93.93	75.29	80.76	▼ Ruido

El PZT2 demuestra ser un sensor de alerta temprana. Su comportamiento más destacado ocurre en la banda de 65 kHz, donde el escenario P3 (pérdida de solo el 20% del par, quedando al 80%) genera un RMSD masivo de 232.99%. Esto puede ocurrir porque el PZT2 está en el centro de la placa. Cuando los pernos están al 100%, la placa actúa como un diafragma rigidizado en sus cuatro esquinas. Al relajarse ligeramente la tensión (al 80%), la condición de contorno de la placa cambia drásticamente: se libera energía elástica almacenada y cambian los modos de flexión de la placa central. Esta liberación inicial es lo que puede captar el PZT2 con tanta violencia.

La comparación cruzada de ambos sensores bajo la métrica RMSD tradicional y la impedancia real permite establecer roles definidos para cada uno en un sistema de monitorización integral.

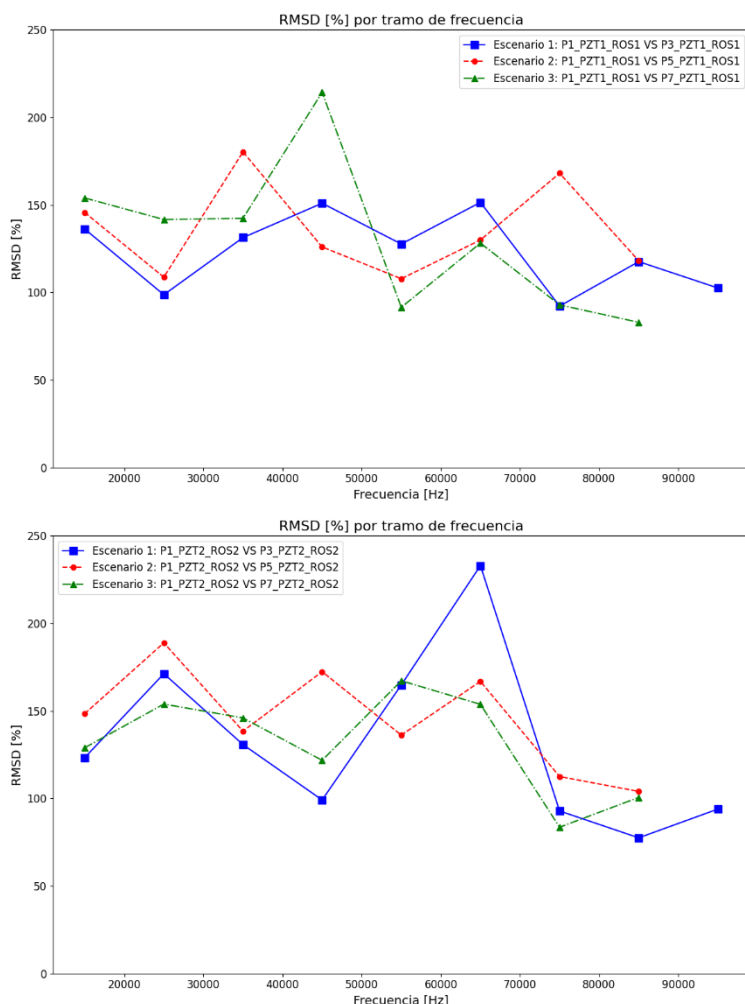
- PZT1 (Borde) puede ser el sensor de la "Severidad": En las bandas bajas (15-25 kHz), muestra un comportamiento cuasi-lineal que permite estimar cuánto par se ha perdido. Además, en 45 kHz, es capaz de identificar inequívocamente el estado más peligroso (40% de par) con su valor máximo histórico. Su proximidad a los pernos le permite monitorizar la degradación física del contacto paso a paso.
- PZT2 (Centro) es el sensor de la "Alerta": Su respuesta no es lineal. Tiende a saturarse o mostrar sus valores máximos en los estados iniciales o intermedios de daño (ver 65 kHz para P3 o 45 kHz para P5). Es excelente para decir "algo ha cambiado", pero menos fiable para decir "cuánto ha cambiado".

