
**ESTUDIO DE LA UBICACIÓN DE SENSORES PIEZOELÉCTRICOS USADOS
EN PROCESOS DE IDENTIFICACION DE DAÑOS SOBRE ESTRUCTURAS
METÁLICAS**

**MILTON JAIR PACHÓN GARCÍA
PAOLO CESAR MORENO PRADO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD INGENIERÍA ELECTRÓNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2018**

**ESTUDIO DE LA UBICACIÓN DE SENSORES PIEZOELECTRICOS USADOS EN
PROCESOS DE IDENTIFICACION DE DAÑOS SOBRE ESTRUCTURAS
METALICAS**

**MILTÓN JAIR PACHÓN GARCÍA
PAOLO CÉSAR MORENO PRADO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

**Director:
Ing. Jaime Vitola**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD INGENIERÍA ELECTRÓNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2018**

Contenido

Introducción.....	5
Antecedentes.	7
Justificación.....	9
Objetivos.	11
Objetivo General.	11
Objetivos específicos.....	11
Marco teórico.	12
Sensores:.....	12
Sensores piezoeléctricos:.....	12
Efecto de las ondas magnéticas en las ondas de ultrasonido:.....	14
Structural health monitoring (SHM):	14
Generación de Señal:.....	17
Forma de Onda de Diagnóstico:.....	17
Ondas de Lamb para la detección de daños:	17
Análisis de componentes principales (PCA):.....	18
Modelo estadístico Q:.....	20
Diseño y ejecución del proyecto.	21
Recolección de información.....	21
Desarrollo del proyecto práctico.	22
Pruebas y Validación.....	22
Resultados del proyecto.....	24
Casos de Estudio.	24
Metodología para la detección de daño.....	26
Pre procesamiento.	27
Construcción del modelo de referencia y el cálculo de los índices de daño usando PCA.....	27
Resultados Experimentales.....	29
1. Prueba Numero 1:	29
2. Prueba Numero 2:	39
3. Prueba Numero 3:	48
4. Prueba Numero 4:	65

Conclusiones.	79
Trabajo a futuro	81
BIBLIOGRAFÍA.....	82

Introducción.

La monitorización de daños en estructuras (SHM por sus siglas en inglés) es un área que tiene como objetivo principal la verificación del estado en el que se encuentra la estructura o la estabilidad de esta misma, con el fin de asegurar el correcto funcionamiento de esta y ahorrar costos de mantenimiento. Para esto se pueden usar sensores que se adhieren a la estructura, junto a una monitorización continua y la aplicación de diferentes algoritmos, permitiendo conocer sobre las estructuras, el desempeño cuando se le aplican cargas y se exponen a cambios ambientales, con el conocimiento del estado actual de la estructura se puede llegar a determinar la integridad de la estructura y definir si esta puede funcionar adecuadamente o si por el contrario debe ser reparada o reemplazada con el beneficio correspondiente del ahorro de gastos de mantenimiento.

El paradigma de la identificación de daños (comparación entre los datos obtenidos de la estructura sin daños y la estructura en un estado posterior para determinar cambios) puede ser abordado como un problema de reconocimiento de patrones. Algunos métodos basados en estadística, como Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés) o Análisis de Componentes Independientes (ICA por sus siglas en inglés) son muy útiles para este propósito que le permite obtener la información más relevante de una gran cantidad de variables.

El presente trabajo de grado hace uso de un sistema piezoeléctrico activo para el desarrollo de algoritmos estadísticos de manejo de datos para la detección de daños en estructuras. Este sistema piezoeléctrico activo está permanentemente adherido a la superficie de la estructura bajo prueba con el objeto de aplicarles vibraciones de excitación y recoger las respuestas dinámicas propagadas a través de la estructura en diferentes puntos.

Como técnica de reconocimiento de patrones se usa Análisis de Componentes Principales para realizar la tarea principal de la metodología propuesta: construir un modelo PCA base de la estructura sin daño y luego hacer la comparación con los datos de la estructura bajo prueba (con daños). Algunos índices son calculados a partir de los datos para detectar anomalías en la estructura bajo prueba. Para la localización de los daños se usan las contribuciones de cada sensor, los cuales son calculados y comparados para mostrar sus ventajas y desventajas. Para la clasificación de los datos, se amplía la metodología de detección haciendo uso del análisis mediante el modelo PCA. Este modelo es usado como referencia para realizar un diagnóstico ciego de la estructura, como técnica de reconocimiento de patrones.

Para estudiar el rendimiento de la metodología de la detección de daños mediante la ubicación de los sensores con configuraciones diferentes, se realizó

diferentes pruebas que usan datos obtenidos de una estructura con daños situados en diferentes puntos de la misma. Las metodologías desarrolladas en este trabajo fueron probadas y validadas usando como material láminas de aluminio.

Antecedentes.

A lo largo de la historia se ha evidenciado que tanto las estructuras civiles como militares pueden presentar fallas por diversas razones entre las que se pueden encontrar: golpes, movimientos bruscos, la exposición al medio ambiente e incluso por el deterioro de las estructuras generadas por el transcurrir del tiempo. (1).

Con el objetivo de identificar daños en estructuras, la ingeniería idea la monitorización de daños de estructuras adhiriendo de un conjunto de sensores permanentemente a la estructura para su inspección. Sin embargo, en la actualidad se cuentan con muy pocos estudios que permitan asegurar con exactitud la cantidad necesaria de sensores o la posición exacta en la estructura a analizar con la que se deben ubicar cada uno de ellos para determinar con eficiencia el monitoreo del estado actual que presenta una estructura con referencia a su estado saludable.

En la monitorización existen dos tipos de daños: lineal y no lineal (2). El daño lineal es aquel que sufre una estructura pero que no le hace perder sus propiedades elásticas, por lo cual las ecuaciones que representan el movimiento de la estructura total pueden seguir siendo utilizadas. El daño no lineal es aquel en el cual las ecuaciones de movimiento cambian por completo, debido a una variación en la respuesta natural de la estructura. Por lo general, la monitorización de salud estructural se realiza, tomando en cuenta el daño lineal debido a las dificultades en el modelado con daño no lineal (2). Según Rytter, los niveles de diagnóstico o identificado del daño se clasifican en cuatro (3):

Nivel 1: Determinación de la existencia de daño en la estructura.

Nivel 2: Nivel 1 más la localización geométrica del daño.

Nivel 3: Nivel 2 más la cuantificación del daño.

Nivel 4: Nivel 3 más la predicción del tiempo de vida restante de la estructura, también conocido como pronóstico.

Los estudios realizados en el monitoreo de salud estructural se han venido trabajando desde comienzos del siglo XX (22), en un principio en estructuras netamente, durante esa época las técnicas empleadas eran visuales o auditivas. Actualmente, gracias al avance tecnológico y computacional, las técnicas son basadas en principios físicos y los análisis son más profundos con respecto a los anteriores. Las técnicas actuales permiten analizar una estructura por medio de su respuesta dinámica, evaluándola con resultados matemáticos. Difícilmente se puede obtener una caracterización real del daño, por lo cual es de gran importancia solventar este tipo de problema y es ahí donde los métodos actuales poseen gran importancia permitiendo ajustar el error que se presenta con el cambio dinámico de las estructuras (4).

Para la estimación de la ubicación y la cuantificación del daño se han venido desarrollando algunas estrategias, entre las desarrolladas actualmente, están las basadas en los cambios de las formas modales que consisten en un modelo teórico-experimental empleando ensayos para encontrar parámetros modales y monitorizar sus cambios con el transcurso del tiempo.

También se han dado aportes por parte de los métodos de reconocimiento de patrones, consistiendo este en el reconocimiento y clasificación de características mediante algoritmos computacionales que se encargan de comparar con datos ya obtenidos para tomar una decisión sobre el estado de la estructura (5).

Por otro lado, los métodos de sensibilidad son utilizados para determinar los cambios generados en los sensores por las vibraciones mecánicas y así obtener la configuración adecuada con referencia a la posición de los mismos (6).

Las Redes neuronales artificiales también han dado positivos resultados, que permiten comparar y determinar una relación que indica, tras el aprendizaje de la red, cual es la ubicación del daño (7).

A continuación, se muestran algunos proyectos existentes sobre SHM:

Instrumentación Para El Monitoreo De La Salud Estructural: Medición De Intervalo Drift. D.A. Skolnik; W.J. Kaiser; J.W. Wallace: Un auge en la construcción de edificios altos junto con la revisión por pares de diseños alternativos basados en el rendimiento de problemas fundamentales recientemente expuestos en el campo de la ingeniería sísmica.

En este trabajo se realiza el SHM para las estructuras con resistencia sísmica. (Link: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_11-0089.PDF).

Monitoreo De La Salud Estructural Con Sensores Inteligentes. Tomonori Nagayama. B.E., University of Tokyo, 2000. M.E., University of Tokyo, 2002: Sensores inteligentes, con sus capacidades computacionales y de comunicación a bordo, pueden ofrecer nuevas oportunidades para SHM. En este trabajo se centra en el SHM con el uso de algoritmos para sensores avanzados.

Sensación inalámbrica in situ para el control de salud estructural distribuido. Nestor E. Castañeda: Los sensores inalámbricos se han convertido en una solución prometedora y novedosa para aplicaciones de monitoreo de la salud estructural (SHM) durante los últimos tiempos. Debido a sus bajos costos de implementación y capacidades computacionales integradas, el monitoreo de las condiciones estructurales a una resolución espacial sin precedentes es una posibilidad a corto plazo.

Justificación.

Si bien a través del tiempo la ingeniería ha ideado miles de formas para evidenciar la necesidad de nuevos métodos más eficaces y económicos que permitan evitar problemas en la salud de las estructuras y esto ha llevado a la búsqueda de soluciones en otras ramas de la ingeniería. Todo esto ha orientado a la integración de sistemas basados en sensores y dispositivos programables, con el fin de realizar procesos automatizados de análisis de estructuras, algunos de estos en tiempo real. Estos sistemas adquieren, almacenan y analizan señales provenientes de un conjunto de sensores piezoeléctricos para un constante monitoreo de la salud de estructuras con métodos de análisis de manera no destructivos (el monitoreo nunca es destructivo) (8).

Debido a grandes catástrofes provocadas por deterioro en diferentes estructuras (civiles, aeronáuticas, aeroespaciales, entre otras), es necesario tener un esquema tecnológico para prevenir y diagnosticar posibles fallas que puedan generar un mal desempeño de las estructuras ante diferentes cambios en las condiciones de operación y ambientales a las que están sujetas durante su vida útil. Actualmente existen diversas soluciones para el monitoreo de daños en estructuras, todas estas a nivel investigativo, sin embargo, existen muy pocos estudios sobre la ubicación de sensores y su efecto en la detección de daños bajo metodologías conocidas, por lo que se hace necesario adelantar estudios en este sentido.

Dentro de los esquemas actuales, los sensores usados se ubican de forma aleatoria, costumbre que puede llevar a la pérdida de información valiosa, por lo cual el siguiente trabajo se dedica a determinar cuál debe ser la ubicación de los sensores a lo largo de una estructura para realizar un monitoreo efectivo y tener un criterio para establecer la adecuada cantidad de sensores para un correcto desempeño en el proceso de detección de daños actualmente el monitoreo de las estructuras se lleva a cabo mediante el análisis de la información de señales tomadas de diferentes dispositivos como lo son los sensores piezoeléctricos, acelerómetros, entre otros. Estos dispositivos deben estar ubicados de diferentes formas en las estructuras, las cuales no siempre arrojan un resultado óptimo al momento del análisis.

Resultados de una pésima monitorización de las estructuras o por otro lado por falta de esta misma se han visto reflejados alrededor de todo el mundo, que van desde pequeños accidentes a grandes desastres los cuales han llegado en su mayoría a cobrar vidas, un claro ejemplo de esto en Colombia ha sido el desplome del edificio residencial Space, ubicado en la ciudad de Medellín en el sector El Poblado; no cabe duda que el desastre ha sido un error de ingeniería en cuanto a su diseño como la mayoría de medios informativos y varios estudios lo han revelado. He aquí en este punto donde SHM entra a jugar su papel más importante el cual como se ha venido describiendo es el de supervisar que tan saludable está la

estructura para así poder tomar decisiones y evitar accidentes o catástrofes con su uso.

Es por esto que el presente proyecto estudia el efecto de ubicar los sensores sobre la estructura, mediante varias pruebas realizadas sobre esta misma, aplicando un algoritmo computacional para así encontrar un modelo de distribución óptimo comparados con algunos ya descritos, con el objetivo de reducir costos en cuanto a la implementación del sistema de monitorización.

El monitoreo adecuado de las estructuras permite el mejor escenario posible para impactar la eficiencia del manejo de recursos (es decir económico), a su vez impacta en la disminución de accidentes o incidentes laborales, lo que es un gran impacto social, dado que disminuye la brecha entre las condiciones laborales, esto en cuanto el riesgo que posee un trabajo predeterminado (como el trabajo de un obrero). Al haber una mejora en los temas económicos y laborales, se verá un beneficio social general en el entorno en que los trabajadores y usuarios usen las estructuras.

El monitoreo del estado de estructuras permite conocer las condiciones de las estructuras, de tal manera que se garantice que las estructuras puedan tener un ciclo de vida útil mayor al que tendrían si un análisis debido y así la cantidad de materia prima necesaria para reemplazar las piezas disminuirá generando un beneficio positivo contribuyendo a los problemas generados del cambio ambiental y social donde el SHM se representa mediante un campo clave, la seguridad y como consecuencia, se verá optimizada la calidad de vida de los usuarios finales con respecto a sistemas que nunca son monitoreados, que proveerá desarrollo social y un diseño universal. Por otra parte, el monitoreo continuo de estructuras permite tanto a trabajadores y usuarios (es decir personas que usan con regularidad las estructuras) defender el derecho a la vida, porque el monitoreo SHM garantiza una mejora en el área de la seguridad.

Objetivos.

Objetivo General.

Diseñar e implementar una metodología para la selección de la ubicación de sensores piezoeléctricos sobre estructuras metálicas.

Objetivos específicos.

- Estudiar el problema de monitorización de daños en estructuras metálicas
- Desarrollar una metodología para determinar el mínimo número de sensores y su ubicación en placas de aluminio usando sistemas piezoeléctricos activos.
- Validar los resultados usando un algoritmo de detección de daños basado en análisis multivariable.
- Evaluar la metodología en piezas metálicas.

Marco teórico.

Sensores:

Un sensor es un dispositivo que es capaz de convertir una señal física de cualquier índole, generalmente a una señal física de tipo eléctrico, siendo importantes ya que por medio de estos se pueden monitorear el estado de algún proceso, generalmente la señal final de un sensor es enviada a un indicador o un controlador para poder interpretar correctamente la señal de salida. En el momento de diseñar sistemas de adquisición de datos a través de un computador es necesario tener en cuenta características básicas acerca de los sensores (10):

- Precisión.
- Tiempo de respuesta.
- Coeficiente de temperatura.
- Histéresis.

Sensores hay de todo tipo y con todo fin, por ejemplo:

- Sensores de posición, que basan su funcionamiento en la emisión de una señal luminosa.
- Sensores por contacto, que funcionan tan pronto entran en contacto con un objeto.
- Sensores de circuitos oscilantes, quienes detectan objetos tan pronto interrumpen su oscilación.
- Sensores por ultrasonido, quienes envían una señal a un receptor e identifican un objeto cuando este interrumpe la señal enviada.
- Sensores de esfuerzo, entre estos los piezoeléctricos, quienes generan una variación de voltaje al aplicárseles una fuerza.
- Sensores de movimiento, los más comunes en el mercado, que detectan deslizamiento, velocidad o aceleración.

Sensores piezoeléctricos:

El uso de materiales inteligentes, también conocidos como agregados inteligentes, es más que común en el área de monitoreo de salud de estructuras dada su precisión y la múltiple información que brindan del estado de la una estructura sin importar si esta es civil, aeronáutica o demás. Los sensores piezoeléctricos hacen parte de una amplia gama de materiales inteligentes que han sido desarrollados para el monitoreo de salud de diversos tipos de estructuras.

Si bien el efecto piezoeléctrico fue descubierto en 1880 por Pierre Curie, no fue sino hasta la segunda guerra mundial, en 1939, que inició el desarrollo de materiales y dispositivos de este tipo. Este efecto fue empleado con el fin de perfeccionar la tecnología nuclear, creando grandes estructuras con la característica de resistencia a todo tipo de ataques; es así como empieza el uso de piezoeléctricos en el monitoreo de estructuras (11).

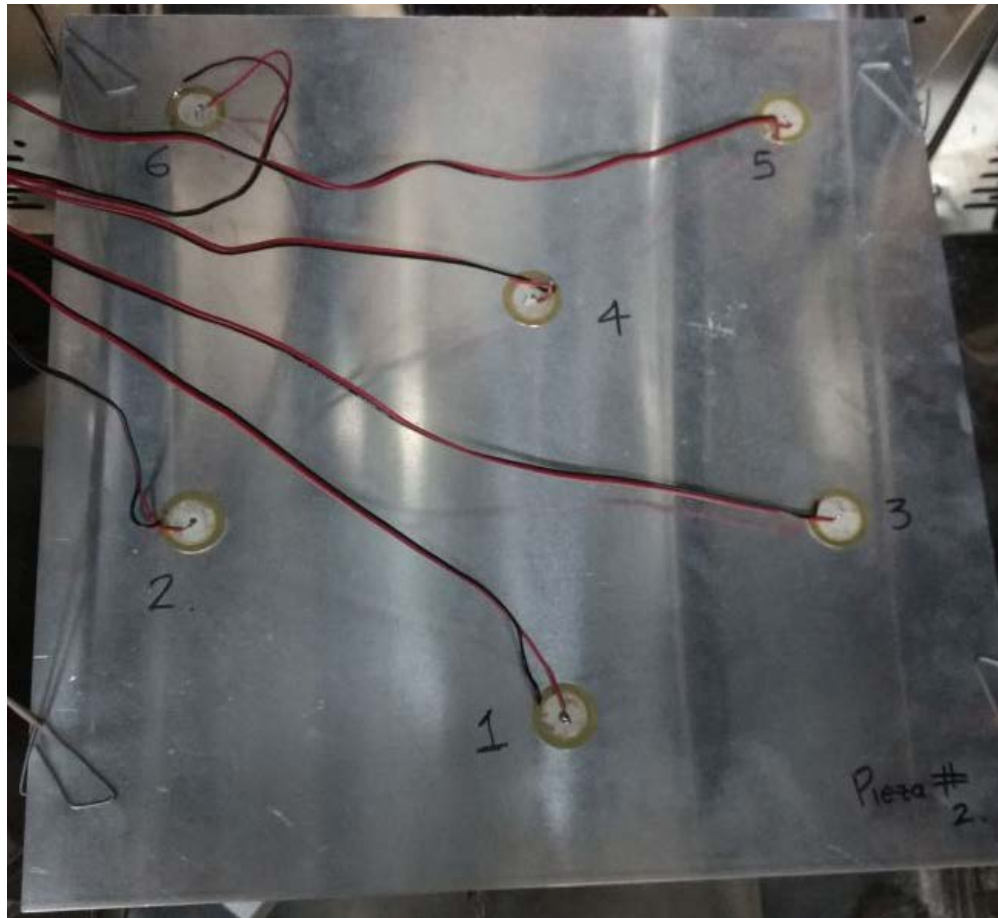


Figura 1. Placa de aluminio con sensores piezoeléctricos implementada en trabajo de grado. Fuente: Autores. ⁱ

Más adelante, y superada la crisis de la postguerra, se continua con las aplicaciones de piezoeléctricos en el monitoreo de estructuras, generando nuevos desarrollos con el uso de los sensores realizando toma de datos llamados “datos in situ”, que son datos tomados en tiempo real, y por lo mismo se inicia la construcción de redes sensoriales, que no difieren en nada a las redes neuronales, bien artificiales o naturales, que permiten la recopilación de datos de la evaluación de daños en distintas partes de la estructura para concluir en un análisis bastante preciso de la salud de la misma (12).

Efecto de las ondas magnéticas en las ondas de ultrasonido:

Para provocar en determinado medio una onda ultrasonora son necesarios dispositivos llamados generadores de ultrasonido. Los equipos de generación de ultrasonidos, constan normalmente de un elemento primario o transformador llamado transductor, en contacto con el medio, y de una fuente que proporciona la energía que ha de transportarse. El término transductor se refiere a cualquier dispositivo que transforme el efecto de una causa física en otro tipo de señal, normalmente eléctrica. Los transductores de ultrasonido, convierten una energía dada, sea eléctrica, magnética o mecánica, en otra de tipo mecánico que se propaga en forma de onda con una frecuencia característica en el rango ultrasónico. [30]

Structural health monitoring (SHM):

El SHM (Structural Health Monitoring) tiene como objetivo principal el análisis y detección de características irregulares en estructuras para determinar el estado real, partiendo de varios métodos para inspeccionar y determinar su estado, en los cuales se puede determinar la detección de daños, localización, clasificación, identificación y predicción del daño, que en cualquier caso, se puede asociar con un cambio que tenga la placa o estructura que se examina con relación a un estado inicial que tenga esta, asimismo el análisis con regularidad de estas estructuras o placas puede proporcionar un pronóstico acerca del tiempo de vida útil, el tipo de daño y su evolución. El SHM se aplica basándose en la integración de sensores, que permitan estudiar el comportamiento natural de una estructura, para luego detectar características inusuales que permitan distinguir y posteriormente realizar análisis con el fin de evitar problemas graves que generen una situación crítica en la estructura o un costo elevado de la reconstrucción de dicha estructura.

La localización de daños es la segunda etapa o nivel que tiene el análisis SHM y es aquí donde el desarrollo de esta tesis gana importancia para los trabajos futuros que se realicen, ya que la localización de un daño depende en gran parte de la cantidad de sensores y la configuración o ubicación que tenga cada uno de ellos a lo largo de la estructura. Según estudios realizados por Salehian [18] afirma que cuando los elementos a analizar son de materiales isotrópicos basta con usar 3 sensores para poder identificar los daños, pero cuando son materiales anisótropicos su análisis es más complejo. El tercer nivel corresponde a la clasificación de daños y corresponde de acuerdo a características que surgen en la placa o estructura que se analiza después de un estado inicial, tomándose como un daño cualquier cambio que tome esta, y mediante estos cambios poder determinar que realmente hay presente un daño en la estructura o placa. A continuación, se muestran algunos trabajos realizados.

Sohn et al en 2002 [19] realizó un trabajo sobre la clasificación de daños bajo cambios ambientales desarrollando un modelo que extrae las características de la placa que luego son usadas por una red neuronal que normaliza los datos y separa

efectos que son causados por los cambios ambientales y finalmente se realizaron pruebas de relación de probabilidad secuencial para definir el estado del sistema.

J. Mujica. [20] [21] Utilizo la transformada Wavelet como metodología para detectar ubicar y cuantificar los daños, la metodología consistía en recoger las características posteriores a un estado inicial y aplicarlas a una red neuronal para clasificar los daños.

El pronóstico de daños es el pico en el análisis SHM, el cual incluye cuantificar el daño en la estructura o placa con el fin de determinar el estado final de la placa y el tiempo de vida útil que le queda, así mismo determinar si es posible en qué condiciones puede seguir operando o funcionando esta, ya que es el nivel más avanzado en el análisis de SHM los trabajos que se encuentran son muy pocos algunos de estos son:

Staszewski en 2000 [22] Realizó un trabajo con enfoque a las técnicas de extracción y tratamiento de datos previos en los cuales el procedimiento consistió en el reconocimiento de patrones que permitió a fin obtener el diagnóstico de la ubicación y poder determinar qué tan grave podrían ser los daños.

En 2003, Farrar [23] Presentó un enfoque para desarrollar una solución de pronóstico de daños (PD) desarrollada el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Este enfoque integra tecnología de detección avanzada, procedimientos de interrogación de datos para el conocimiento estatal, validación de nuevos modelos y para el pronóstico de daño mediante la integración de la tecnología de detección avanzada, aplicaron la “detección de daños basada en un enfoque estadístico de reconocimiento de patrones” así mismo publicaron un artículo sobre la validación de modelos y técnicas, la clasificación, cuantificación, y algoritmos de toma de decisiones para la rehabilitación de las estructuras.