Tras el análisis de la degradación progresiva (P1 -> P3 -> P5 -> P7), se extraen las siguientes conclusiones definitivas para la configuración del sistema SHM:

- Para cuantificar el daño, se debe interrogar al PZT1 en la banda de 15-25 kHz. Aquí, el RMSD escala proporcionalmente con el daño.
- Para detectar el peligro inminente, se debe monitorizar el PZT1 en 45 kHz, estableciendo una alarma si el RMSD supera el 200%.

- Para la detección temprana (mantenimiento preventivo), se debe utilizar el PZT2 en 65 kHz. Cualquier salto por encima del 150-200% indica que el par ha comenzado a relajarse (estado 80%).

Este estudio confirma que la combinación de la parte real de la impedancia con el RMSD tradicional proporciona una métrica de alta sensibilidad, capaz de distinguir no solo la presencia de daño, sino discriminar entre estados de degradación moderada y severa, siempre que se analice la banda de frecuencia correcta para cada ubicación de sensor.



Comparativas llevadas a cabo en este primer estudio con respecto a la señal de fase.

2.12 Análisis de resultados experimentales y conclusiones de la evaluación de pérdida de par mediante impedancia electromecánica analizando la señal real de impedancia. RMSD modificado. Pérdidas de par generales.

El presente análisis se centra en la evaluación de la degradación progresiva del par de apriete (P3: 80%, P5: 60%, P7: 40%) frente al estado prístino (P1: 100%). Se aplica la métrica del RMSD Modificado (Tseng, 2002), que prioriza la detección de cambios en la forma de la curva de impedancia por encima de los cambios en su magnitud absoluta. Los resultados se contrastan con los obtenidos mediante el RMSD tradicional para establecer la estrategia de monitorización óptima.

El sensor PZT1, ubicado en la periferia de la placa, muestra un perfil de sensibilidad complejo, con bandas específicas que son excelentes para la cuantificación del daño severo.

Sensor PZT 1 (RMSD Modificado)

Frecuencia (Hz)	P1 vs P3 (Daño 80%) RMSD [%]	P1 vs P5 (Daño 60%) RMSD [%]	P1 vs P7 (Daño 40%) RMSD [%]	Tendencia y Diagnóstico Cualitativo
15,000	11.848	13.451	13.663	▲ Crecimiento leve
25,000	11.398	12.436	15.563	▲ Crecimiento lineal
35,000	19.030	25.030	17.423	▼ Inversión media
45,000	23.658	21.542	31.073	▲▲ Banda crítica de severidad
55,000	22.264	17.091	15.618	▼ Inversión de tendencia
65,000	30.669	24.661	25.943	▲ Alerta temprana
75,000	18.661	24.526	17.412	▼ Comportamiento modal
85,000	22.729	20.209	14.557	▼ Decaimiento monótono

El RMSD modificado valida la banda de 45 khz como el detector definitivo de la severidad del daño para el PZT1. En esta frecuencia, la magnitud del índice se dispara a 31.073% en el estado p7 (40% de par), superando claramente a los demás escenarios (p3:

23.658%, p5: 21.542%). Este pico tan alto en el daño severo, incluso con una métrica de valores bajos como la de Tseng, sugiere que a 45 khz la holgura en el perno adyacente altera radicalmente la forma de la resonancia local.

Por otro lado, la banda de 65 khz se comporta como un indicador de alerta temprana para el PZT1, registrando su máximo en el daño leve (p3: 30.669%). Esto implica que el impacto inicial del aflojamiento (de 100% a 80%) genera un cambio de modo de vibración que es muy visible en esta frecuencia, pero que se "aplana" o se reestructura a medida que el daño avanza.

El PZT2, situado en la zona central, exhibe una mayor sensibilidad al aflojamiento inicial y muestra una marcada no-linealidad en la progresión del daño.