En 2007 Farrar y Lieven [24] presentan algunos conceptos generales de pronóstico de daños, también se incluyó una revisión de las tecnologías emergentes que tendrán un impacto en el proceso de pronóstico de daños.

En 2010, Zhang et al. [25] presentó un enfoque que incluye el uso de sensores piezoeléctricos y un marco de mecánica de fractura probabilísticos basados en la evaluación y actualización de la resistencia a la fatiga restante de puentes de acero en línea.

En 2012, Ling y Mahadevan [26] presentaron una metodología probabilística bayesiana, basada en un modelo SHM, teniendo en cuenta las diversas fuentes de incertidumbre y errores. La metodología fue probada en un ejemplo numérico, teniendo en cuenta la superficie de formación de grietas en un mástil de un avión de carga.

Dentro de las ventajas del monitoreo de estructuras se encuentra la captura de información por medio de los sensores en tiempo real o periodos que permitan compararlo con un modelo saludable con la finalidad de comprobar la confiabilidad de la estructura y generar una reducción tanto de tiempo como de costos al momento de realizar reparaciones. Entre otras ventajas, de acuerdo al análisis de los datos obtenidos de las estructuras, se puede llegar a obtener un modelo que se aproxime a la predicción del tiempo exacto de vida útil y tomar acciones preventivas o determinar el tipo de daño que presenta.

Un modelo simplificado de un sistema de SHM se muestra en la figura 2.

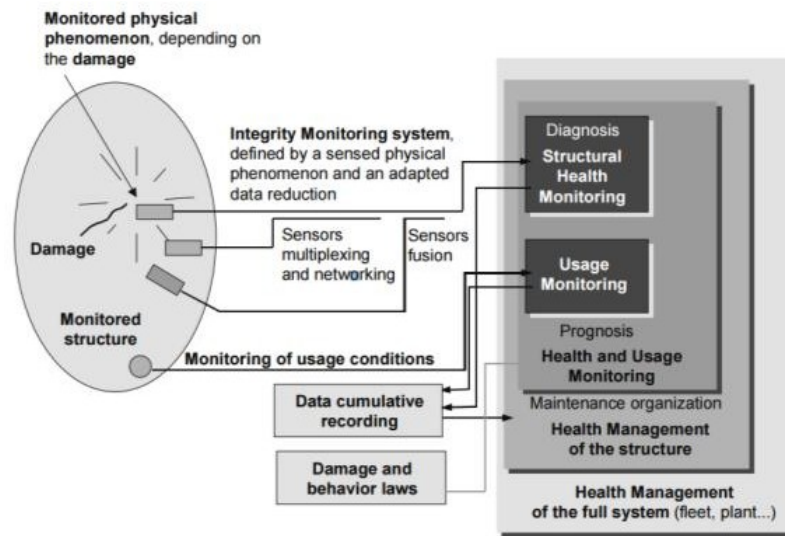


Figura 2. Diagrama, principio y organización de un modelo SHM. Fuente: Daniel Balageas. ⁱⁱ

La primera parte del sistema, que corresponde a la supervisión de la integridad estructural que se puede definir por el tipo de daño que presente la estructura, que es monitoreado por el sensor el cual es usado para producir una señal (generalmente eléctrica) que es enviada al subsistema de adquisición y almacenamiento. La unificación de varios sensores del mismo tipo constituyen una red pueden multiplexarse y sus datos fusionarse para determinar características en el modelo SMH, ahora la señal entregada por el subsistema de monitoreo de la integridad en paralelo con los datos previamente registrados, es utilizado por el controlador para crear un diagnóstico de cómo se encuentra el sistema que luego mezclado con la información de la integridad de la estructura y con el conocimiento basado en la mecánica de daños y las leyes de comportamiento hace posible determinar el pronóstico (vida residual) y el manejo de la salud de la estructura (organización de mantenimiento, operaciones de reparación, etc.). Finalmente, la integración de todos estos procesos constituye un tipo de súper sistema (una flota de aviones, un grupo de centrales eléctricas, etc.)

Generación de Señal:

Forma de Onda de Diagnóstico:

Un actuador piezoeléctrico puede generar ondas de diagnóstico que se pueden propagar a lo largo de una estructura para verificar si hay daños o no. Se debe elegir una forma de onda de diagnóstico adecuada para hacer el proceso de interpretación mucho más fácil. [31]

Ondas de Lamb para la detección de daños:

De acuerdo con el programa NSF-ATE (Educación Tecnológica Avanzada (15) las ondas de Lamb son ondas vibratorias complejas (mecánicas o acústicas) que tienen gran relevancia en los métodos para ensayos no destructivos en el estudio de materiales que se propagan en paralelo a la superficie del material a través de su grosor. La propagación de las ondas de Lamb depende de la densidad y las propiedades elásticas del material. Estas también son influenciadas por la frecuencia de la prueba y el espesor del material. Las ondas de Lamb viajan varios metros sobre el acero y así son útiles para explorar las placas, alambres y tubos.

Hay dos grupos de ondas, las ondas simétricas y las ondas asimétricas. Las velocidades de estas ondas dependen de la frecuencia y el grosor de la placa (relación de dispersión). La relación de dispersión se encuentra por solución numérica de la ecuación de Rayleigh-Lamb:

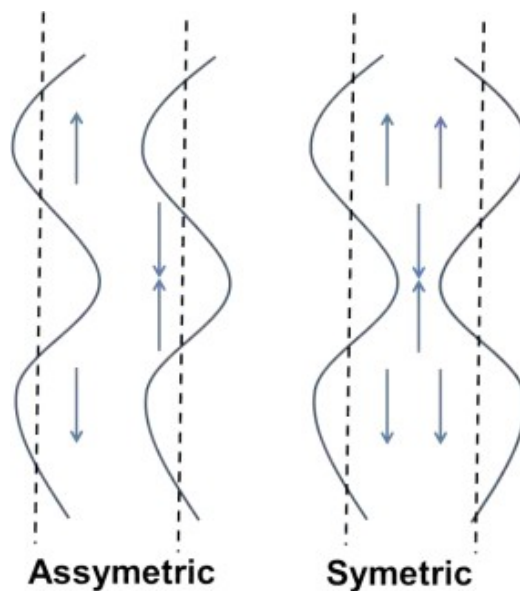


Figura 3. Modos de Vibración, Fuente: Tibaduiza Burgos, Diego Alexander. ⁱⁱⁱ

$$\frac{\tan(\bar{d}\sqrt{1-\alpha^2})}{\tan(\bar{d}\sqrt{\beta^2-\alpha^2})} + \left[\frac{4\alpha^2\sqrt{1-\alpha^2}\sqrt{\beta^2-\alpha^2}}{(2\alpha^2-1)^2} \right]^{\mp 1} = 0$$

(+1 para raíces simétrica; -1 para raíces asimétricas).

$$\alpha^2 = \frac{c_f^2}{c_{yh}^2}, \beta^2 = \frac{c_t^2}{c_f^2}, \bar{d} = \frac{k_f h}{2}$$

$$c_f^2 = \frac{\mu}{\rho}, c_t^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, k_f = \frac{\omega}{c_f}$$

Donde:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \lambda = \frac{Ev}{(1-2\nu)(1+\nu)}$$

Con un material dado, el modulo E de Young, la relación V de Poission y la Densidad p, la velocidad de fase C y el producto de frecuencia-espesor wh, debe resolverse de forma iterativa. [31]

En este trabajo se implementó las ondas de Lamb, pero no se hizo un estudio físico de su propagación.

Análisis de componentes principales (PCA):

El análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica de análisis multivariable que se implementa en la detección de daños con el fin de reducir un complejo conjunto de datos a una dimensión inferior y revelar algunos patrones simplificados que están ocultos en la estructura que se examina. El objetivo del análisis de componentes principales es obtener la información más importante de los datos. Con el fin de desarrollar un modelo PCA es necesario organizar los datos recogidos en una matriz X. Esta matriz $m \times n$ contiene la información de los n sensores y m ensayos experimentales. Como las variables físicas y sensores tienen diferentes magnitudes y escalas, cada punto de datos se escala utilizando la media de todas las mediciones del sensor al mismo tiempo y la desviación estándar de todas las mediciones del sensor. (17) A continuación algunos de los objetivos de realizar este análisis.

Objetivos del análisis de componentes principales (27)

- El análisis PCA reduce el espacio de atributo de una gran cantidad de variables a un número menor de factores y, como tal, es un procedimiento "no dependiente" (es decir, no supone un variable dependiente específica).

- El análisis PCA es una reducción de dimensión o método de compresión de datos.
- Para seleccionar un subconjunto de variables de un conjunto más grande, basado en el cual las variables originales tienen las correlaciones más altas con el componente principal.
- El análisis de componentes principales (PCA) es un procedimiento matemático que transforma una cantidad de (posiblemente) variables correlacionadas en un (menor) número de variables no correlacionadas llamadas componentes principales.
- El primer componente principal representa tanto la variabilidad en los datos como sea posible, y cada componente subsiguiente representa la mayor parte de la variabilidad restante como sea posible.

El análisis multivariado a menudo comienza con datos que involucran un número sustancial de variables correlacionadas, siendo una herramienta de reducción de dimensiones que se puede usar para reducir un gran conjunto de variables a un conjunto pequeño que todavía contiene la mayor parte de la información en el conjunto grande, actuando similarmente a otro procedimiento multivariante llamado Análisis de Factores y son a menudo confundidos y muchos científicos no entienden la diferencia entre los dos métodos o qué tipos de análisis son los más adecuados, tradicionalmente, se realiza el análisis de componentes principales en una matriz simétrica cuadrada que puede ser una matriz SSCP (sumas puras de cuadrados y productos cruzados), matriz de covarianza (sumas escaladas de cuadrados y productos cruzados), o matriz de correlación (sumas de cuadrados y productos cruzados a partir de datos estandarizados). Los resultados de análisis para objetos de tipo SSCP y la covarianza no difieren, ya que estos objetos solo difieren en un factor de escala global y se usa una matriz de correlación si las varianzas de las variables individuales difieren mucho, o si las unidades de la medida de las variables individuales difieren.

La matriz $SSCP(A)$ Sumas de cuadrados y productos cruzados. Devuelve una matriz cuadrada que tiene tantas filas (y columnas). Los valores diagonales son sumas de cuadrados y los valores fuera de la diagonal son sumas de productos cruzados. $SSCP(A)$ es igual a $A'A$ que en matrices es conocida como matriz transpuesta. Así cada vez que vea la notación de la matriz $X'X$ o $D'D$ o $Z'Z$, el producto resultante será una matriz SSCP.

Modelo estadístico Q:

El Q- estadístico denota el cambio de los eventos que no son explicados por el modelo de componentes principales PCA. Es una medida de la diferencia, o residual entre una muestra y su proyección en el modelo. Q- estadístico es un modelo sensible. Esto se debe a que Q es muy pequeño y, por lo tanto, cualquier cambio menor en las características del sistema será observable. La información sobre los eventos también se puede obtener directamente del trazado de los puntajes para los componentes principales relevantes. Cuando hay un cambio en el sistema, los puntajes de los nuevos eventos serán diferentes de los puntajes anteriores, y se detectará el cambio. Sin embargo, esta información también se incluye en la estadística T^2 de Hotelling ya que se calcula utilizando los puntajes. Además, la estadística Q proporciona información adicional que no está incluida en la gráfica de scores PCA, porque está relacionada con variaciones que no son consideradas por el modelo. De esta forma, las representaciones de Q y T^2 son pruebas de hipótesis que distinguen claramente los experimentos con el comportamiento anormal, mientras que la inspección por scores es una herramienta cualitativa. (28)

Diseño y ejecución del proyecto.

El presente proyecto se dividió en 3 grandes etapas que son: recolección de información, desarrollo del proyecto, pruebas y validación.

Recolección de información.

La recolección de información fue el proceso mediante el cual dio inicio a la definición del problema, ya que se realizó una búsqueda de estudios hechos previamente donde se evidenciaron el uso de sensores para determinar daños en las estructuras, mas no se encontró información en la cual se aplicó algún método que determinara la ubicación que deberían tener los sensores para detectar los daños con mayor exactitud. Luego de obtener información suficiente se abarcaron las posibles soluciones de este, así mismo esta etapa incluyo la creación de este documento el cual a su vez se ha subdividido en 7 etapas:

Revisión documental para la construcción del documento: selección y clasificación de material bibliográfico para la construcción del anteproyecto.

Estudio de la problemática: fase en la cual se estableció el área que abarcaba la investigación con el fin de establecer el problema que ayudo a la definición del objetivo general de este trabajo, a determinar los límites de acción y a contextualizar el trabajo en la actualidad.

Elaboración de la justificación: en esta etapa se planteó las razones principales que e impulsaron la investigación y con qué fin se realizaron.

Descripción de los antecedentes: recuento histórico de la evolución y tratamiento que se ha dado al problema y los avances que se han registrado de lo mismo.

Determinación de los objetivos del proyecto: etapa en la cual se determinó los objetivos que cumplió el trabajo. Se determinó un objetivo general, que fue la meta final a cumplir, y varios objetivos específicos, que ayudaron a llevar un progreso considerable en la investigación.

Elaboración del estado del arte: consulta de la bibliografía que fue seleccionada anteriormente, para determinar qué información sería usada y cual sería innecesaria.

Identificación de dispositivos a utilizar y primera prueba realizada: una vez realizada la debida investigación haciendo uso de la bibliografía seleccionada, esta etapa establecerá cuáles fueron los dispositivos y materiales que se requirieron para

realizar las debidas pruebas. Una vez estas fueron realizadas se presentó un informe de resultados.

Desarrollo del proyecto práctico.

El desarrollo práctico estableció la etapa de funcionamiento y experimento. Presenta la sustentación práctica de la solución que se dio al problema que se planteó. Está compuesto por cuatro etapas:

1. Realización de pruebas: Por medio de cuatro placas en aluminio de dimensiones 250mm x 250mm x 2 mm, se ubicó en cada placa una cantidad determinada de sensores piezoeléctricos con una configuración diferente para cada una, adhiriéndolas con materiales que no interfieren en cambios físicos de las placas en el momento de ser analizadas por medio del programa de simulación Matlab.
2. Recolección de datos: En esta etapa se realizó el proceso de recolección de datos que arrojó cada una de las cuatro placas que se analizaron, las pruebas recolectadas se cargaron y se analizaron en el algoritmo de extracción de componentes principales e índice estadístico Q desarrollado en Matlab.
3. Análisis e interpretación: Según la metodología aplicada para la identificación del estado de las estructuras en prueba, (gráficos de scores PCA e índice estadístico Q) se realizó un análisis gráfico donde se evidencio, según la varianza acumulada o la diferencia muestra a muestra respectivamente, cuál de las dos fue la metodología más eficiente teniendo en cuenta el número de sensores utilizados en cada prueba.
4. Elaboración de informe: Según el proceso realizado y el análisis de cada prueba anteriormente descrita, se realizó una descripción profunda de los resultados de los datos arrojados en cada una de las pruebas analizando las diferentes metodológicas (graficas de scores PCA e Índice Q) con las cuales finalmente se concluyó cual placa con su respectiva configuración y que metodología fue la que obtuvo el mejor resultado detectando los daños realizados sobre la plata.

Pruebas y Validación.

Está compuesto por dos etapas, las cuales sirvieron de comprobación de que el proceso que se realizó durante el tiempo que duro el proyecto fue efectivo y logro cumplir con los objetivos descritos al igual que dio una solución al problema planteado

Las pruebas y validación de los resultados fue el proceso en donde se comparó los objetivos establecidos frente a las conclusiones arrojadas durante el desarrollo del proyecto practico, es decir, se dio una respuesta a la siguiente pregunta ¿El o las metodologías utilizadas en este documento concluyeron de forma satisfactoria frente al problema planteado?

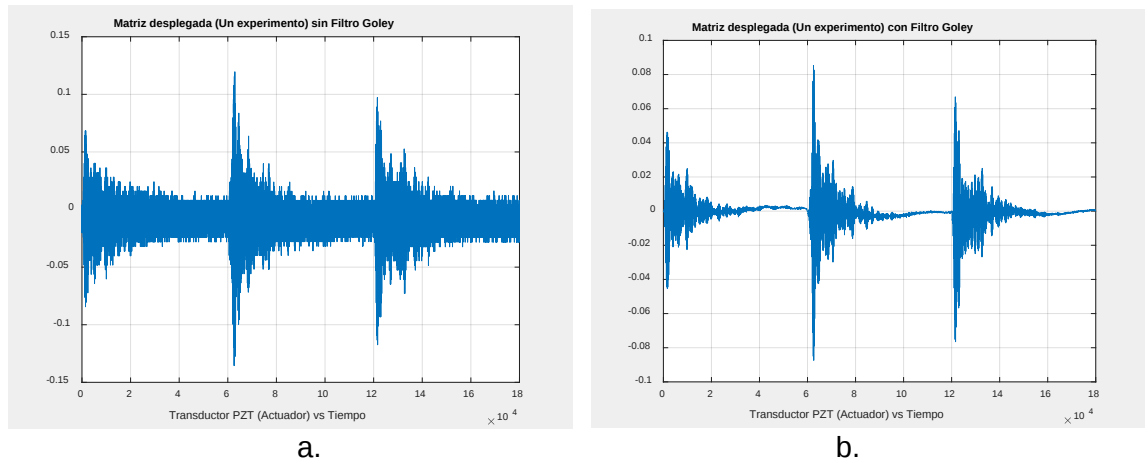
Resultados del proyecto.

Casos de Estudio.

La metodología presentada en este trabajo de grado fue sometida a pruebas experimentales utilizando, en particular, 4 placas de aluminio con configuraciones aleatorias de la ubicación de los sensores. A continuación, se incluye más información sobre las características físicas y los daños aplicados.

Se utilizaron placas de Aluminio con dimensiones (250 mm x 250 mm x 2mm) Como se observa en las figuras 10, 27, 40 y 73. Cada uno de las placas fueron equipadas con 4, 4, 8 y 6 transductores respectivamente.

Los daños en cada una de las placas se simularon mediante la adición de masas magnéticas en diferentes posiciones de la superficie (Figuras 10, 27, 40 y 73). Como entrada de excitación, se aplicó una señal BURST. Para determinar la frecuencia central de la portadora de dicha señal se realizó un barrido en frecuencia y se exploró el análisis espectral. Se definió a partir de los resultados del análisis una señal BURST con 10KHz y 10 picos.



a. b.
Figura 4. Respuestas de vibración recogidas por 3 transductores piezoeléctricos. a) Experimento sin filtro Goley. b) Experimento con filtro Goley. Fuente: Autores.

La recolección de los datos de los experimentos se realizó en diferentes fases siendo cada una de ella un transductor PZT, es decir, para la placa de la Figura 10, se tienen 4 fases mientras que para la placa de la Figura 40 se tiene 8 fases. Para cada una de las fases se seleccionó un transductor PZT como actuador, se le aplicó la señal de excitación BURST y las respuestas de vibración en diferentes posiciones se recogieron mediante los otros transductores PZT.

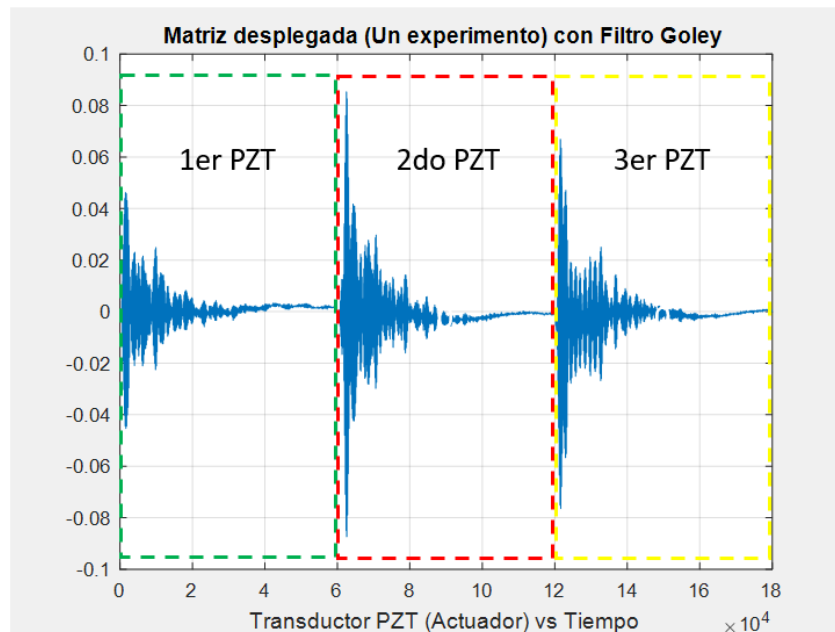


Figura 5.) Identificación de las respuestas recogidas por cada transductor involucrado en la prueba. Fuente: Autores.

Para el análisis, el número registrado de experimentos cambió según la cantidad de sensores equipados en cada uno de las placas como también el número de daños simulados, a continuación, una pequeña tabla donde se resume la información de cada uno de los elementos bajo inspección.

Referencia Placa	Número total de experimentos.	Registros con la Estructura Sana	Registro por cada daño.
Prueba 1	1500	300	300
Prueba 2	1500	300	300
Prueba 3	2160	240	240
Prueba 4	2100	300	300

Tabla 1. Resumen de los experimentos.

Todos los datos se promediaron para obtener una señal cada 3 experimentos con el fin de eliminar el posible ruido en los datos.

En la figura 6, es claro evidenciar la atenuación que presenta los transductores piezoeléctricos respecto al último, debido probablemente a la distancia que se encuentra este del sensor que está funcionando como actuador para esa prueba o también se puede deber a las condiciones físicas del mismo transductor, es decir, puede presentar alguna perturbación en la superficie al momento en el cual fue adherido a la estructura. Sin embargo, para cualquiera de las dos opciones, las

atenuaciones de las otras respuestas no se opacan respecto a la última, por tal razón es una prueba con respuestas exitosas.

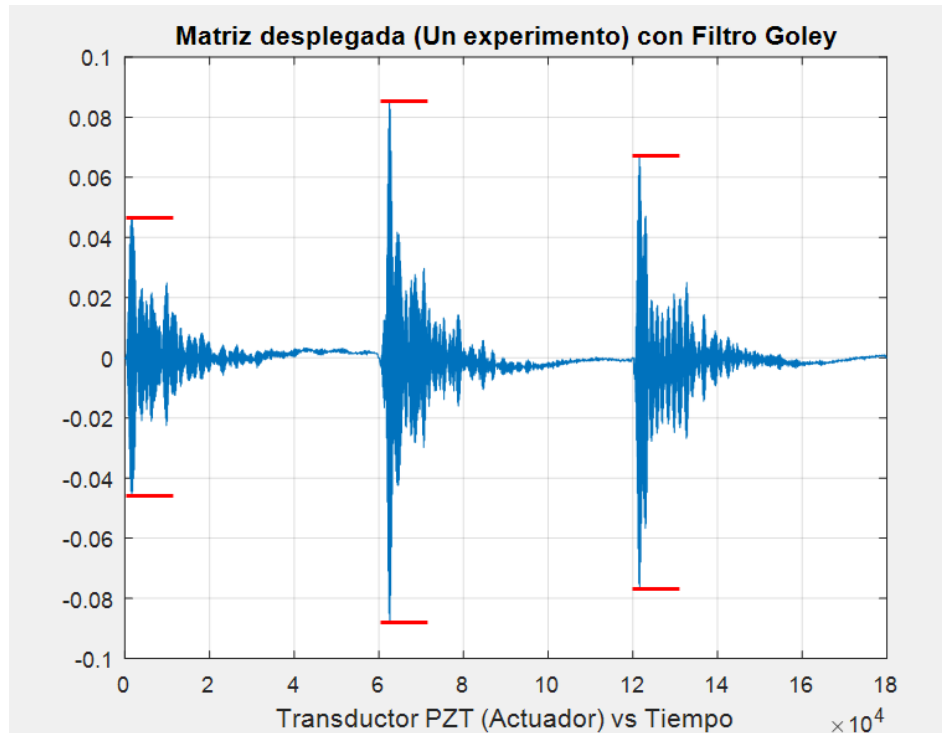


Figura 6. Evidencia de la atenuación de la señal recogida para algunos transductores piezoeléctricos. Fuente: Autores.

Metodología para la detección de daño.

La metodología para la detección de daños sobre estructuras metálicas se basa en el uso de un sistema piezoeléctrico de múltiples actuadores (red activa piezoeléctrica distribuida) (29), análisis de componentes principales (PCA) y algunos índices de daño. La aplicación se distribuye en dos etapas.

Modelado de referencia: En esta fase se realizan experimentos sobre la estructura sana. Los datos adquiridos por los sensores se organizan y pre procesan para obtener el modelado de referencia basada en datos estadísticos en PCA. Los “scores” e índices obtenidos en esta etapa también se almacenan como indicadores de referencia.

Proyección de los datos en los modelos: Para esta etapa la placa de aluminio está sujeta a cambios (daños) pero manteniendo las mismas condiciones de los experimentos en la estructura sana. Los datos adquiridos se organizan, pre procesan y se proyectan en los modelos obtenidos anteriormente. De igual forma

los “scores” y los índices se calculan y se hace la comparación con los obtenidos utilizando la estructura sana.

Pre procesamiento.

Las respuestas dinámicas adquiridas de cada fase de los actuadores son almacenadas como un matriz con dimensiones $(I \times K)$, donde I representa el número de experimentos mientras que K representa el número de muestras. Indicando J como el número de transductores PZT que reciben la respuesta dinámica de cada experimento. Por ende, todo el conjunto de datos obtenidos en cada fase del actuador se puede organizar en una matriz 3D con dimensiones $(I \times K \times J)$ o en una matriz 2D desplegada $(I \times JK)$ donde los datos de cada sensor se encuentran uno al lado del otro como se puede ver en la Figura 7.

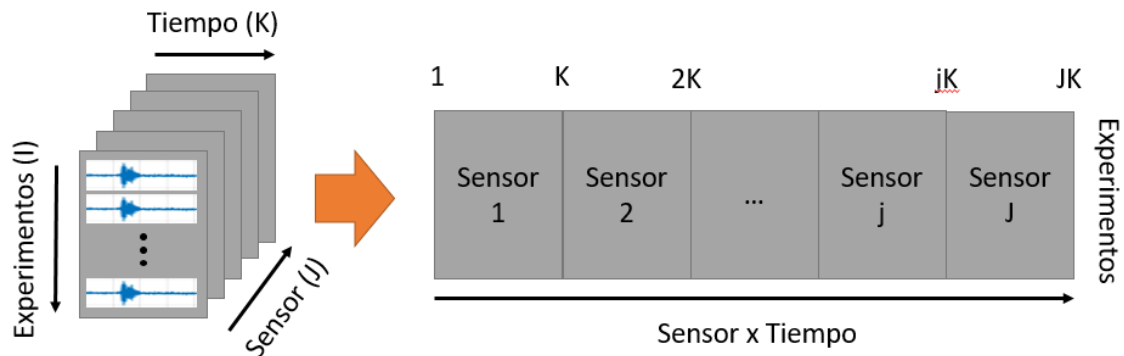


Figura 7. Despliegue de los datos recopilados en la matriz 3D a la matriz bidimensional $(I \times JK)$ (16). Adaptado de Autor: Tibaduiza Burgos, Diego Alexander. ⁱⁱⁱ

Construcción del modelo de referencia y el cálculo de los índices de daño usando PCA

En la primera etapa, un modelo de referencia PCA es construido para cada fase del actuador (PZT 1 como actuador, PZT 2 como actuador, etc.) usando las señales registradas por los sensores durante los experimentos donde la estructura estaba sana. El esquema mostrado en la Figura 8 resume el proceso.

En la segunda etapa, los experimentos fueron realizados sobre las estructuras con las adiciones de los daños simulados (Figura 9). Estas señales se pre procesan y se organizan de acuerdo con el de modelado PCA. Después se proyectan en el modelo PCA correspondiente a la estructura sana. Se obtiene los primeros componentes principales (scores – T). Además, se calcula el “Q-Index” para cada modelado de referencia PCA.

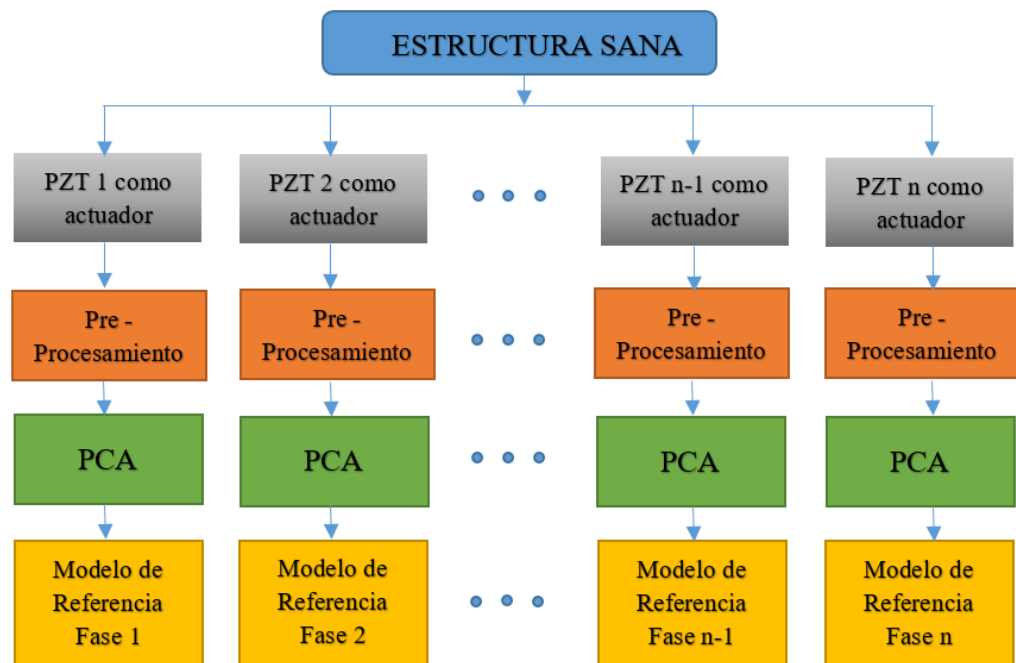


Figura 8. Definición de la metodología. Fuente: Autores. ⁱ

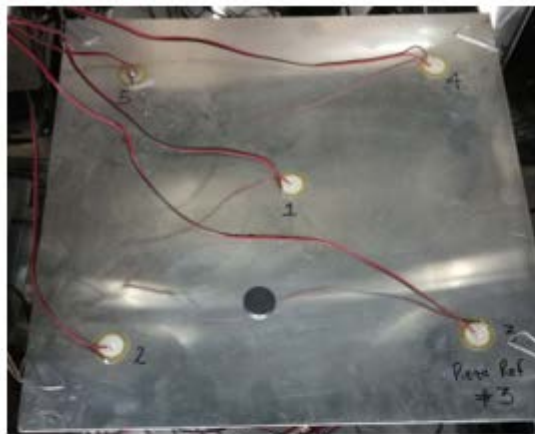


Figura 9. Proyección de los datos en los modelos PCA. Fuente: Autores. ⁱ

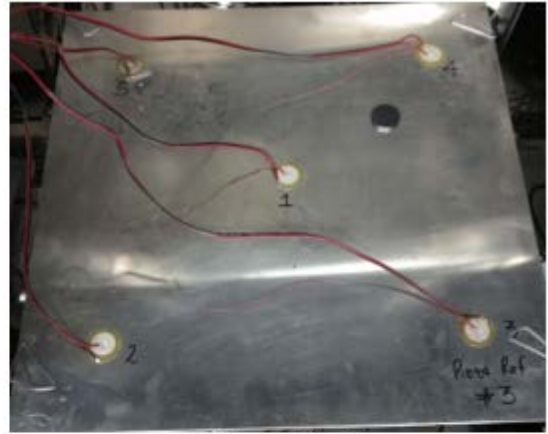
Resultados Experimentales

La validación de la ubicación óptima de los sensores piezoeléctricos en la metodología de detección de daños utilizando modelos PCA se lleva a cabo mediante el uso de los datos obtenidos en las 4 pruebas realizadas con placas de aluminio. Cada placa de aluminio se instrumentó con diferente cantidad de sensores y una configuración aleatoria de la ubicación de los sensores.

1. Prueba Numero 1:



a. Daño 1



b. Daño 2



c. Daño 3



d. Daño 4

Figura 10. Instrumentacion para la placa de la prueba #1. Placa implementada en trabajo de grado. El sensor número 5 descrito en los diferentes literales de la figura estaba deshabilitado en el momento de los experimentos. Fuente: Autores. ⁱ

a. Distribución de la varianza.

Con los modelos PCA contruidos basados en la estructura sana, se hizo un análisis de la varianza capturada por cada componente principal (PC). Es importante realizarlo para garantizar que se conserve la varianza necesaria en el modelo y así tener una reducción óptima. La distribución de la varianza se muestra para cada una de las fases durante la prueba en la Figura 10.

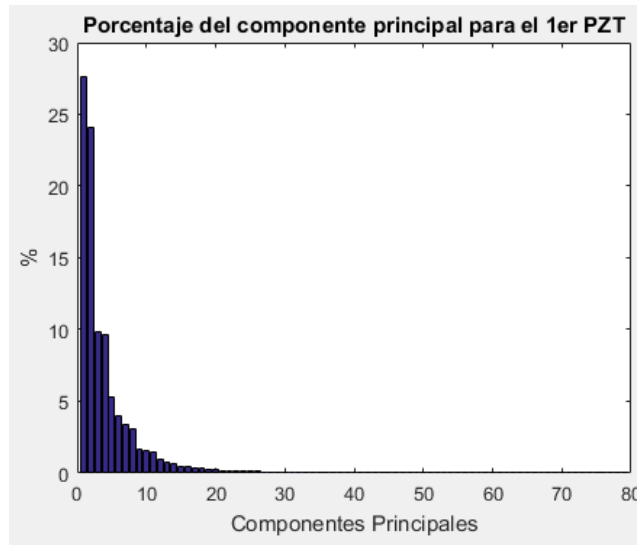


Figura 11. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 1, cuando el 1er piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

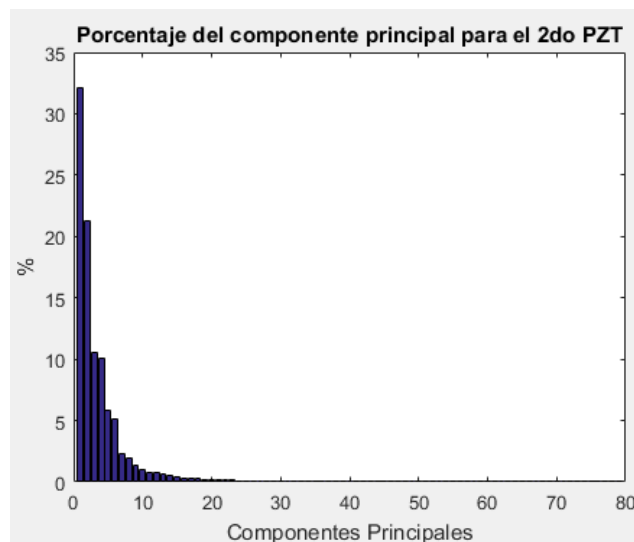


Figura 12. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 1, cuando el 2do piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

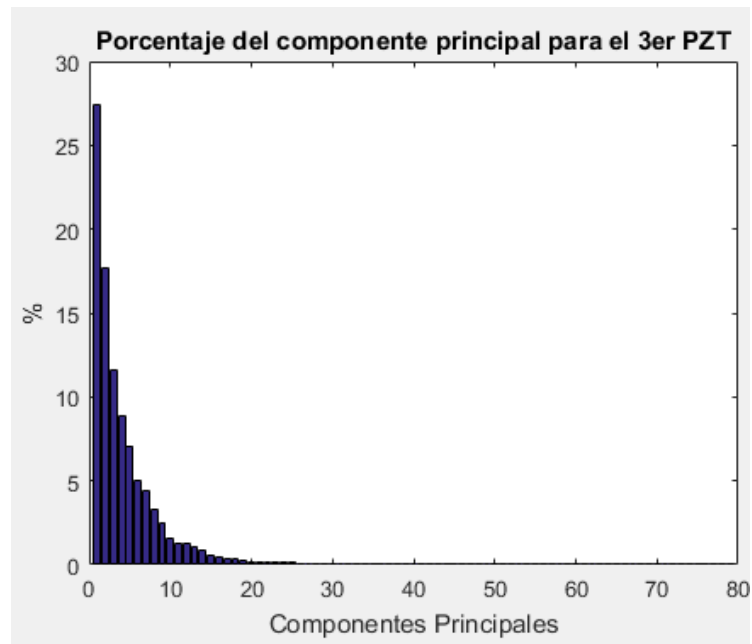


Figura 13. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 1, cuando el 3er piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

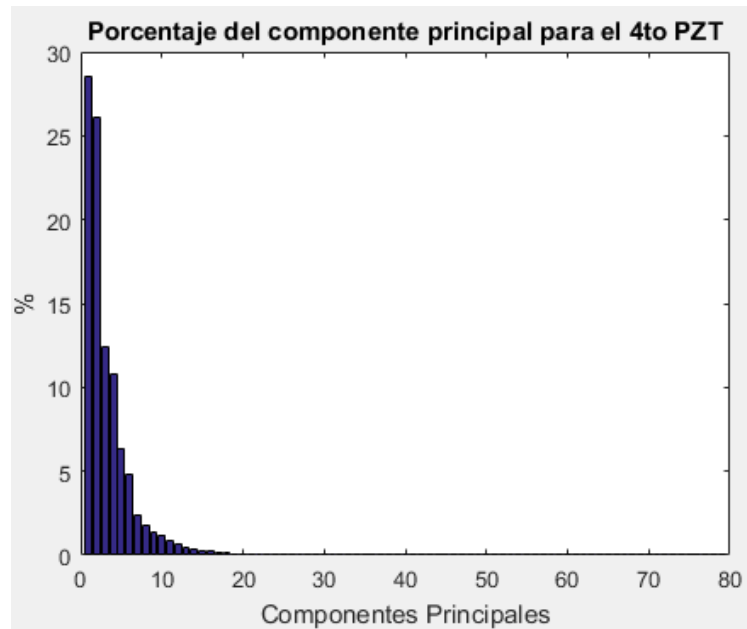


Figura 14. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 1, cuando el 4to piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

En la figura 10 se muestra la configuración de los sensores usada en esta prueba y sus respectivos daños, las figuras 11, 12, 13 y 14, muestran la varianza acumulada para cada una de las fases de la prueba (se entiende como fase de una prueba la

cantidad de experimentos donde un sensor es actuador, para el caso puntual de la prueba número 1, se tiene 4 fases).

La varianza es una medida de variabilidad que da cuenta el grado de homogeneidad de un grupo respecto a otro. El porcentaje de la varianza acumulada representada en cada uno de las gráficas de la prueba 1 (figuras 11, 12, 13 y 14), no revela la suficiente información ya que, haciendo un promedio del análisis realizado, hasta el quinto o sexto componente principal se obtiene una varianza acumulada mayor al 80%.

b. Gráficos de “scores” PCA (2 Scores)

Las proyecciones de cada experimento en el sub espacio de componentes principales se denominan “scores”. Proyectar dos puntos en un diagrama de dispersión permite visualizar la estructura de los datos originales, y se conoce como gráficos de “scores”. (16).

Como el estado de la estructura (sana, daño 1, daño 2, etc.) se conoce con cada experimento, cada uno de las proyecciones se etiquetan para identificar los datos de cada uno de los grupos.

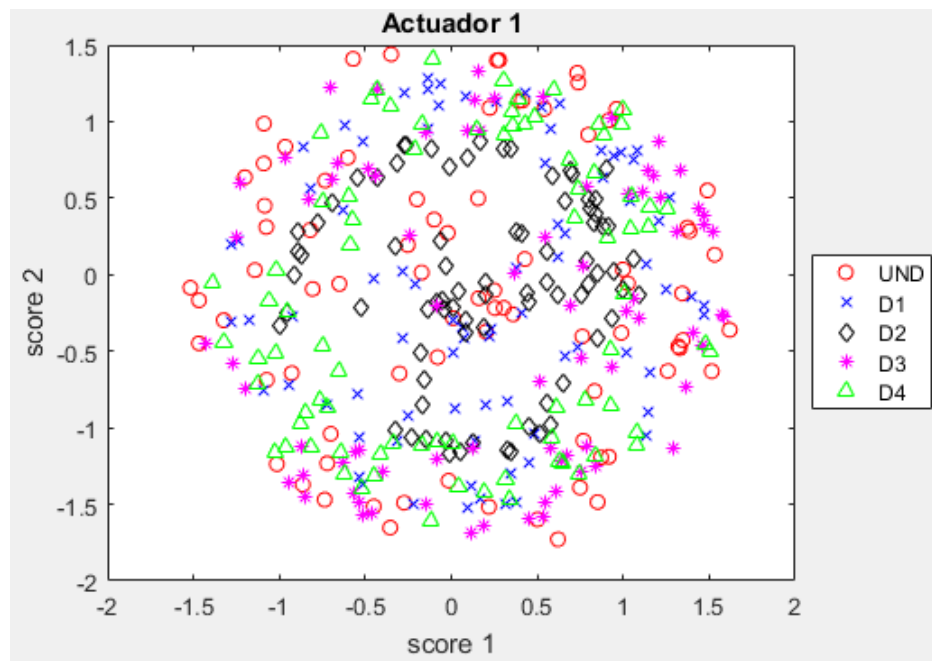


Figura 15. Gráfico de scores para la prueba 1, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

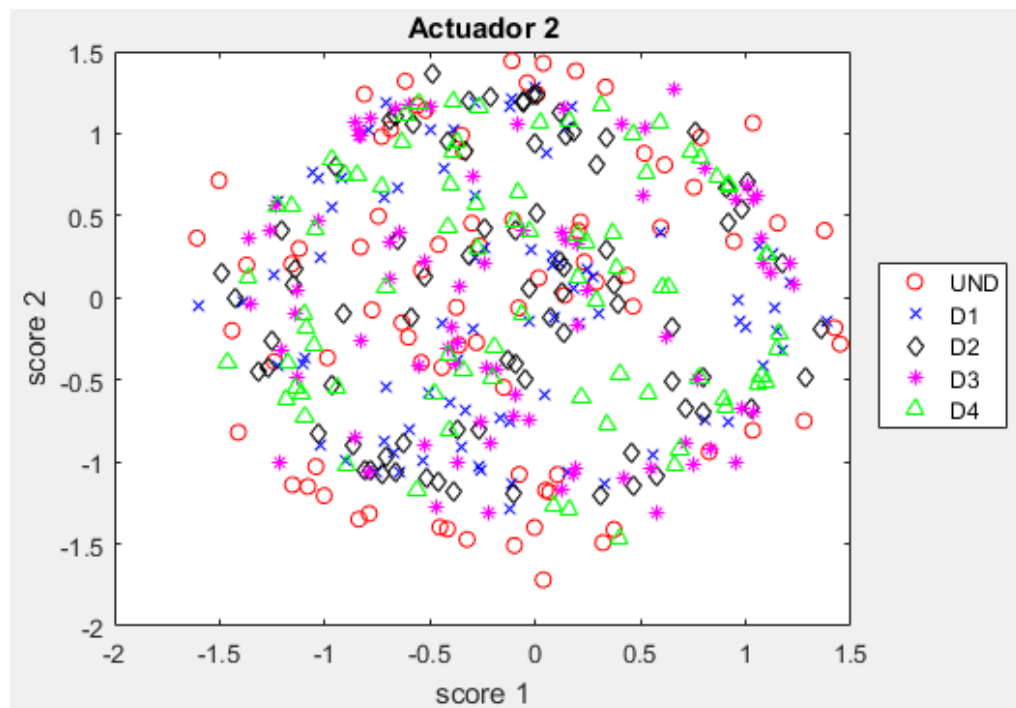


Figura 16. Gráfico de scores para la prueba 1, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

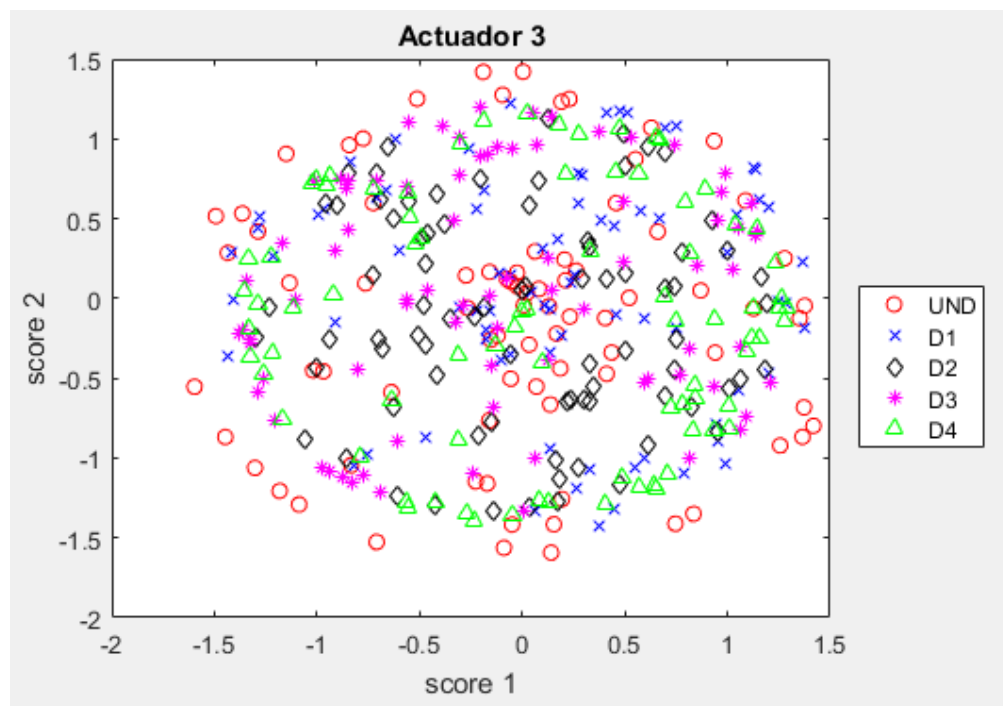


Figura 17. Gráfico de scores para la prueba 1, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

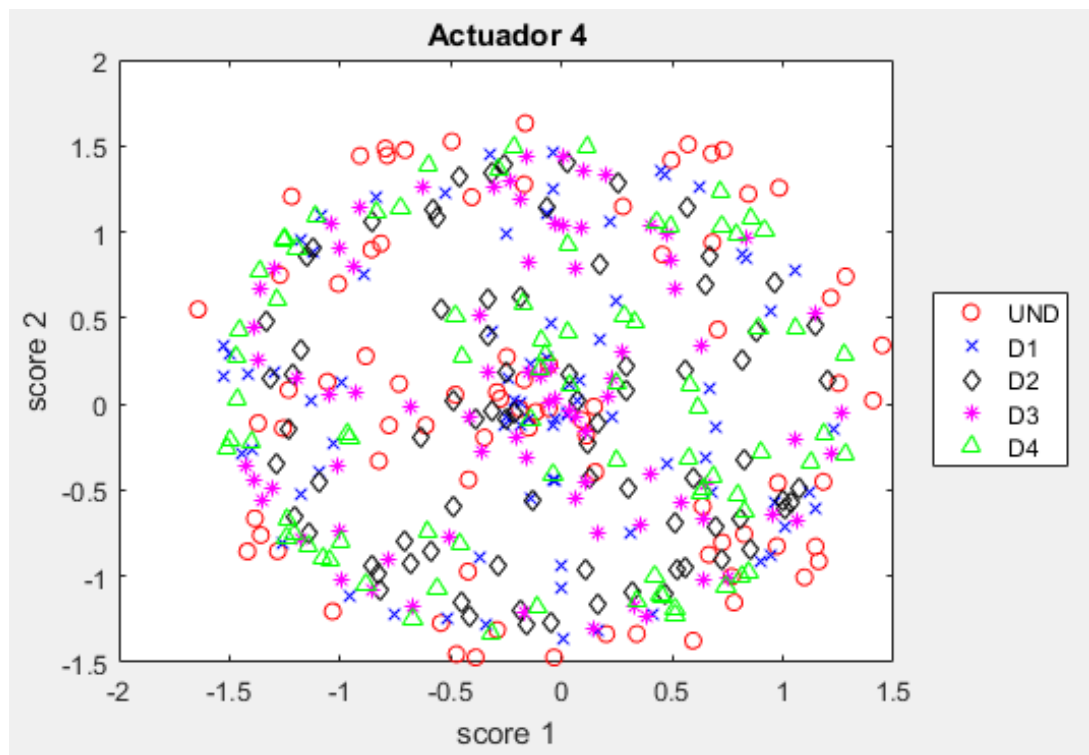


Figura 18. Gráfico de scores para la prueba 1, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Haciendo el contraste de las gráficas de la varianza acumulada respecto a la información representada en las figuras 15, 16, 17 y 18, se esperaba que la información tampoco representara un criterio fundamental en el momento de determinar si existe o no daño en la estructura ya que los diferentes grupos que identifican a la estructura sana, con daño 1, con daño 2, con daño 3 y con daño 4 están dispersos en toda la gráfica y solapados unos con otros, esto debido a que los dos primeros componentes principales del modelo no reúnen más del 80% de la información más relevante de la prueba.

c. Gráficos de “scores” PCA (3 Scores)

Como resultado de los análisis de los gráficos para los dos primeros scores, no arrojaron ninguna información relevante, se tomó la decisión de analizar el gráfico para los 3 primeros scores, esto con el fin de acumular más varianza para así tener más información, implicando esto que las gráficas obtenidas estarían en un espacio de tres dimensiones.

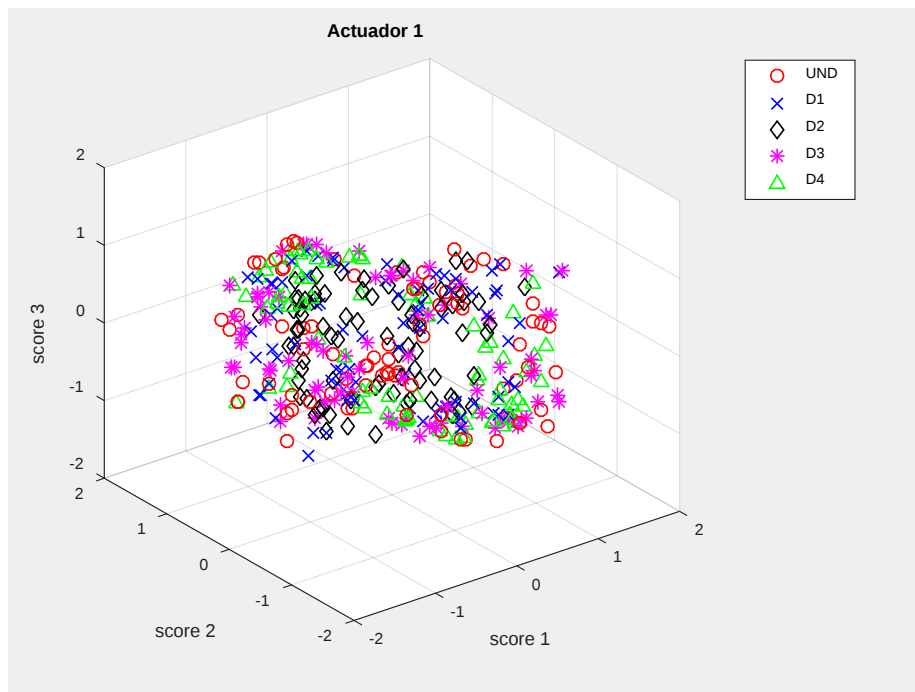


Figura 19. Gráfico de scores (3D) para la prueba 1, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

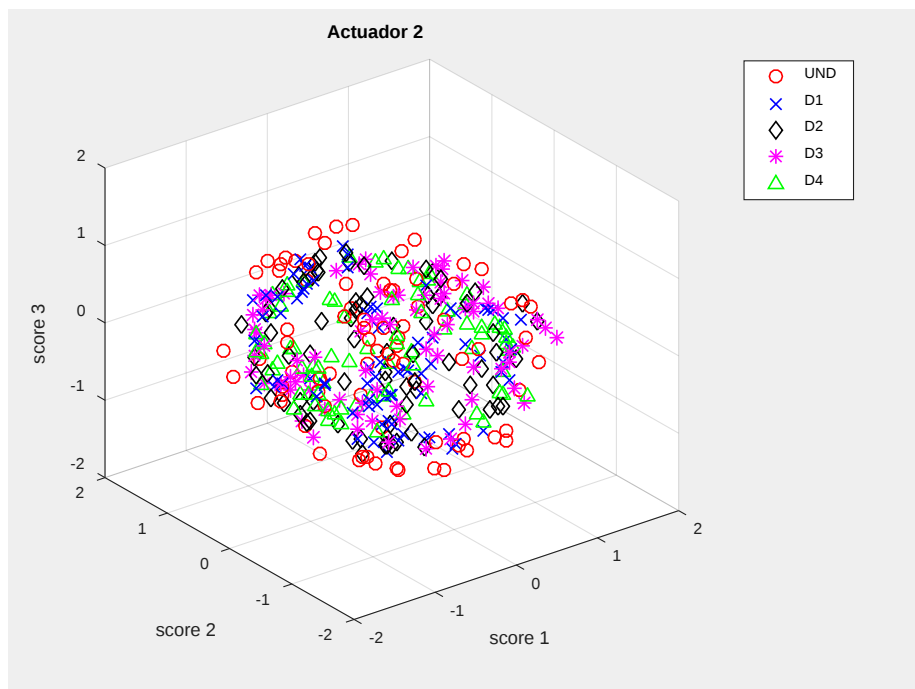


Figura 20. Gráfico de scores (3D) para la prueba 1, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

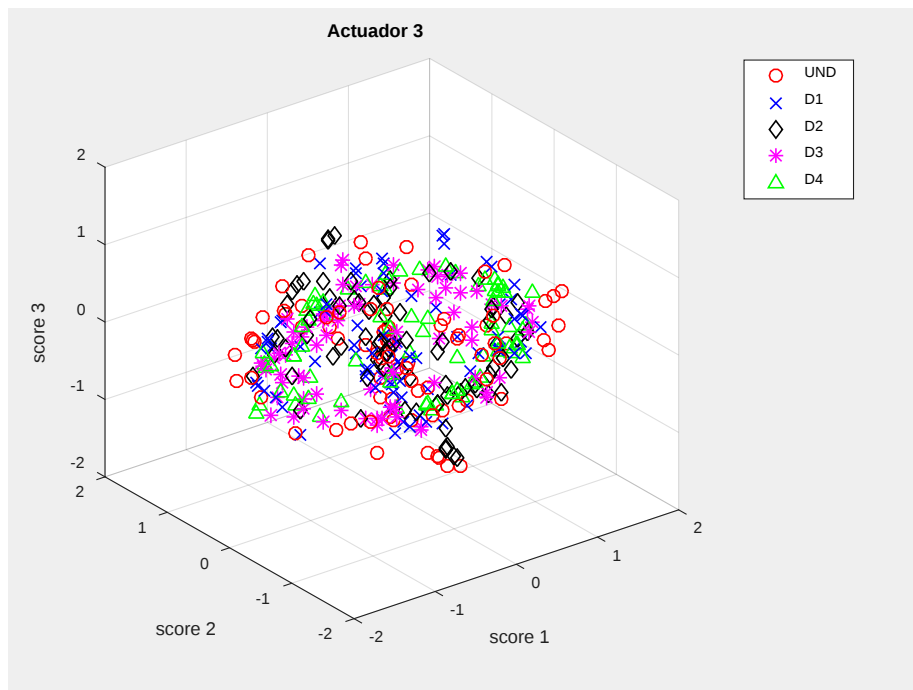


Figura 21. Gráfico de scores (3D) para la prueba 1, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

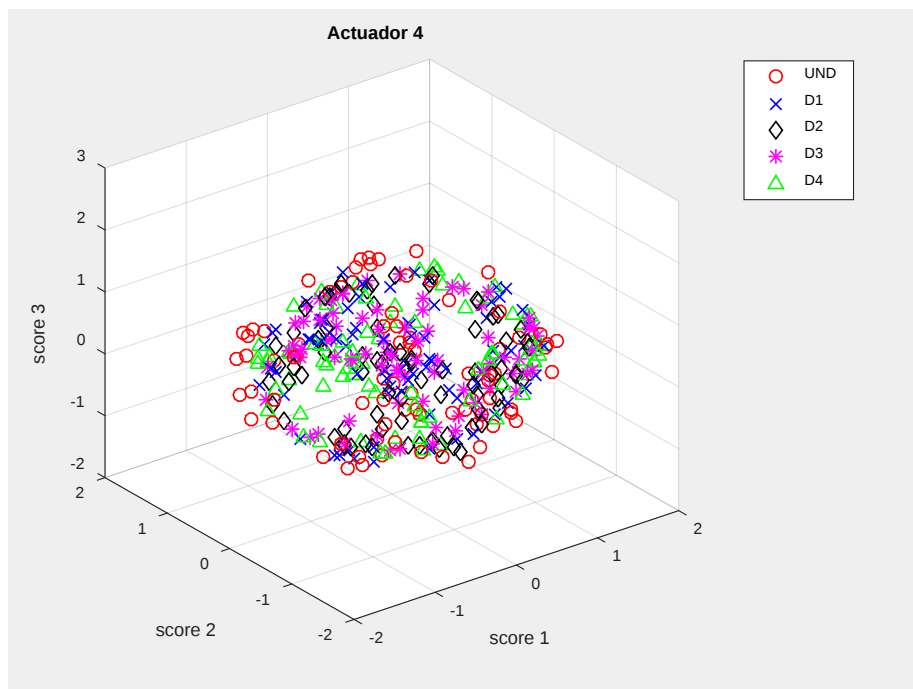


Figura 22. Gráfico de scores (3D) para la prueba 1, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Aunque se trató con tres scores, las gráficas no son concluyentes positivamente ya que, si nos remitimos a las figuras 11, 12, 13 y 14, para obtener un 80% de la varianza hace falta llegar hasta el quinto o sexto componente principal, razón por lo cual, el análisis por gráficos de score no es óptimo, ya que se trata de un análisis visual, donde para una gráfica en más de tres dimensiones la interpretación puede variar enormemente.

d. Q – Index.

El índice Q indica qué tan bien, cada muestra se ajusta al modelo PCA. Es una medida de la diferencia entre una muestra y su proyección en los componentes principales del modelo.

Se decide utilizar la Q-estadística ya que las metodologías anteriores para esta prueba no fueron concluyentes, con esta metodología se cerciora de que se haga una comparación uno a uno con las muestras del modelo PCA construido a partir de la estructura sana.

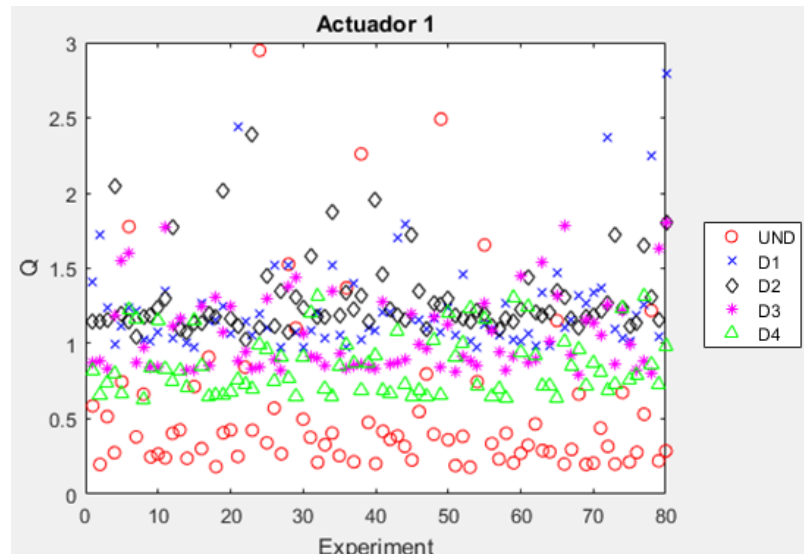


Figura 23. Índice Q para la prueba 1, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Analizando y evaluando los resultados obtenidos en las gráficas del Q-Index (figuras 23, 24, 25 y 26) para la prueba 1, se descarta como posible solución al problema planteado en esta tesis de obtener el mínimo número de sensores y su ubicación en placas de aluminio, ya que, aunque la diferencia muestra a muestra de los diferentes daños respecto a las muestras de la estructura sana, es clara, no deja de existir gran parte de las muestras de la estructura sana que se solapan con muestras de alguno de los 4 daños descritos, además cabe recalcar que los grupos

de las muestras de los daños no tienen distinción uno de otro, por lo tanto, el número y la ubicación de los sensores no es opción viable para la identificación de daños sobre estructuras metálicas.

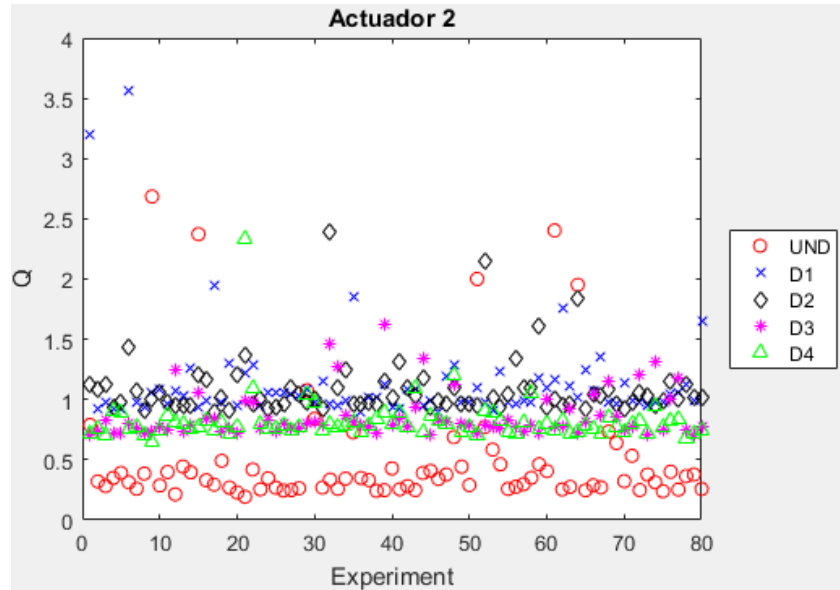


Figura 24. Índice Q para la prueba 1, cuando el 2do sensor trabaja como actuador.
Fuente: Autores.

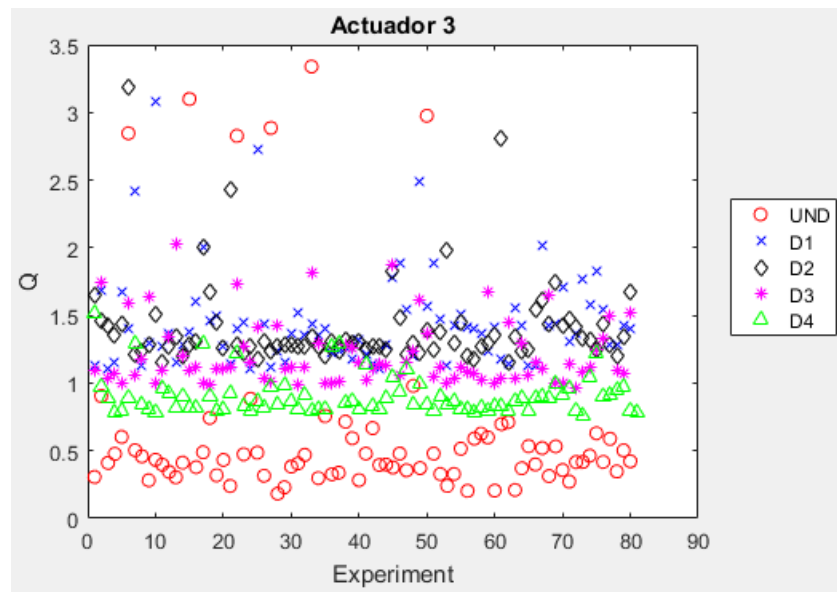


Figura 25. Índice Q para la prueba 1, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

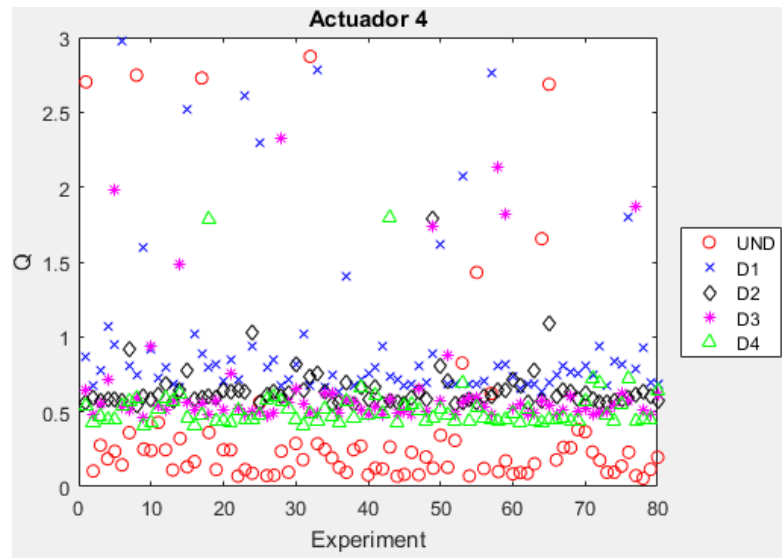


Figura 26. Índice Q para la prueba 1, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

2. Prueba Numero 2:

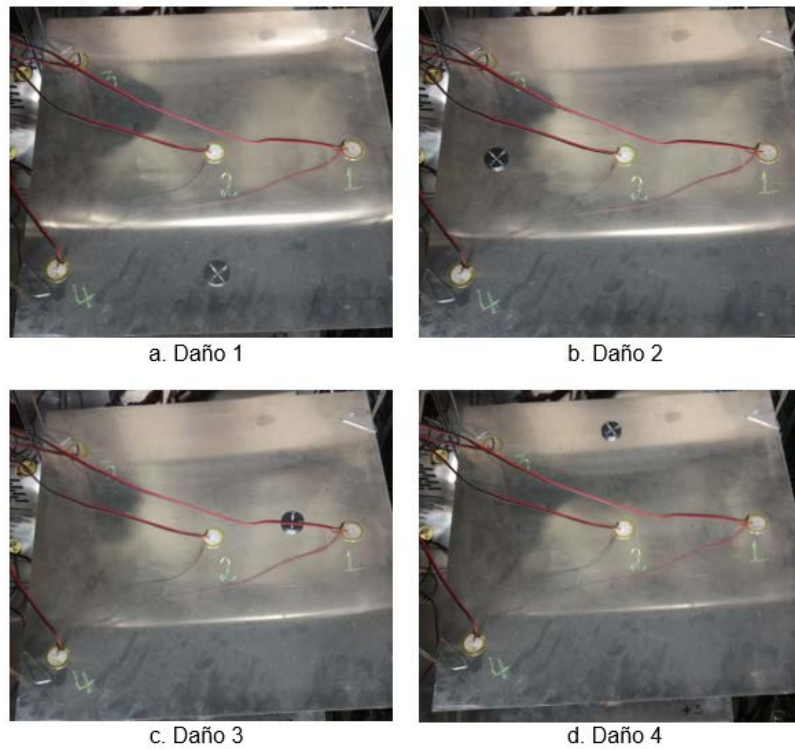


Figura 27. Instrumentación para la placa de la prueba #2. Placa implementada en trabajo de grado. Fuente: Autores.ⁱ

a. Distribución de la Varianza.

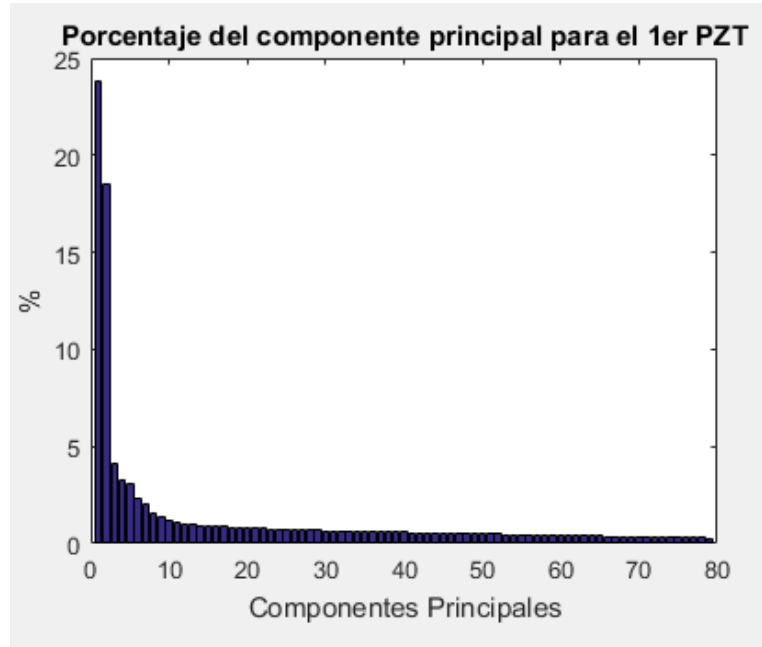


Figura 28. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 2, cuando el 1er piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

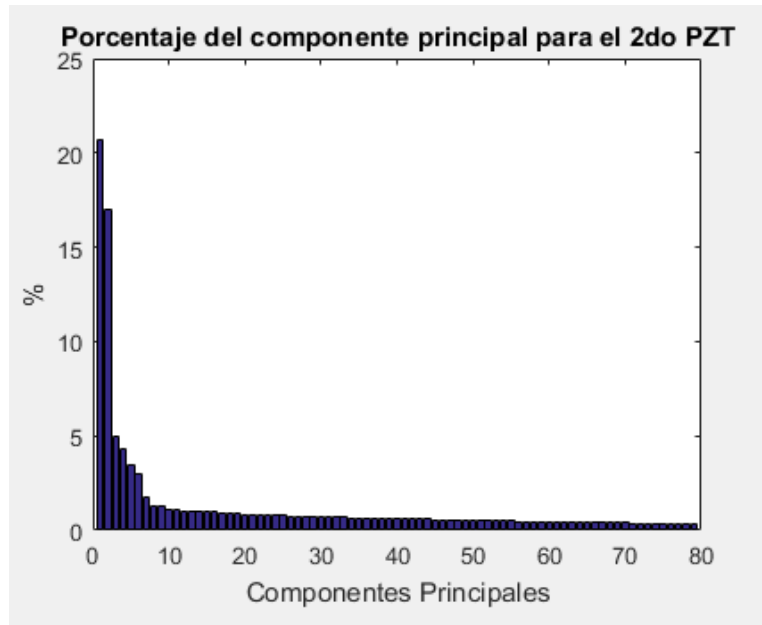


Figura 29. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 2, cuando el 2do piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

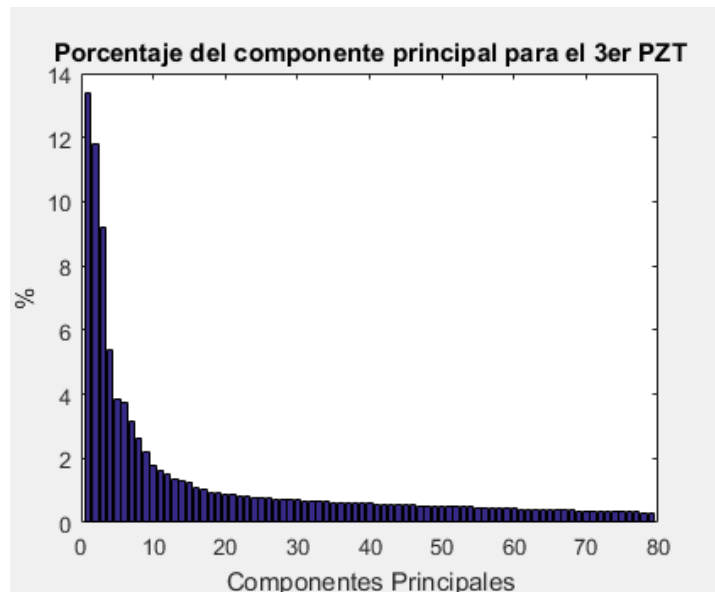


Figura 30. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 2, cuando el 3er piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

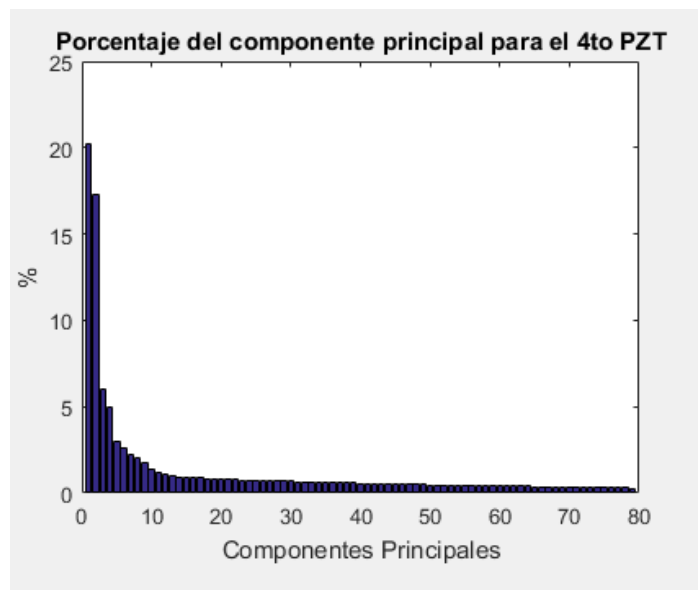


Figura 31. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 2, cuando el 4to piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Se realizó el mismo proceso de evaluación y análisis de la prueba 1 con las gráficas de la distribución de la varianza de la prueba 2 (figuras 28, 29, 30 y 31), llegando a la misma conclusión, con la diferencia radical de que para la prueba dos, para llegar a 80% o más de la varianza se necesitan más o menos los primeros 7 o 9 componentes principales del modelo.

b. Gráfico de “scores” PCA (2 Scores)

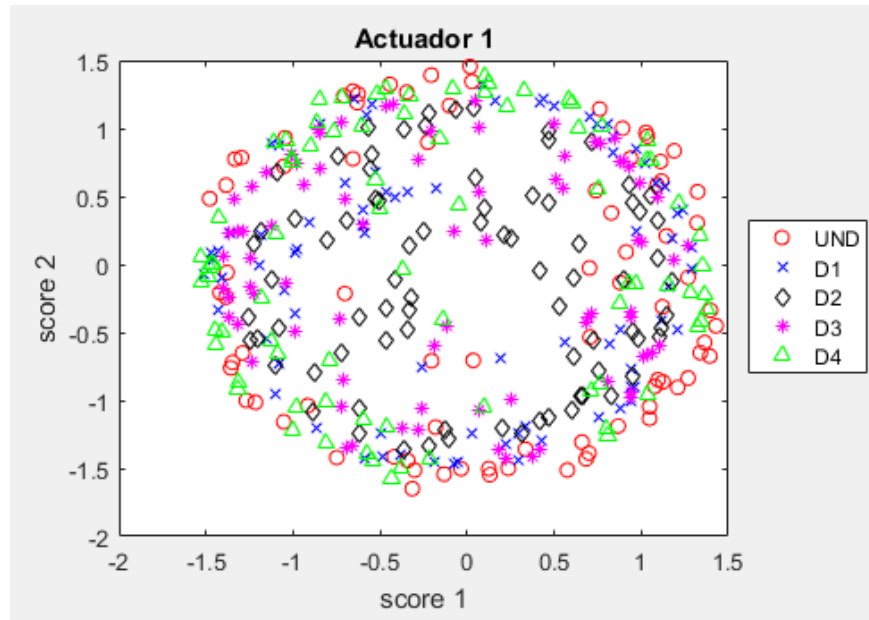


Figura 32. Gráfico de scores para la prueba 2, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

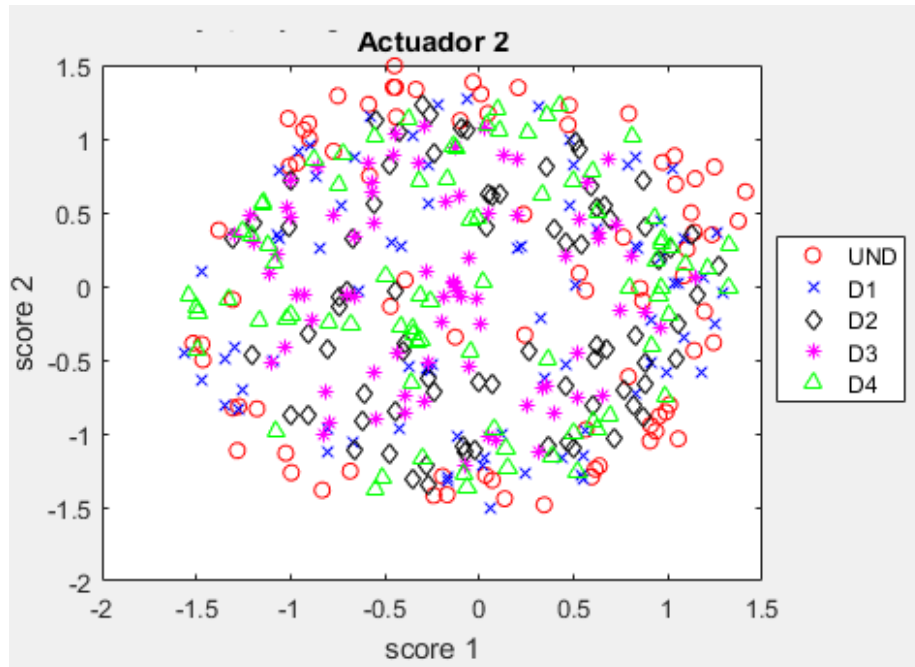


Figura 33. Gráfico de scores para la prueba 2, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

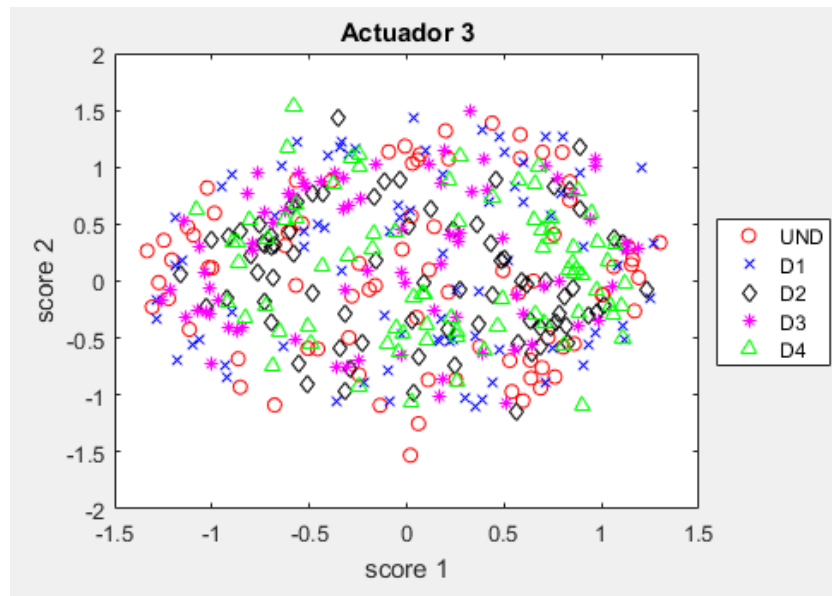


Figura 34. Gráfico de scores para la prueba 2, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

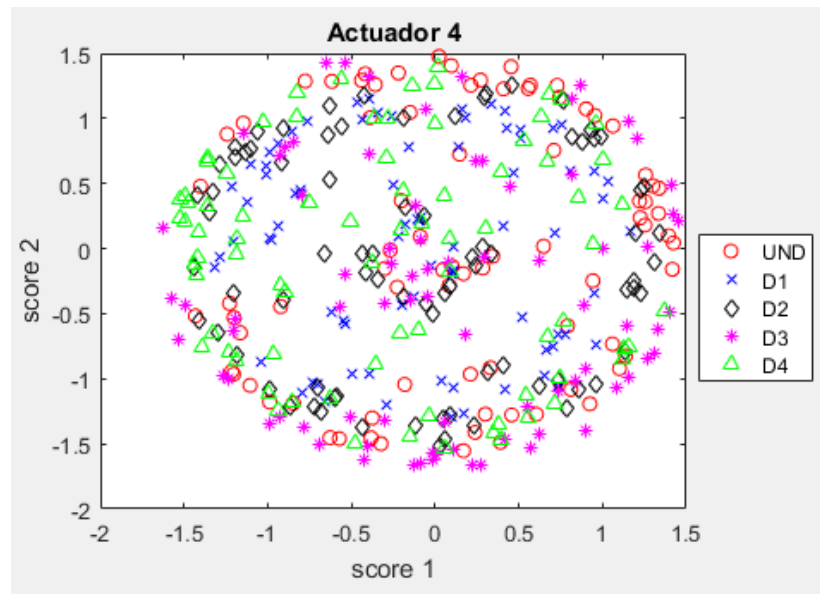


Figura 35. Gráfico de scores para la prueba 2, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Como el análisis de las gráficas de la distribución de la varianza para la prueba 2 no reveló la suficiente información sino hasta el séptimo o noveno componente principal, para este punto no se esperaba nada diferente a la deducción de que el conjunto de scores de los daños y de la estructura sana iba a estar dispersos por toda la gráfica y solapados entre sí, como lo podemos notar en las figuras 32, 33, 34 y 35.

c. Gráficos de “scores” PCA (3 Scores)

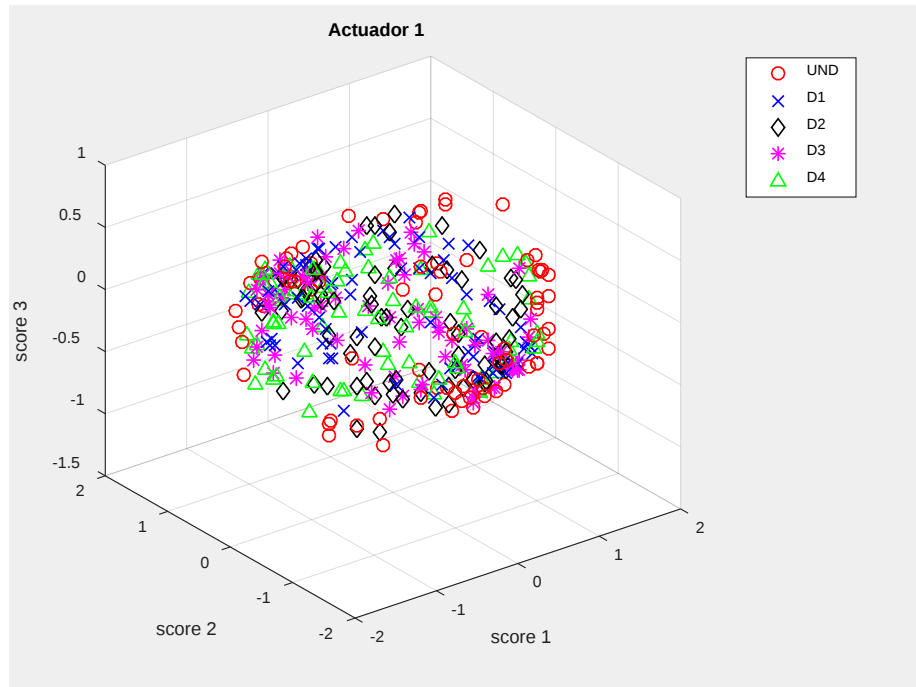


Figura 32. Gráfico de scores (3D) para la prueba 2, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

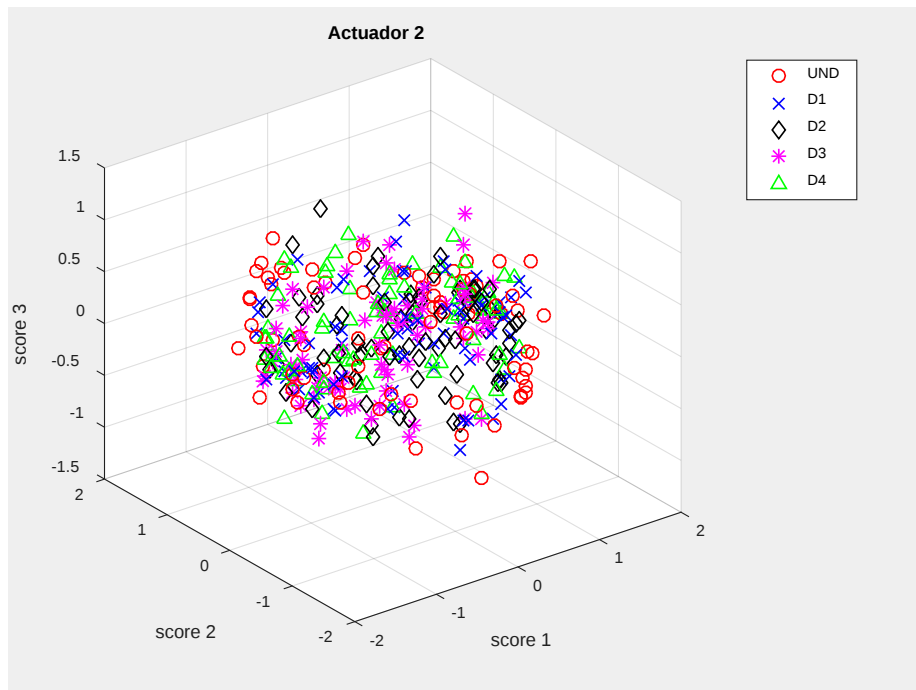


Figura 33. Gráfico de scores (3D) para la prueba 2, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

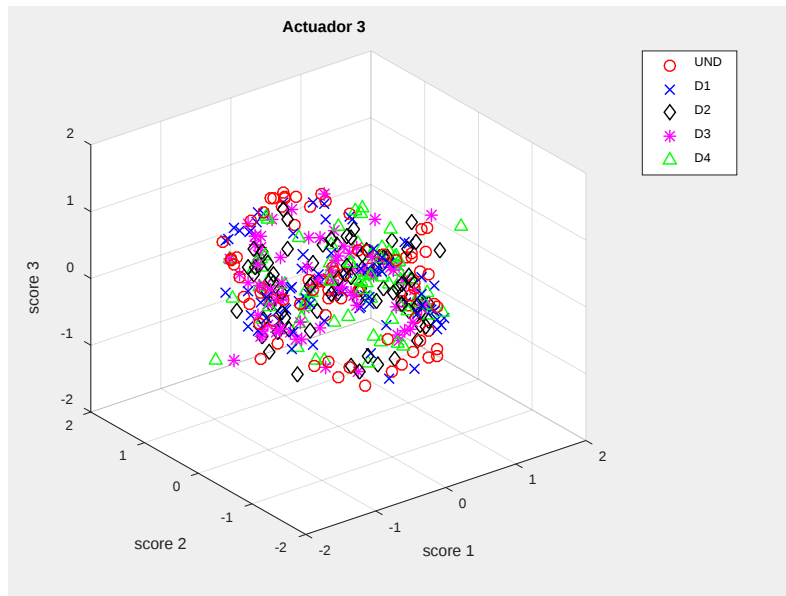


Figura 34. Gráfico de scores (3D) para la prueba 2, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

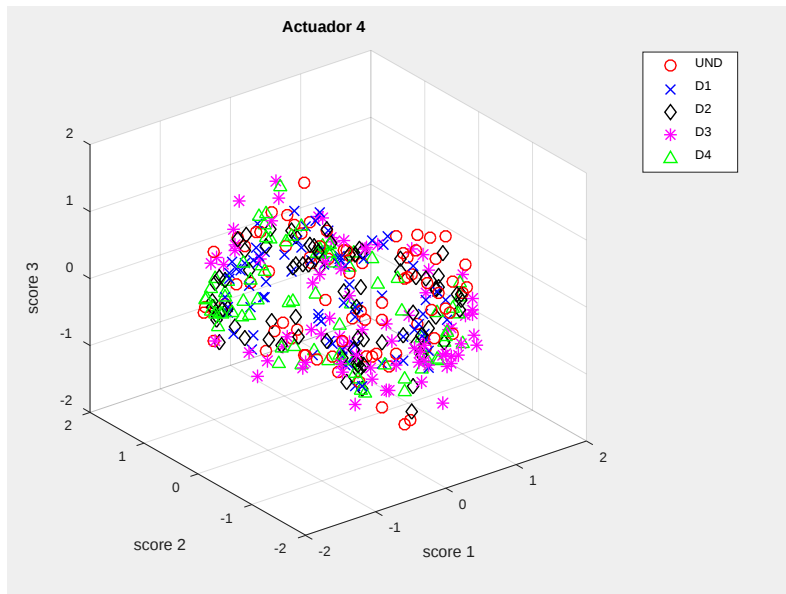


Figura 35. Gráfico de scores (3D) para la prueba 2, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Una vez más nos damos cuenta que al momento de proyectar los 3 primeros componentes principales en el gráfico de scores no es diciente, ya que la varianza acumulada para estos componentes no supera el 80% de la información relevante de la prueba, por ende, para la prueba 2, tanto el grafico de dos y tres scores no es una metodología que resuelva el problema de determinar el número mínimo de sensores y su ubicación en estructuras metálicas, razón por lo cual una vez se procede con la metodología del Q-Index.

d. Q-Index

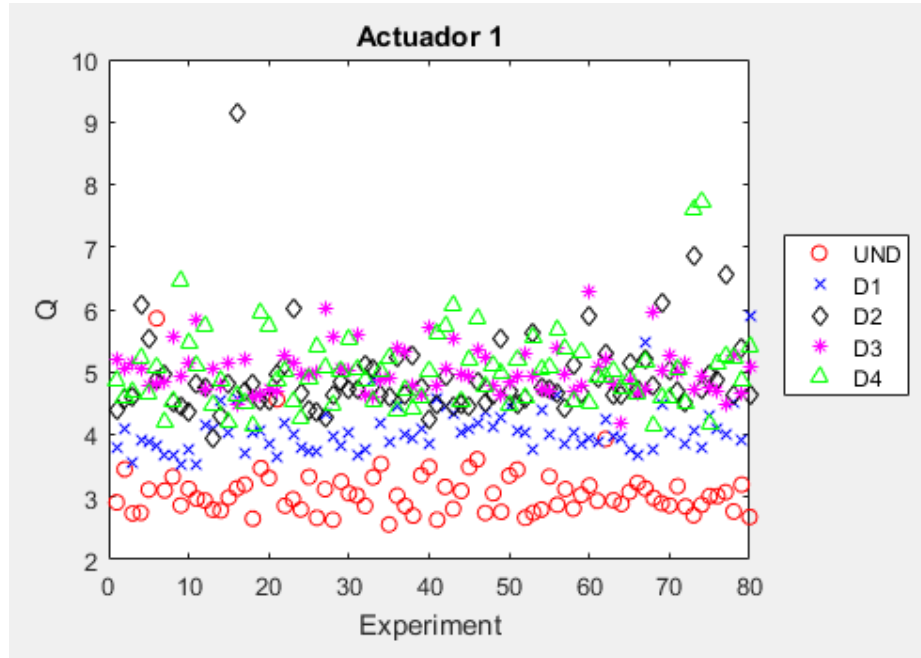


Figura 36. Índice Q para la prueba 2, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

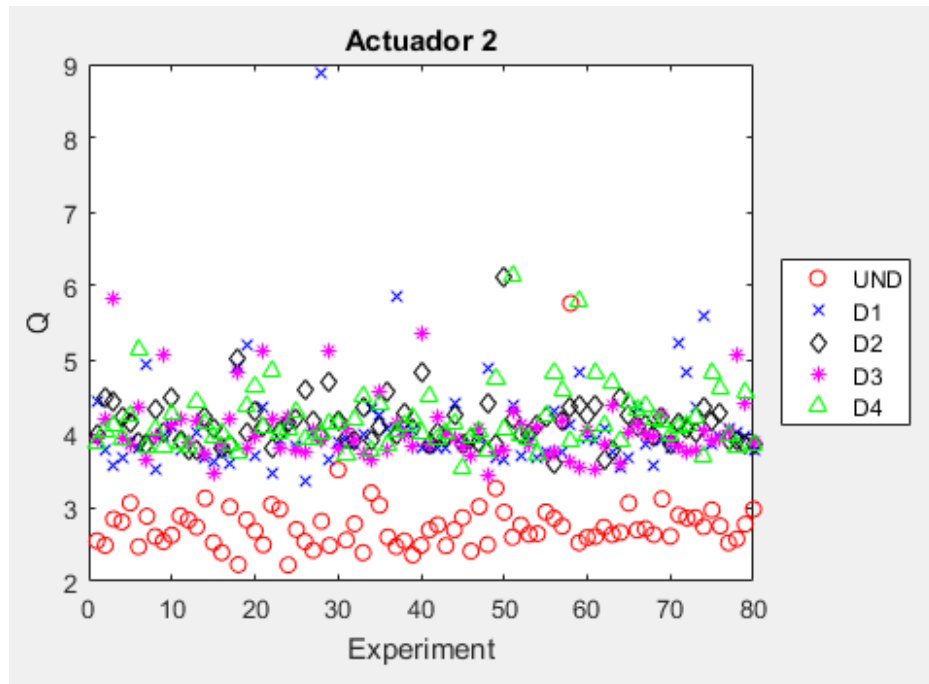


Figura 37. Índice Q para la prueba 2, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

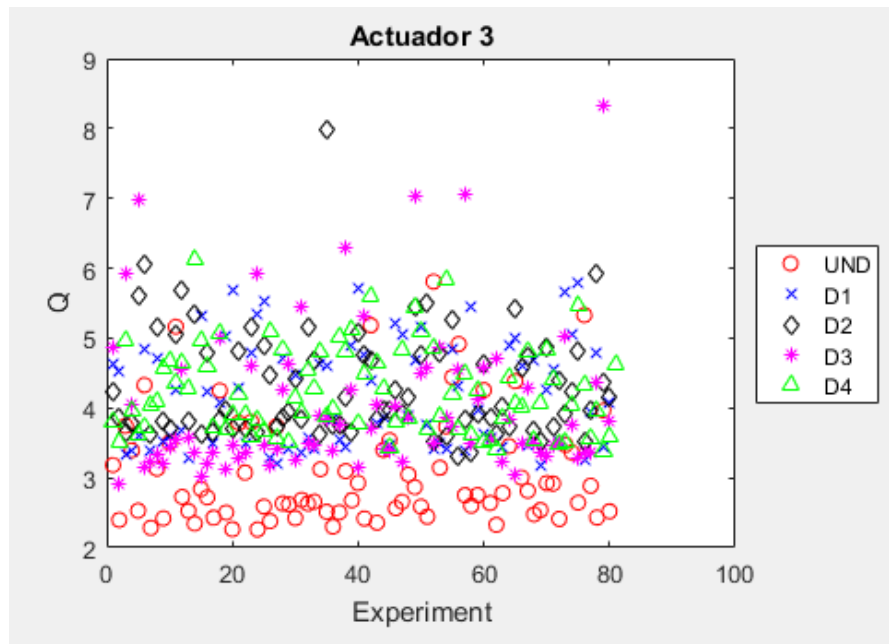


Figura 38. Índice Q para la prueba 2, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

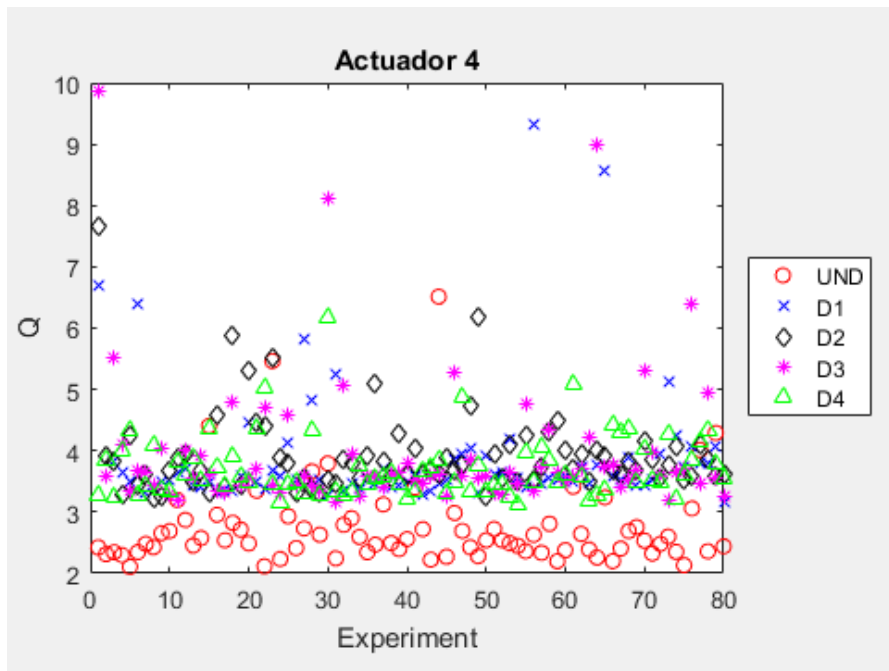


Figura 39. Índice Q para la prueba 2, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Al contrario que la prueba número 1, en la prueba número 2, cuando se implementó la metodología del índice estadístico Q, la diferencia uno a uno entre la muestra y su proyección en el modelo PCA construido de la estructura sana es más

evidente, sin embargo una gran parte del grupo constituido por las muestras de la estructura sana están solapadas con muestras de algunos de los grupos formados con algún daño, analizando lo anterior y haciendo una comparación con la prueba inmediatamente anterior, también se concluye que para la ubicación y el número de sensores utilizados en la prueba número dos no es una solución al problema de identificación de daños sobre estructuras metálicas.

3. Prueba Numero 3:

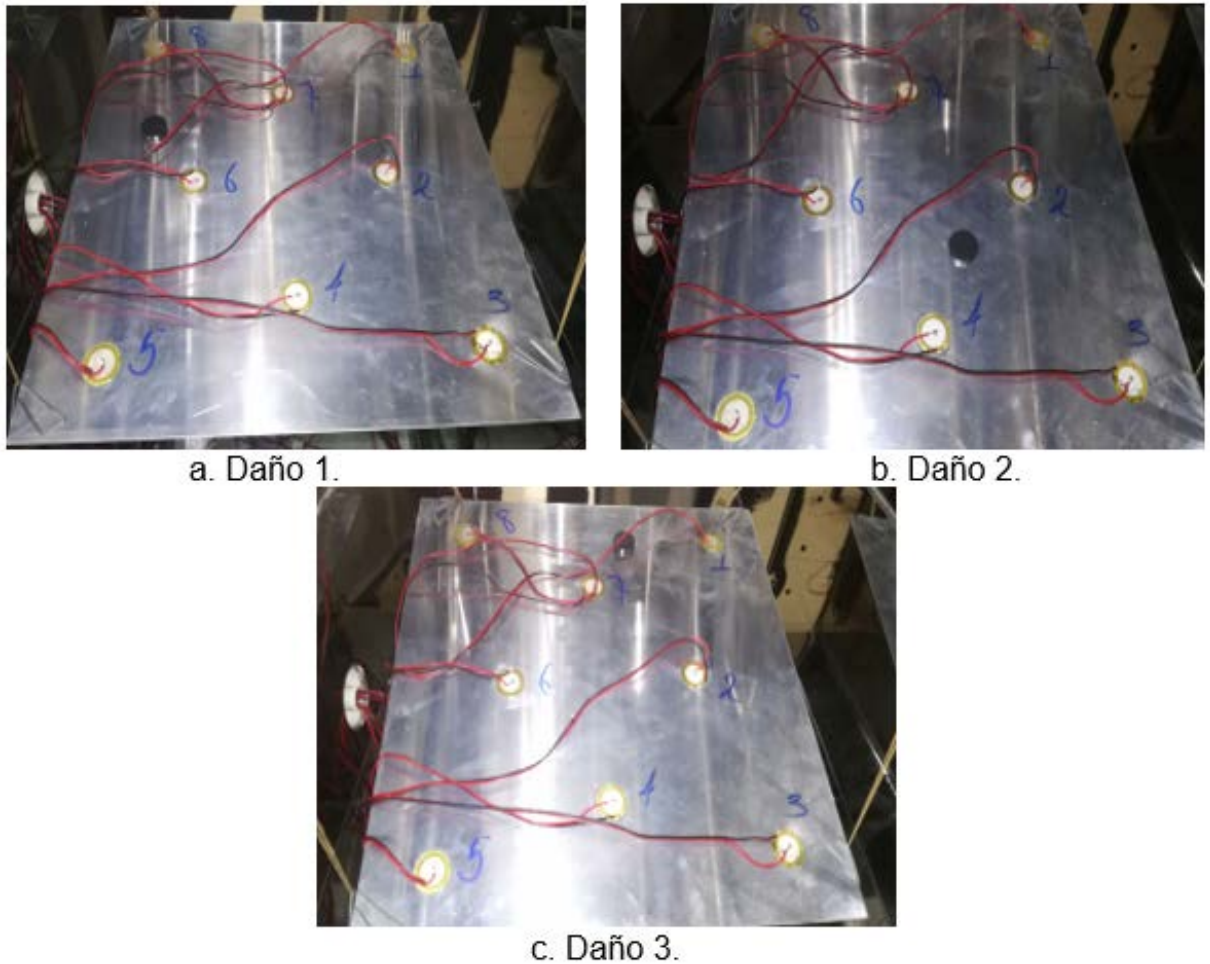


Figura 40. Instrumentacion para la placa de la prueba #3. Placa implementada en trabajo de grado. Fuente: Autores.ⁱ

Para la prueba número 3, a diferencia de las dos anteriores se utilizaron 8 sensores, razón por la cual se decide tan solo simular 3 daños en vez de 4, esto con el objetivo de contrastar un poco la carga computacional en cuanto a tiempo de cómputo se refiere.

a. Distribución de la Varianza

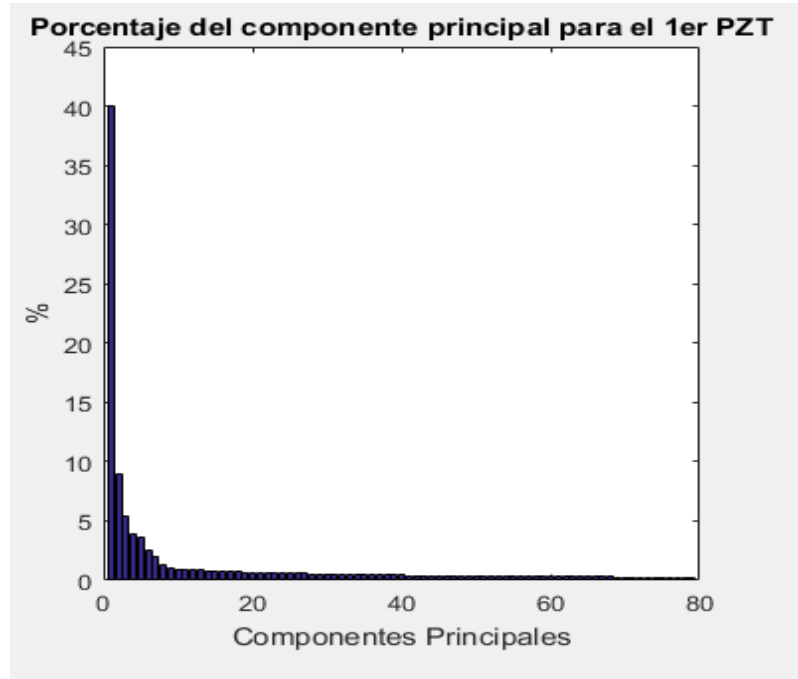


Figura 41. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 3, cuando el 1er piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

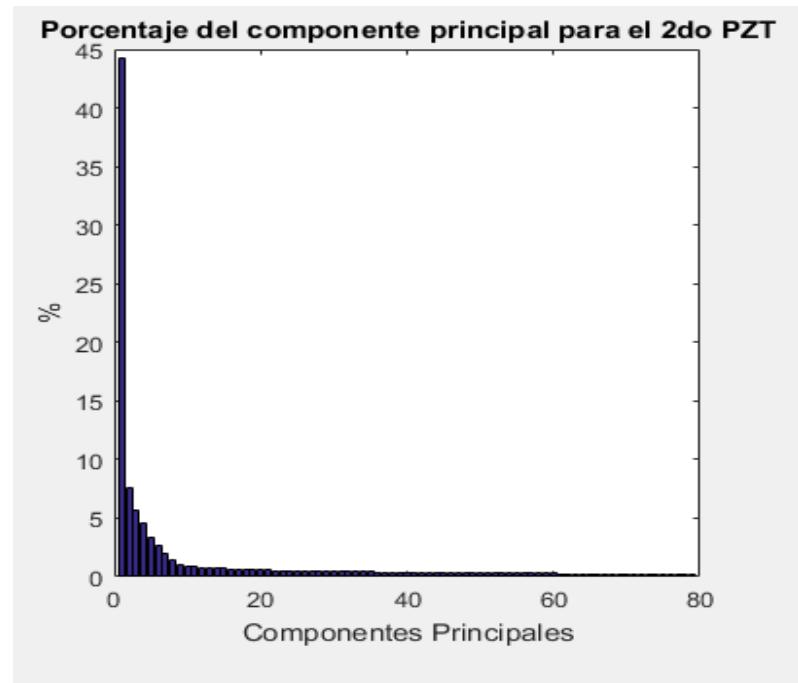


Figura 42. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 3, cuando el 2do piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

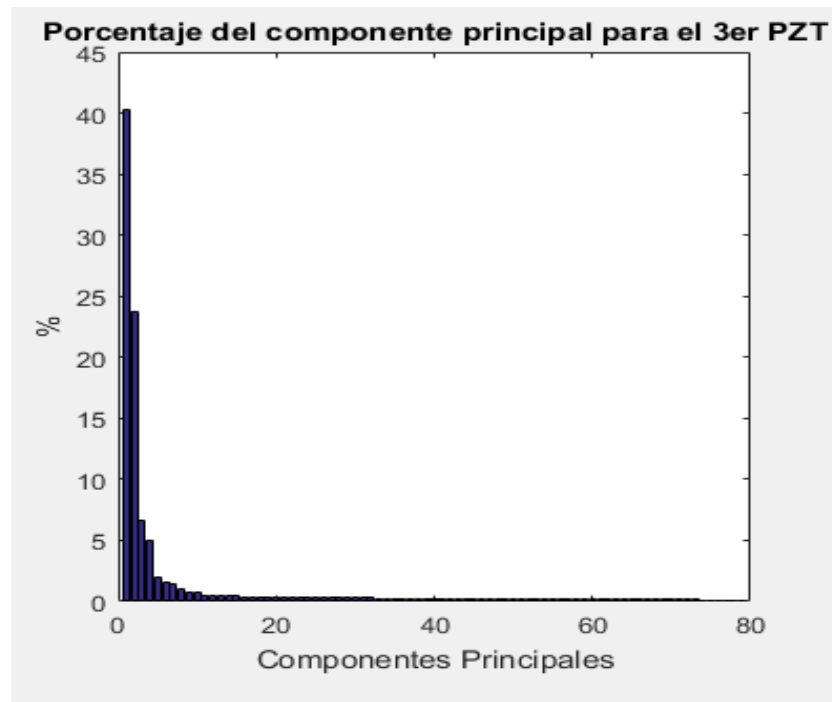


Figura 43. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 3, cuando el 3er piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

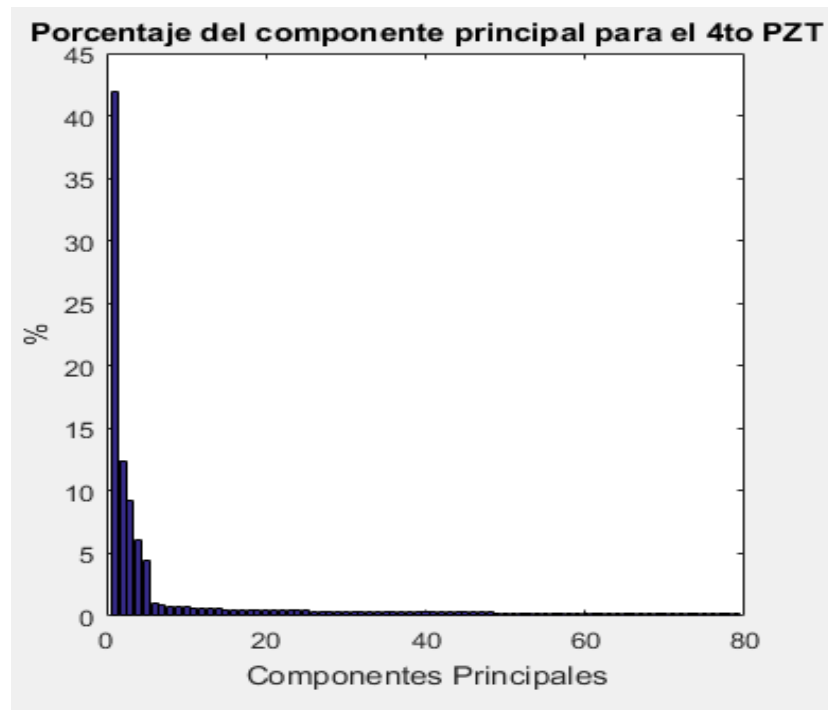


Figura 44. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 3, cuando el 4to piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

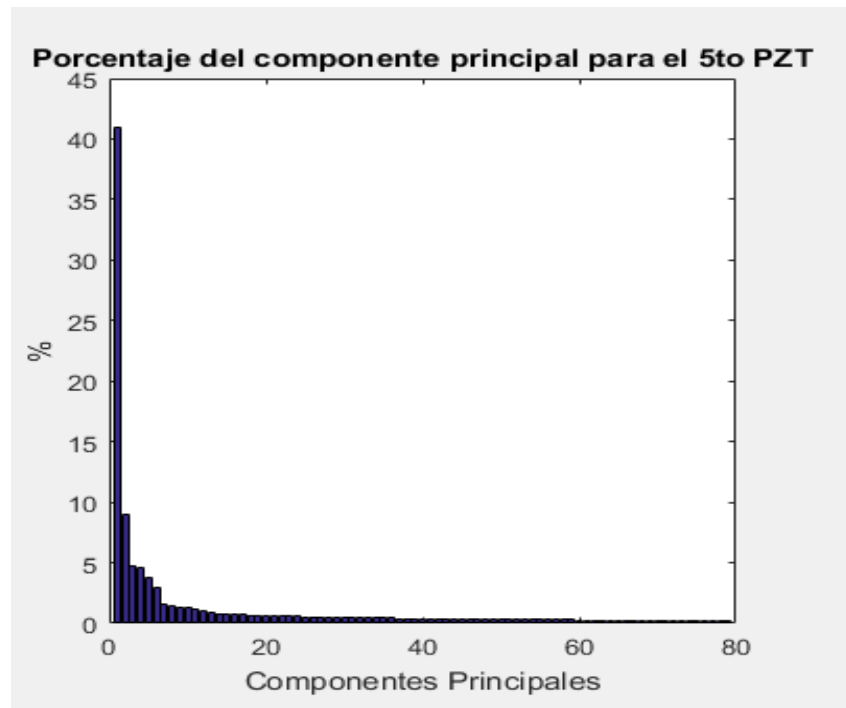


Figura 45. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 3, cuando el 5to piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

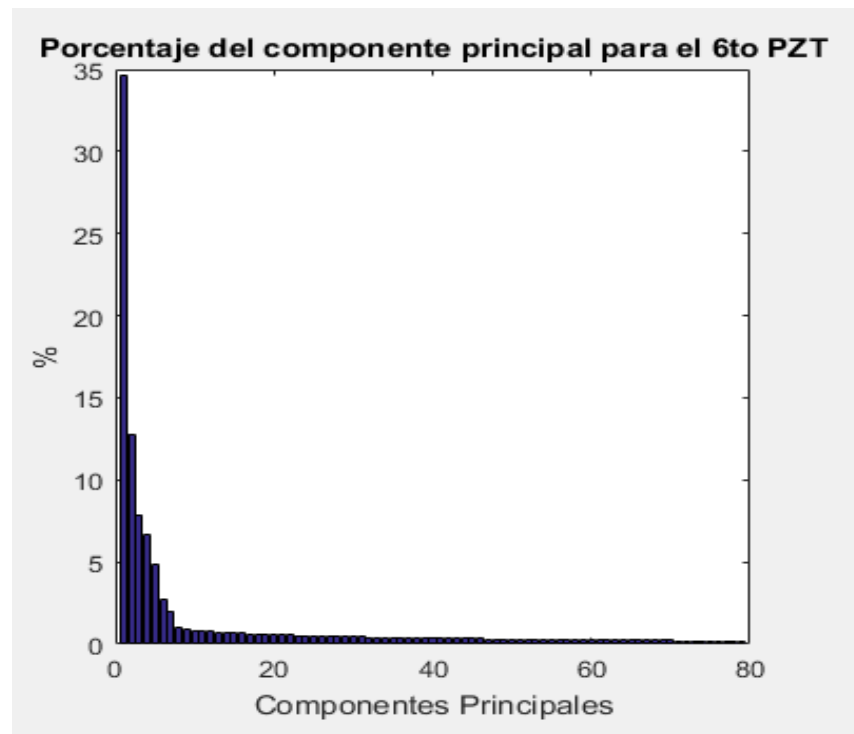


Figura 46. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 3, cuando el 6to piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

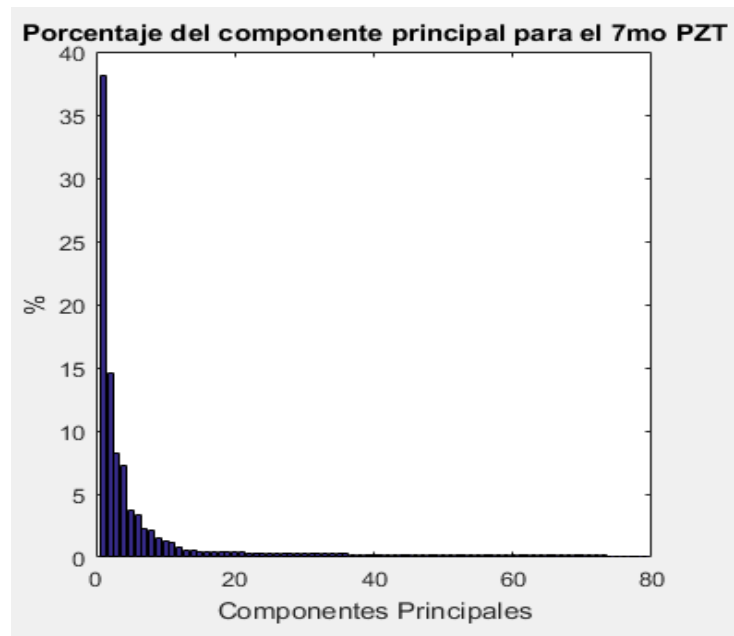


Figura 47. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 3, cuando el 7mo piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

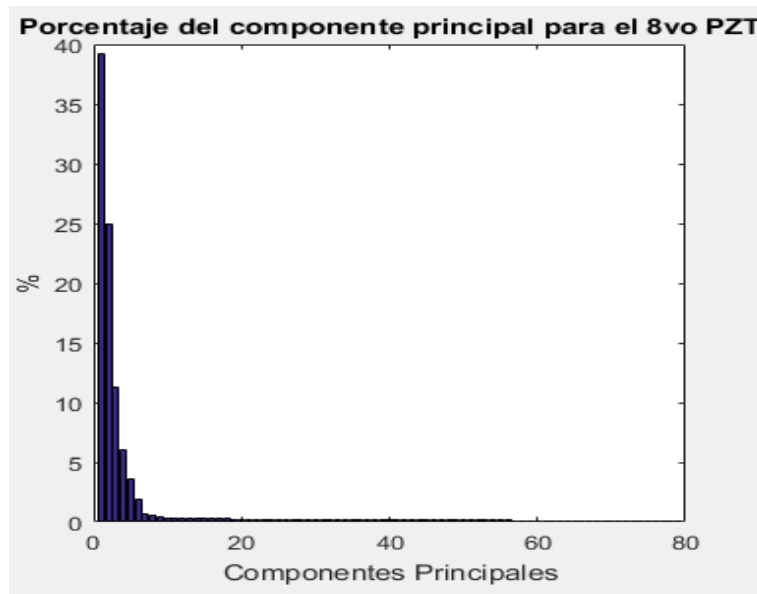


Figura 48. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 3, cuando el 8vo piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

A diferencia de las gráficas de la distribución de la varianza de las pruebas 1 y 2, en la prueba 3 se nota que el primer componente principal para la mayoría de sus fases supera o está cerca del 40%, queriendo decir esto que para obtener el 80% de la distribución hará falta a lo sumo tan solo 4 componentes principales. Es decir, que probablemente con los gráficos de “scores” PCA para esta prueba se pueda identificar la condición de la estructura metálica.

b. Gráfico de “scores” PCA

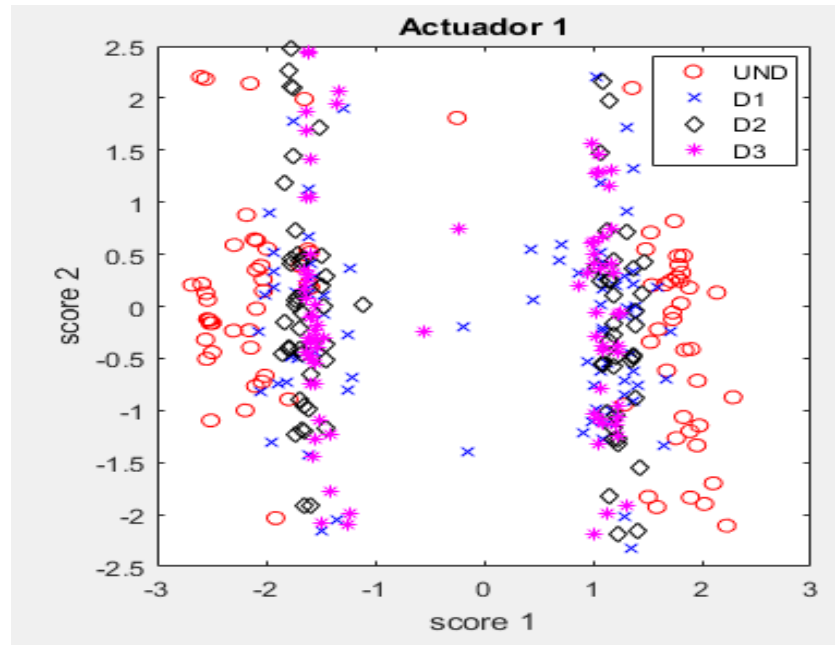


Figura 49. Gráfico de scores para la prueba 3, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

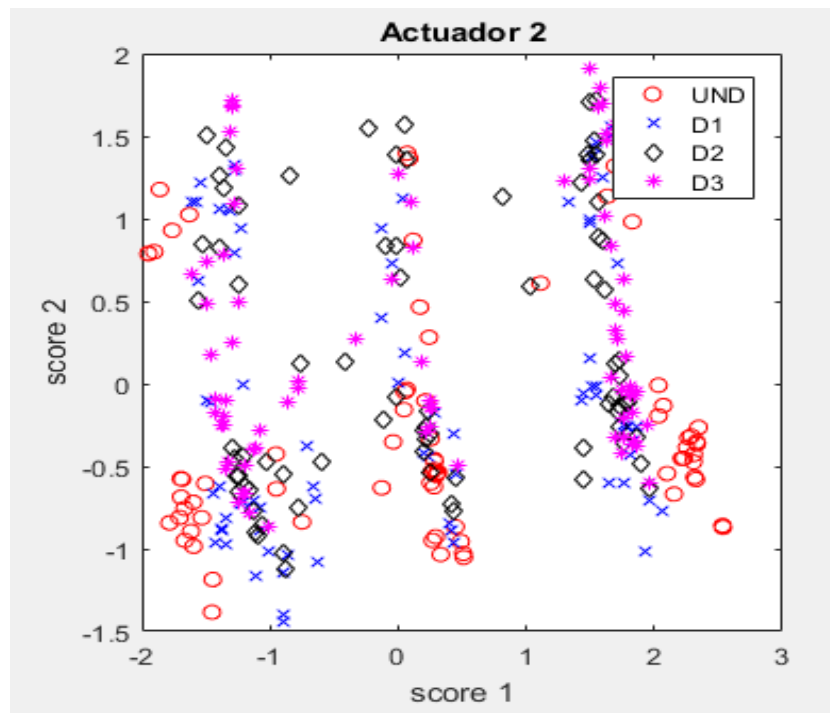


Figura 50. Gráfico de scores para la prueba 3, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

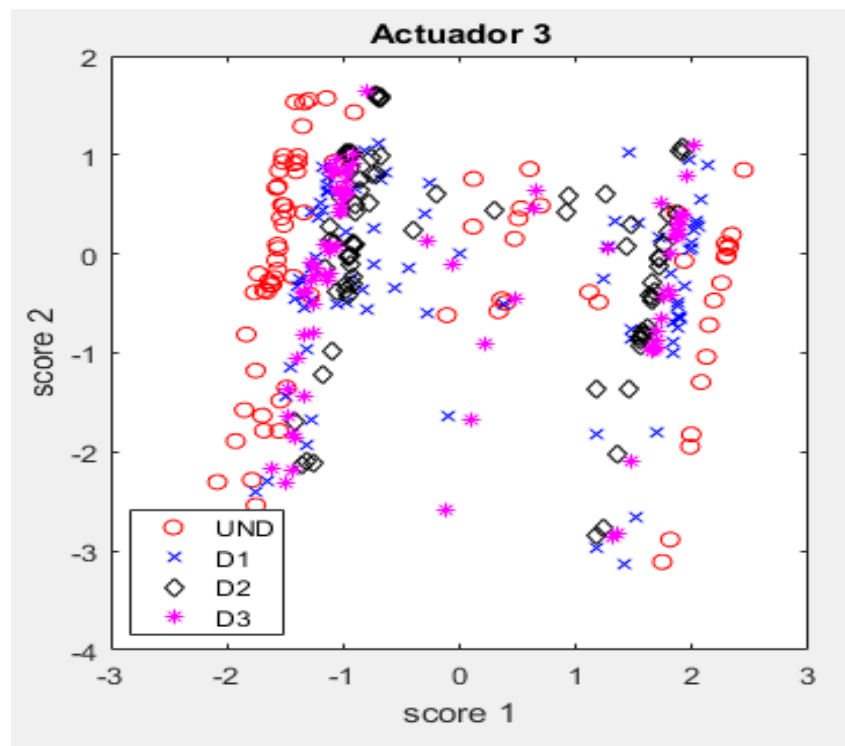


Figura 51. Gráfico de scores para la prueba 3, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

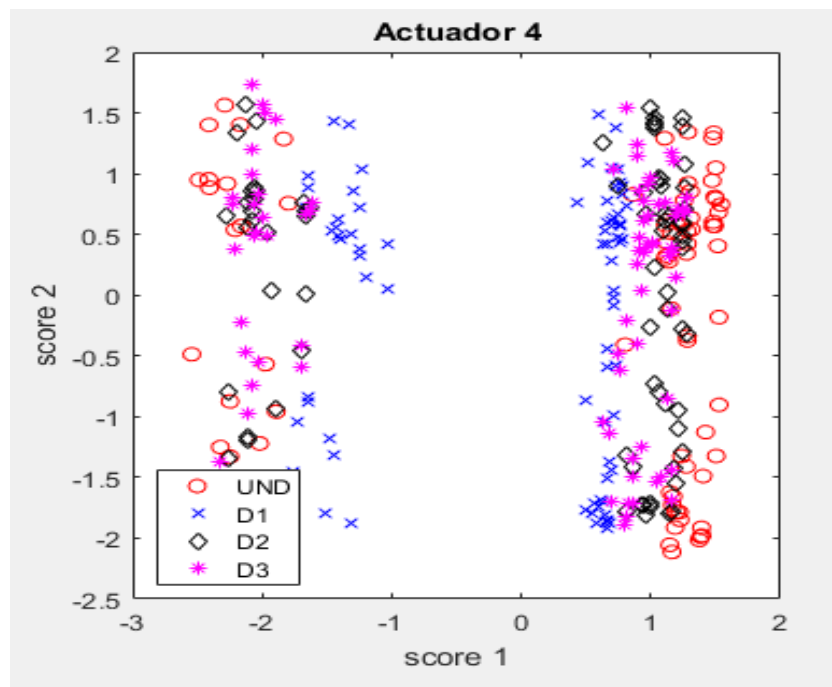


Figura 52. Gráfico de scores para la prueba 3, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

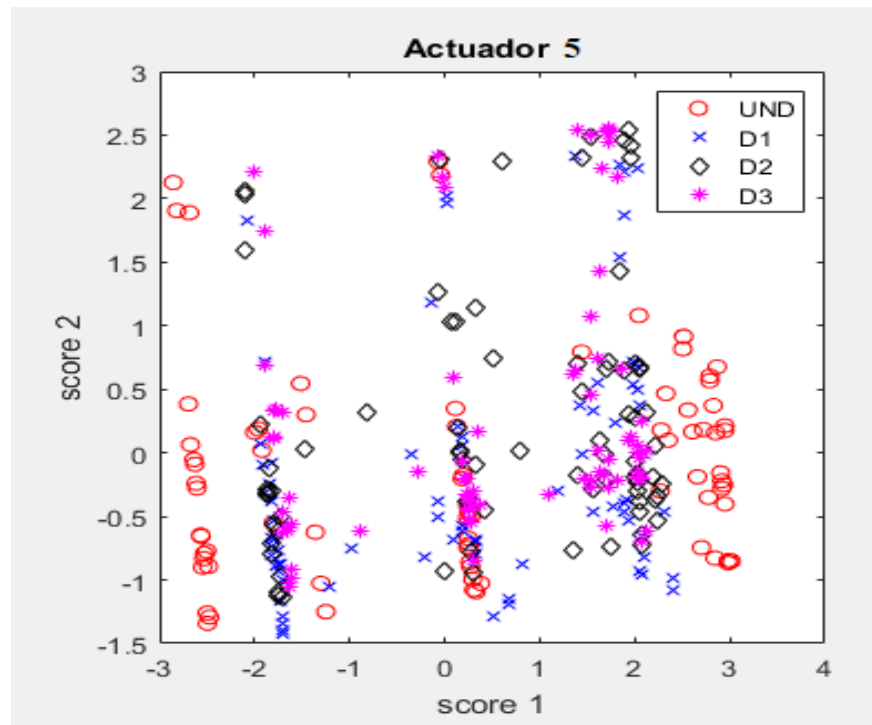


Figura 53. Gráfico de scores para la prueba 3, cuando el 5to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

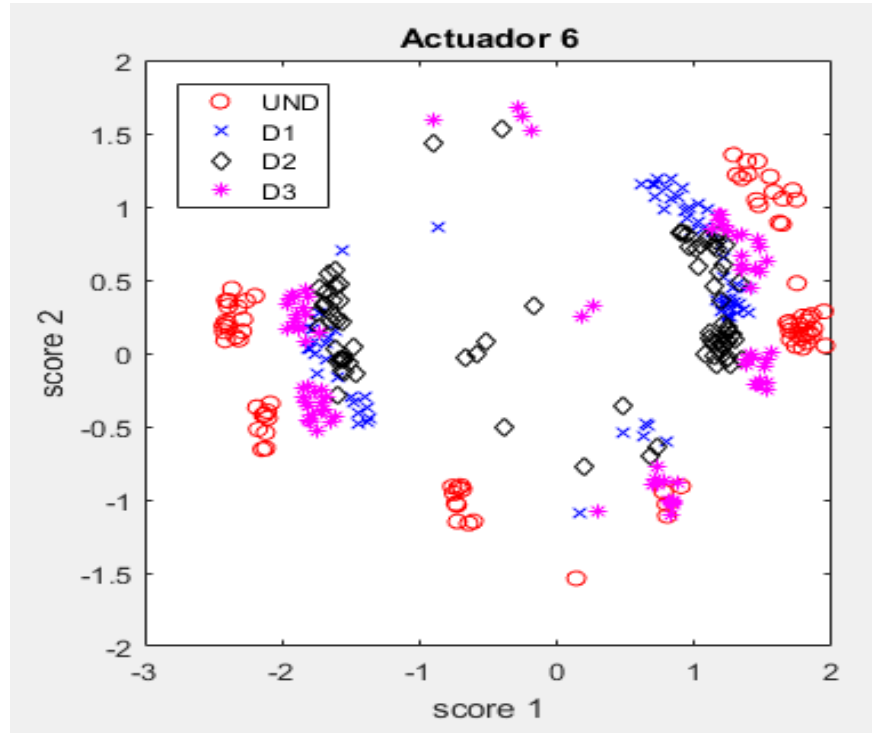


Figura 54. Gráfico de scores para la prueba 3, cuando el 6to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

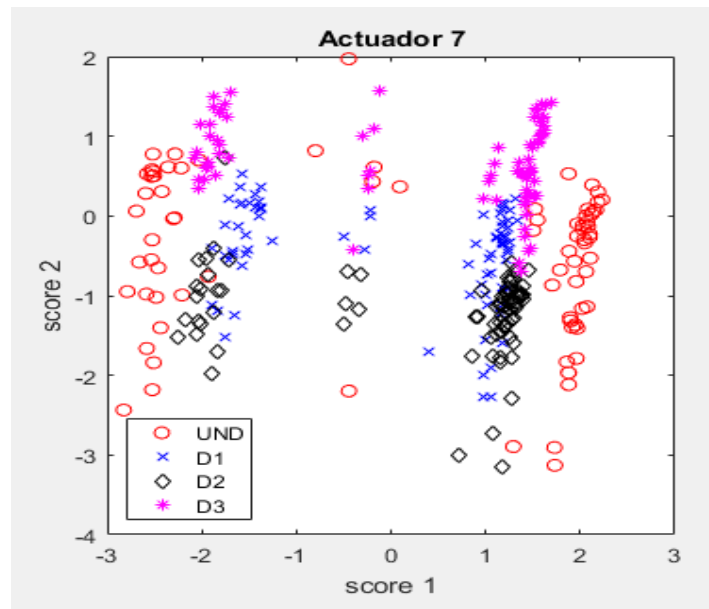


Figura 55. Gráfico de scores para la prueba 3, cuando el 7mo sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

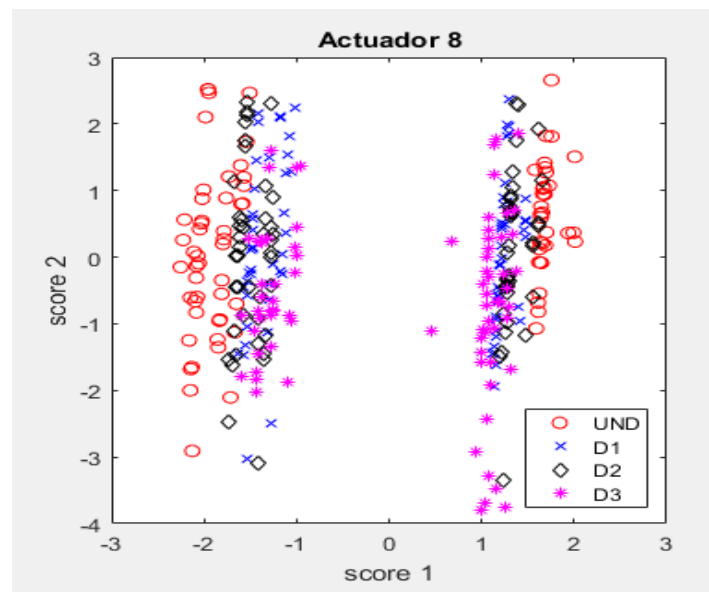


Figura 56. Gráfico de scores para la prueba 3, cuando el 8va sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Comparando los gráficos de “scores” de la prueba 3 (figura 49-56) con los gráficos de la prueba 1 (figura 15-18) y la prueba 2 (grafica 32-35), la diferencia es clara en cuanto a la distribución de los diferentes grupos de muestras, mientras que para la prueba 1 y 2 los grupos estaban dispersos por toda la gráfica y solapados unos con otros, para la prueba 3 los grupos tratan de estar un poco más compactos, conservando un espacio determinado. Sin embargo, el efecto de solapamiento entre

los grupos sigue siendo un factor radical, es decir que gracias a dicho efecto es imprescindible aclarar que, para el número y ubicación de sensores en esta prueba, la metodología de “scores” PCA (2 scores) es insuficiente, por tal motivo una vez más se decide analizar el gráfico de “scores” PCA (3 Scores).

c. Gráficos de “scores” PCA (3 Scores)

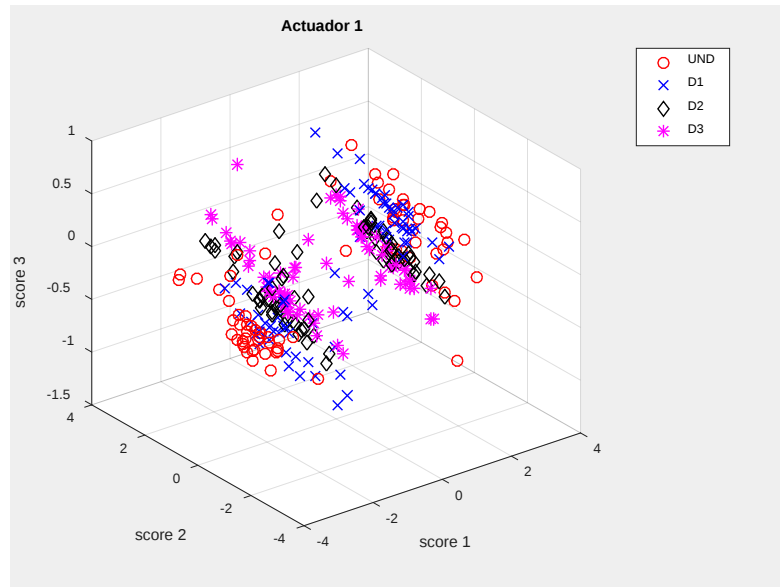


Figura 57. Gráfico de scores (3D) para la prueba 3, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

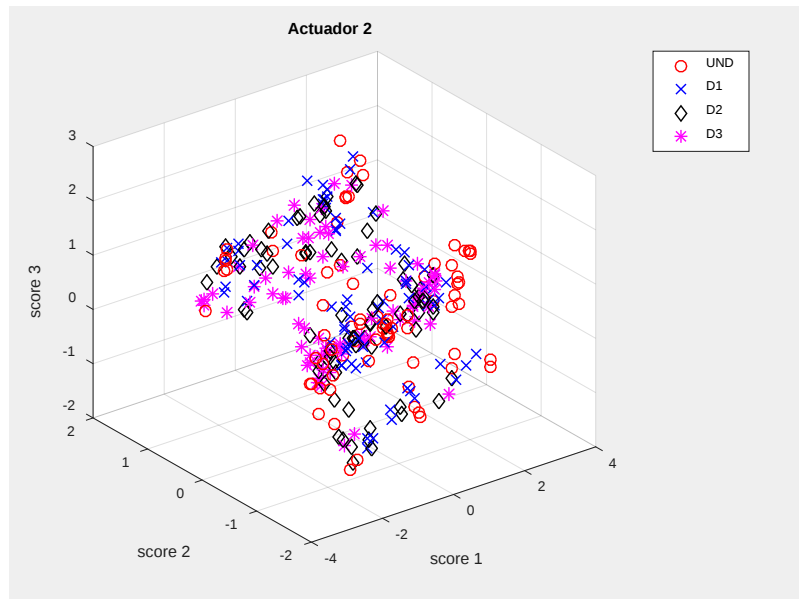


Figura 58. Gráfico de scores (3D) para la prueba 3, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

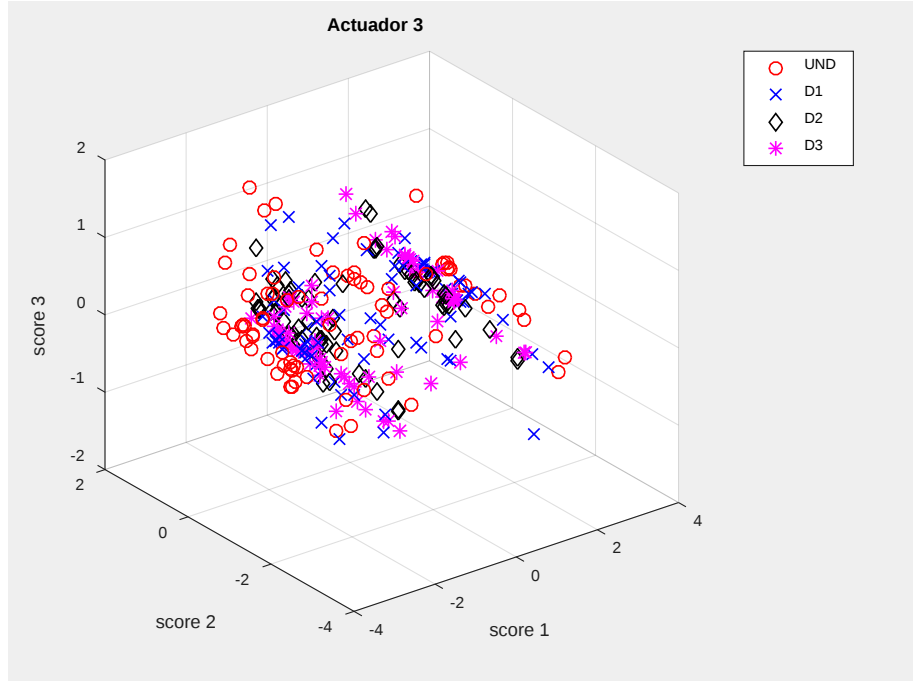


Figura 59. Gráfico de scores (3D) para la prueba 3, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

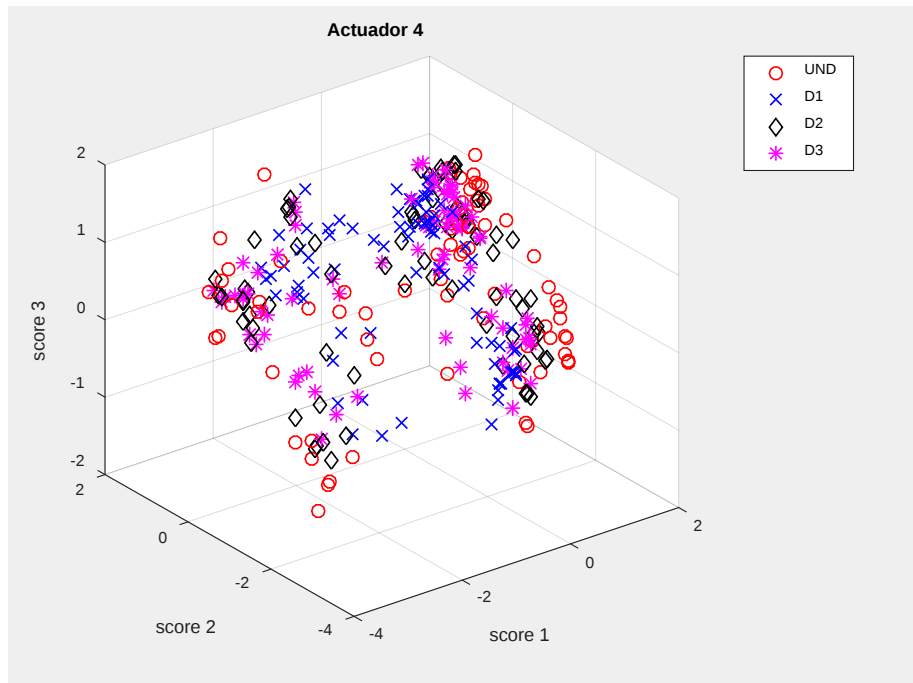


Figura 60. Gráfico de scores (3D) para la prueba 3, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

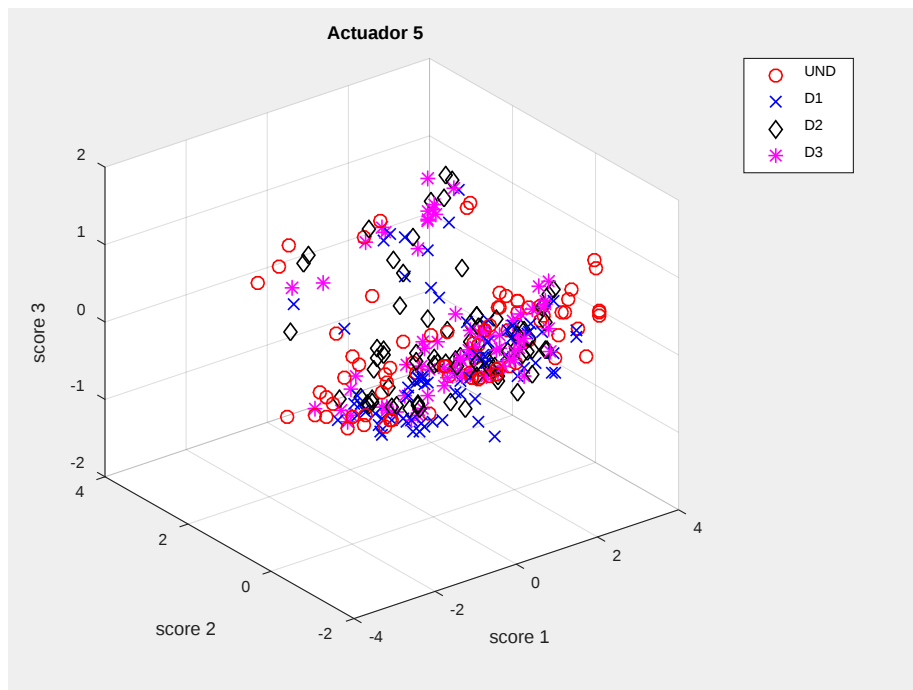


Figura 61. Gráfico de scores (3D) para la prueba 3, cuando el 5to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

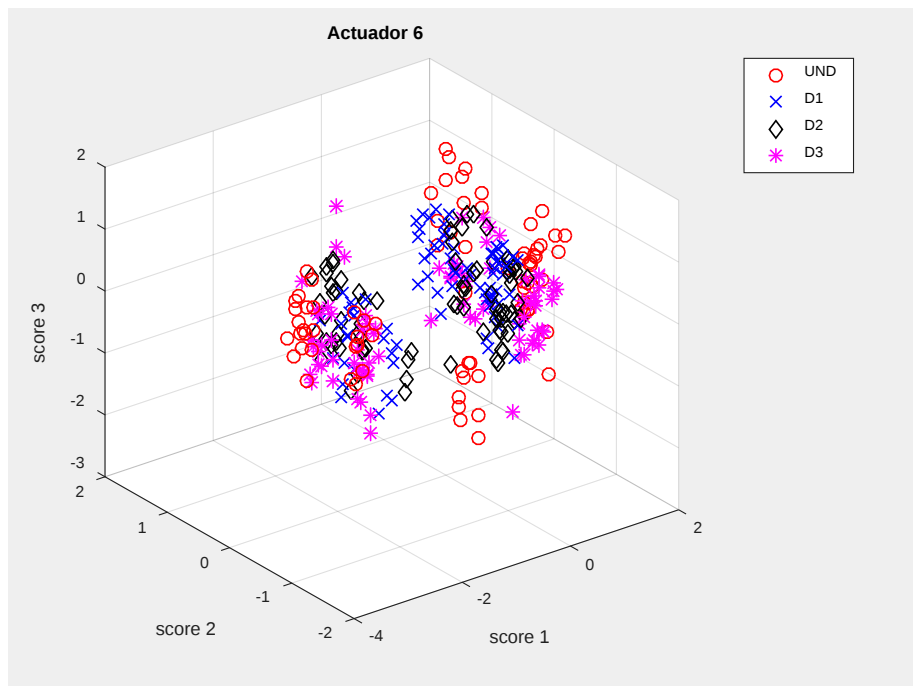


Figura 62. Gráfico de scores (3D) para la prueba 3, cuando el 6to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