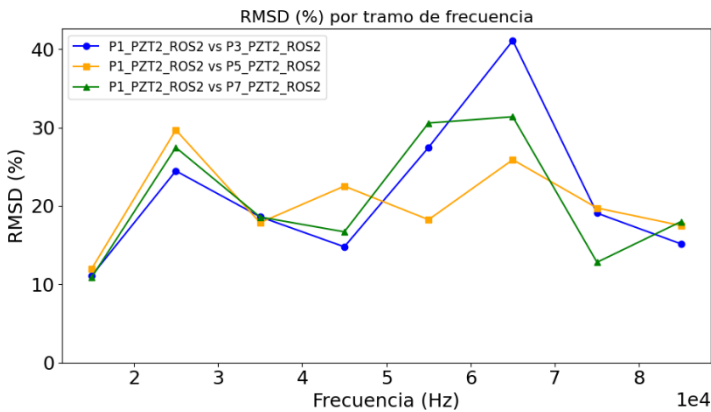
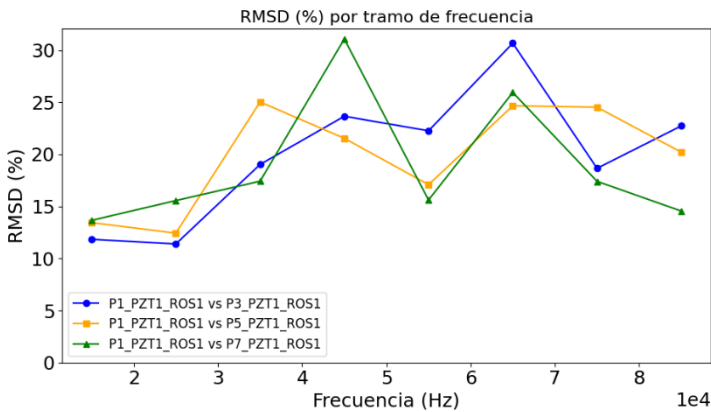
Sensor PZT 2 (RMSD Modificado)

Frecuencia (Hz)	P1 vs P3 (Daño 80%) RMSD [%]	P1 vs P5 (Daño Medio 60%) RMSD [%]	P1 vs P7 (Daño Severo 40%) RMSD [%]	Tendencia y Diagnóstico Cualitativo
15,000	11.087	11.971	10.885	— Alta estabilidad
25,000	24.462	29.687	27.443	▲ Sensibilidad a daño medio
35,000	18.612	17.865	18.587	— Alta estabilidad
45,000	14.784	22.520	16.694	▼ Inversión leve
55,000	27.459	18.245	30.574	▲ Bimodalidad
65,000	41.083	25.889	31.364	▲▲ Banda crítica de detección (máxima)
75,000	19.075	19.735	12.809	▼ Decaimiento acelerado
85,000	15.147	17.487	18.010	▲ Crecimiento monótono

La banda crítica para el PZT2 es inequívocamente la de 65 kHz, donde se registra el valor más alto de RMSD en todo el estudio (41.083% en el escenario P3)8. Este resultado corrobora la conclusión del análisis con RMSD tradicional: el PZT2 es hipersensible a los cambios iniciales en la rigidez global de la placa central.

La métrica de Tseng muestra que el cambio de forma de la curva en esta frecuencia es

más radical ante la primera pérdida de tensión (100% -> 80. Otro aspecto importante es la banda de 55 kHz, donde el RMSD de P7 (30.574%) supera al de P3 (27.459%). Esto indica que, aunque 65 kHz es la alerta temprana, 55 kHz tiene potencial para distinguir el daño severo.



Comparativas llevadas a cabo en este primer estudio con respecto a la señal de fase.

La comparativa metodológica del RMSD tradicional vs. RMSD modificado indica que:

Característica	RMSD Tradicional (Parte Real)	RMSD Modificado (Tseng)
Rango de Valores	Alto (100% a 230%)	Bajo (10% a 41%)
Foco de Medición	Cambio en Amplitud/Magnitud de la resonancia (energía disipada).	Cambio en la Forma/Patrón de la curva (rigidez modal).
Rol Diagnóstico	Ideal para establecer Umbrales de Alarma Absolutos (ej. si RMSD >	Ideal para Análisis Normalizado y Modelado (menos sensible a ruido)

	200%, disparar alarma).	ambiental que afecte la amplitud global).
Bandas Críticas	PZT1: 45 kHz (P7: 214.29%) y PZT2: 65 kHz (P3: 232.99%)	PZT1: 45 kHz (P7: 31.07%) y PZT2: 65 kHz (P3: 41.08%)

Ambas métricas son complementarias. El RMSD Modificado (Tseng) es más adecuado para modelos de clasificación y regresión que buscan la correlación entre la forma espectral y el nivel de par. El RMSD tradicional ofrece una señal de rango dinámico más alto, lo que facilita la implementación de un simple sistema de "bandera roja" basado en la detección de picos de magnitud. El sistema SHM óptimo debe utilizar el pico del RMSD Modificado a 65 kHz del PZT2 como señal de alerta y el pico del RMSD Tradicional a 45 kHz del PZT1 como indicador de riesgo crítico de fallo para la detección de la pérdida de par para un sistema similar al estudiado.