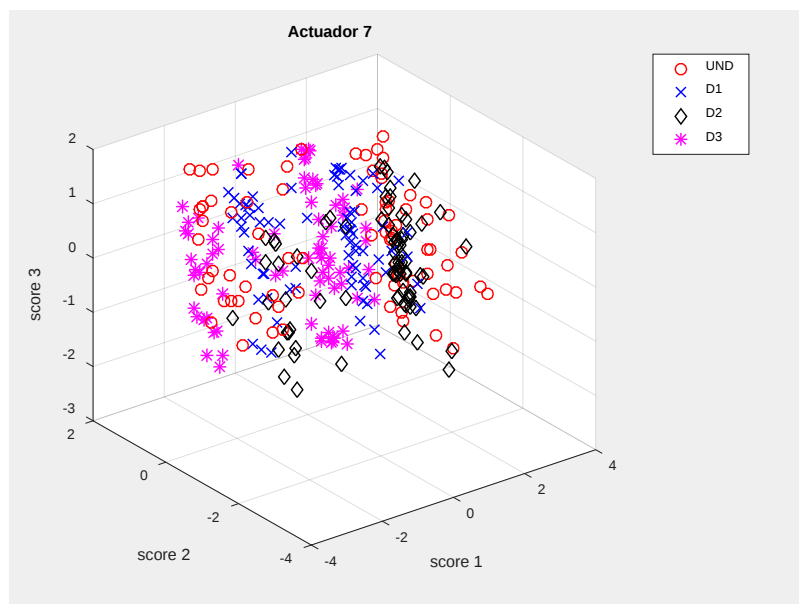


Figura 63. Gráfico de scores (3D) para la prueba 3, cuando el 7mo sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

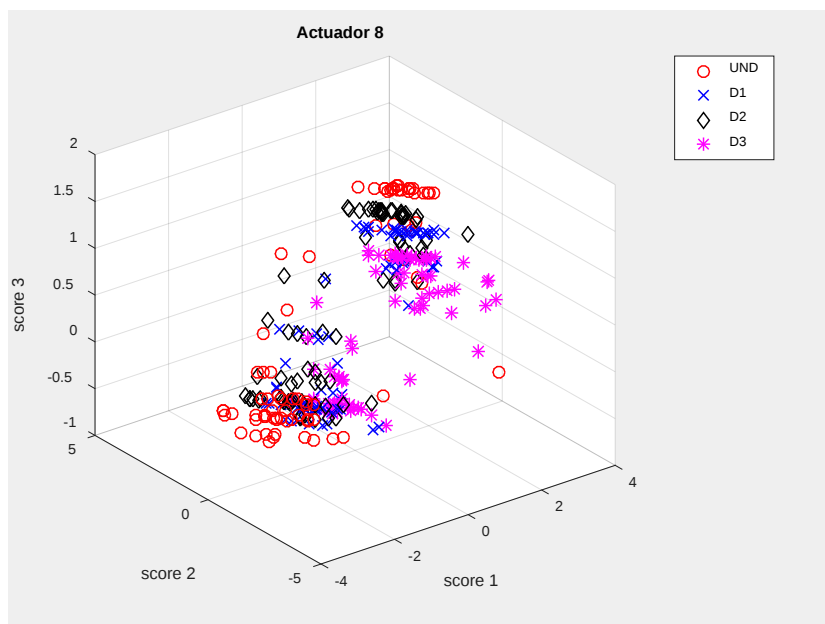


Figura 64. Gráfico de scores (3D) para la prueba 3, cuando el 8va sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

En las gráficas de “scores” PCA en 3D para a prueba 3 (figuras 57-64), a pesar de que algunos grupos de muestras tienden a conservar un espacio específico, esto no representa un factor determinante en el momento de afirmar, que esta metodología es una posible solución al problema de determinar daños sobre la estructura metálica, ya que muy pocas, pero relevantes muestras de los diferentes

grupos están solapadas unas con otras, por tal razón, una vez más se descarta esta metodología.

d. Q-Index

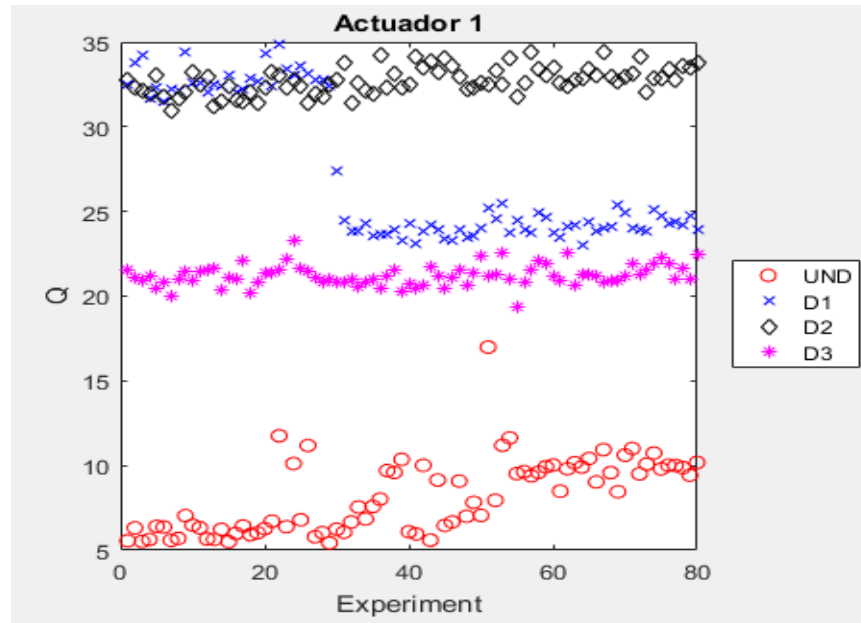


Figura 65. Índice Q para la prueba 3, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

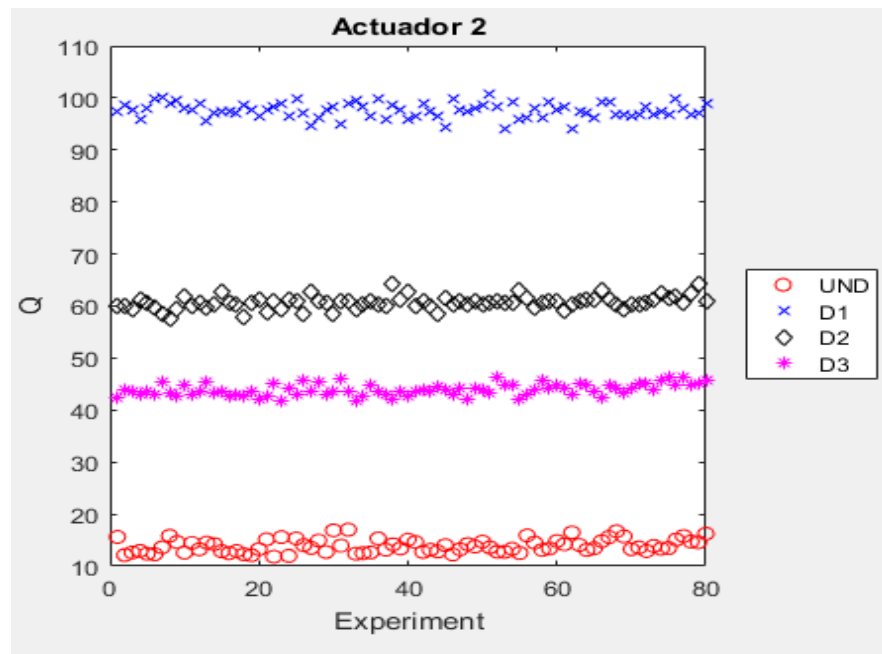


Figura 66. Índice Q para la prueba 3, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

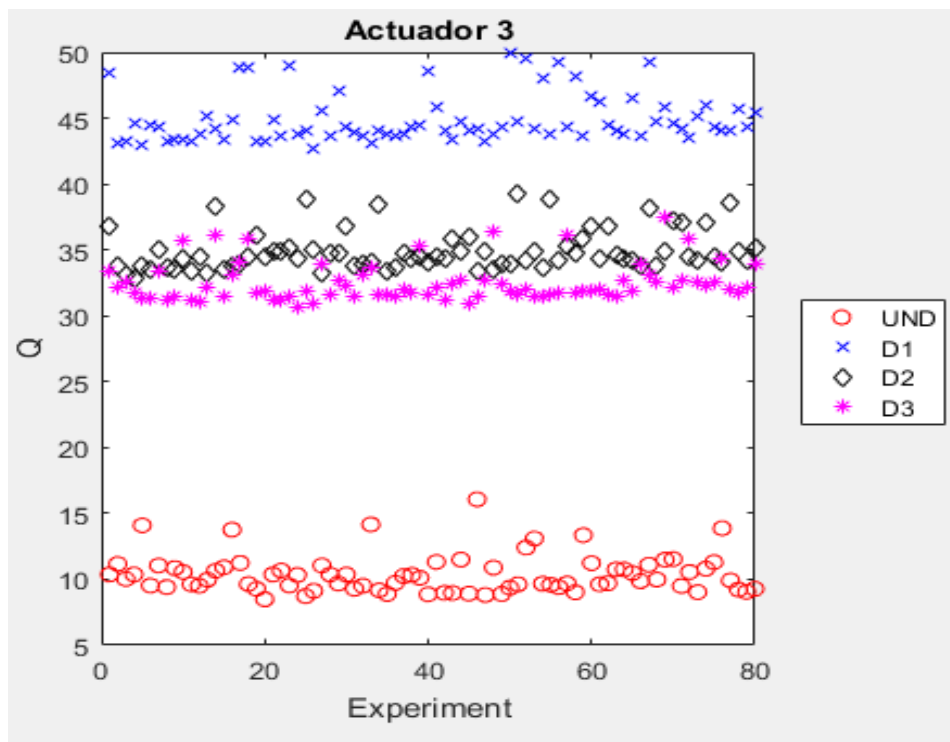


Figura 67. Índice Q para la prueba 3, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

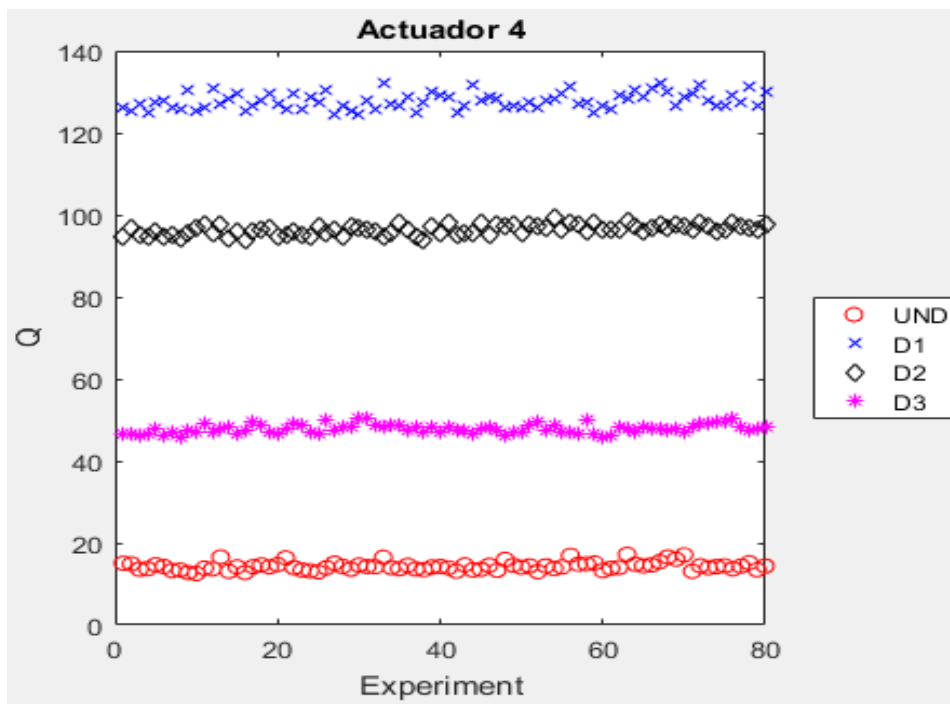


Figura 68. Índice Q para la prueba 3, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

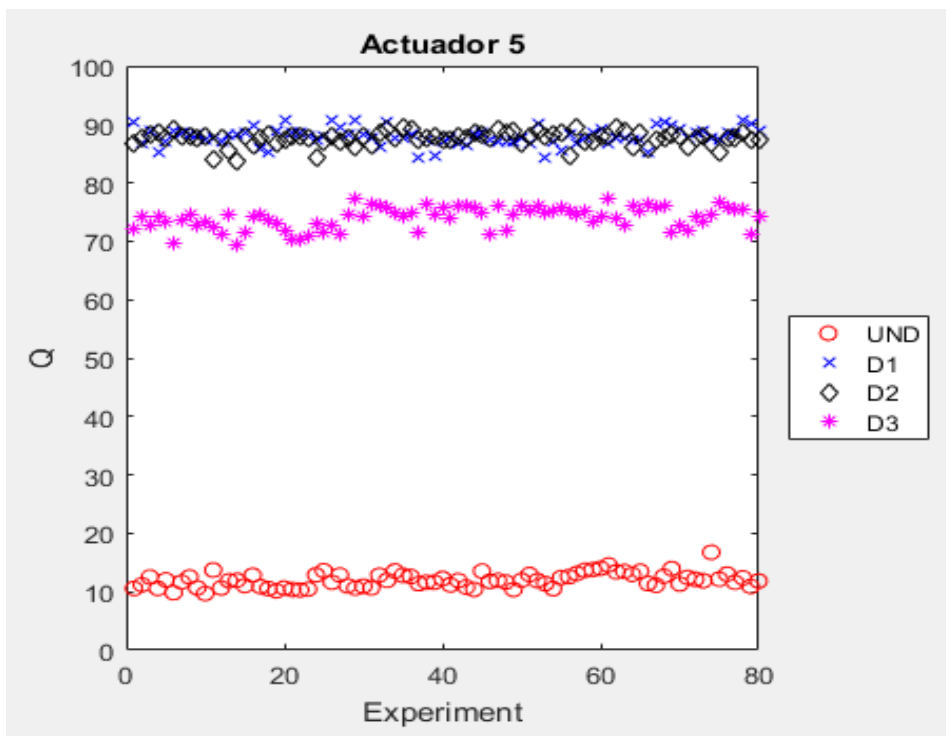


Figura 69. Índice Q para la prueba 3, cuando el 5to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

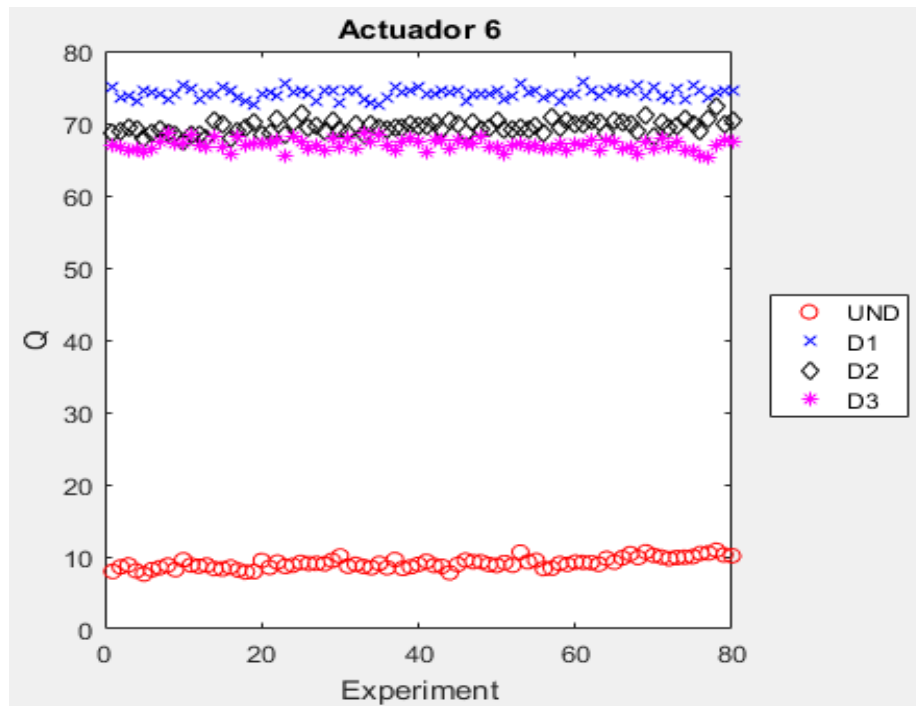


Figura 70. Índice Q para la prueba 3, cuando el 6to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

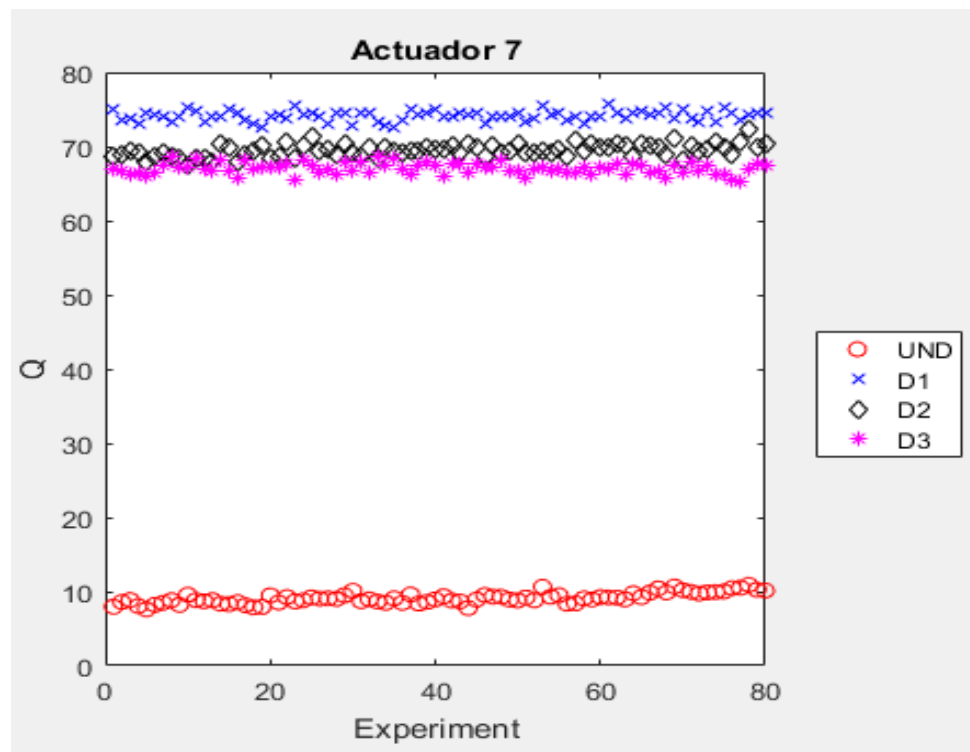


Figura 71. Índice Q para la prueba 3, cuando el 7mo sensor trabaja como actuador.
Fuente: Autores.

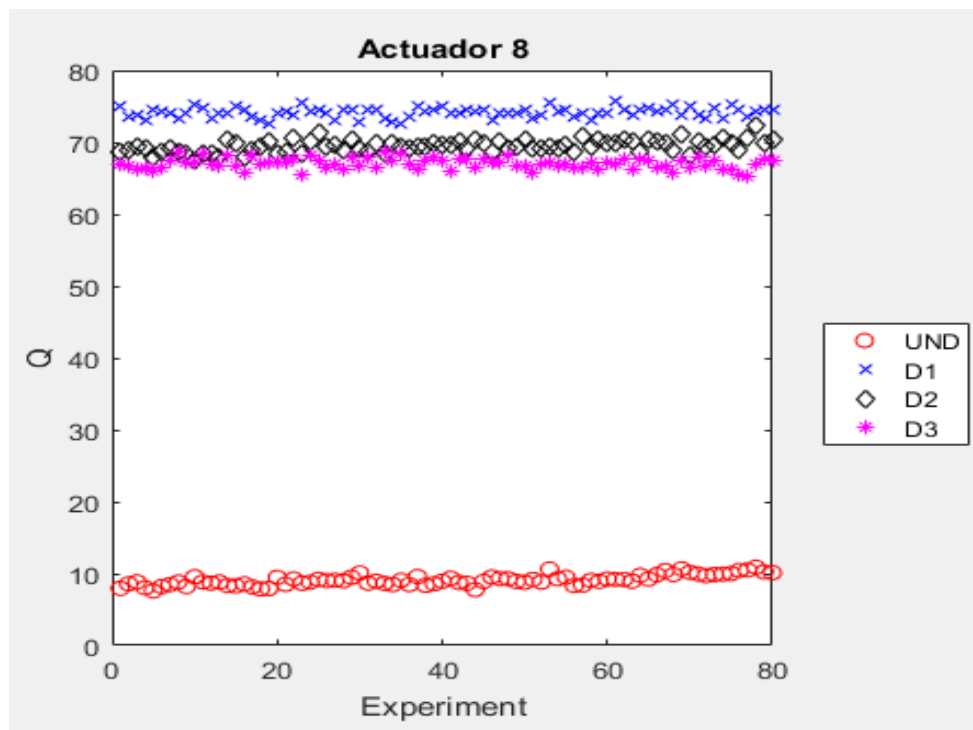
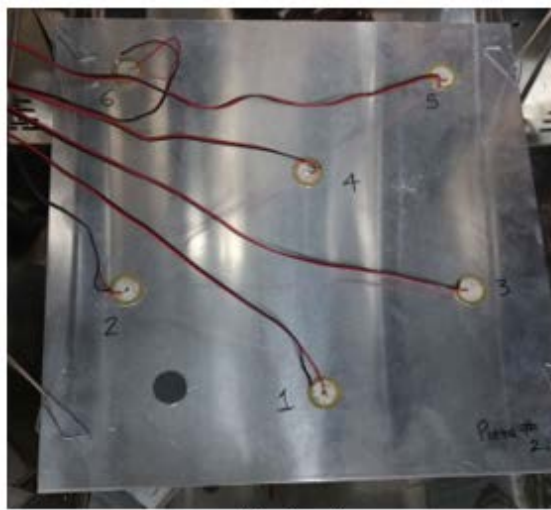


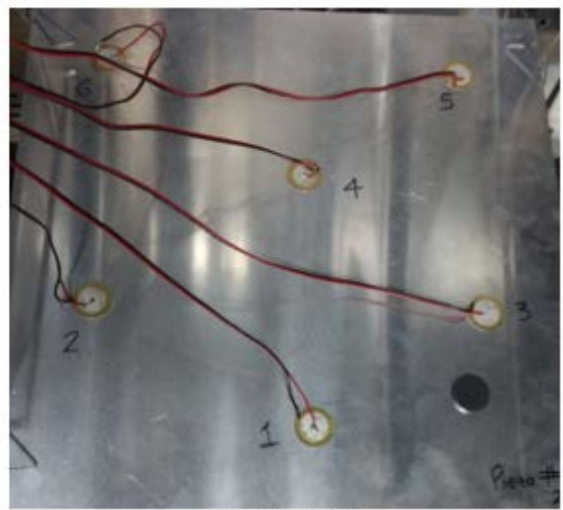
Figura 72. Índice Q para la prueba 3 cuando el 8vo sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Para la prueba 3, el análisis de los resultados de las gráficas del índice estadístico Q (figuras 65-72) a diferencia de las dos pruebas anteriores es totalmente abrumador, ya que en cada una de las gráficas es evidente observar la clara diferencia que existe entre los grupos de muestras de