3 VALIDACIÓN LAS EMPRESAS COLABORADORAS

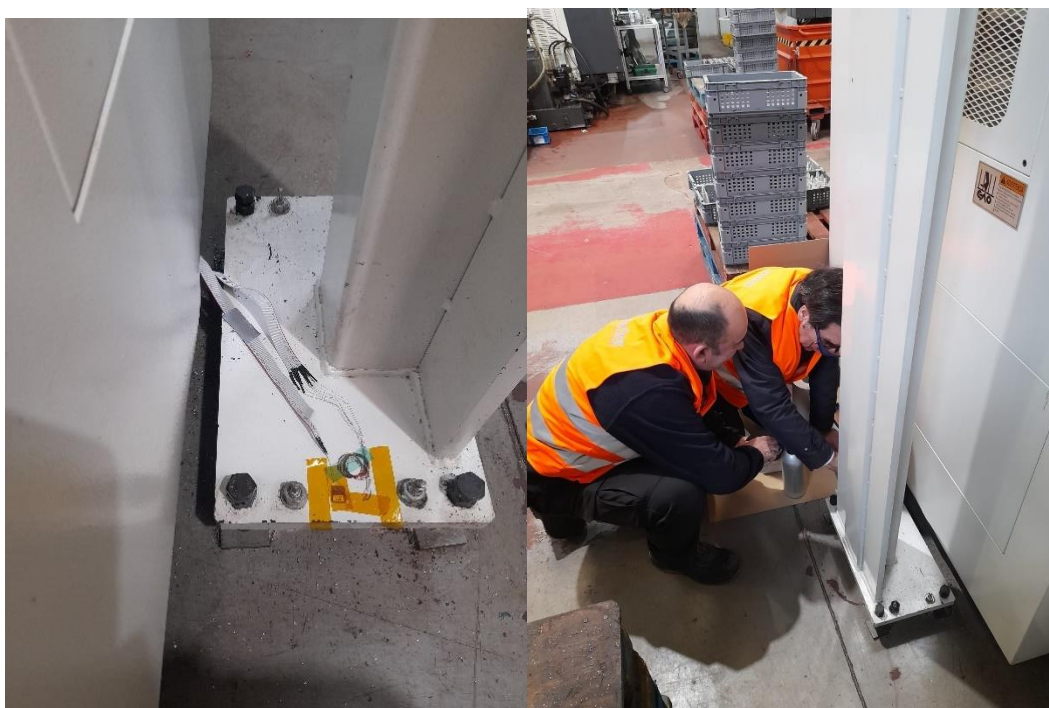
Se ha llevado a cabo la validación en las instalaciones de dos de las empresas colaboradoras a través del estudio de los sensores PZT, y de acelerómetros.

La puesta en marcha de estas validaciones han servido para distinto propósito que pasamos a describir:

- Se ha validado la técnica de los sensores PZT ya que los resultados han dado valores esperados en tanto en cuanto estos han estado cerca de escenarios de pocos cambios
- Se ha podido constatar que la posición de los sensores cerca de los tornillos, actuando de forma pasiva, aumenta la señal sobre todo en el escenario de la empresa TSVA situada en el exterior. Se pueden apreciar cambios de PZT pero despreciables.
- En entornos cerrados, como es el caso de Factor, las señales en comparativa y en algunas frecuencias es nula, lo cual indica estabilidad de la entidad estructural y la no pérdida de par.
- Se ha podido validar la complejidad del procedimiento de pegado de los sensores sobre estructuras reales.
- Se ha constatado que en uno de ellos, Factor, existían niveles de vibración altos, y estos no han afectado a la medida de la señal PZT.



Piezoeléctrico instalado en la marquesina de la empresa colaboradora.



Situación de la colocación de los sensores, entre tornillos

AIDIMME

Instituto Tecnológico

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —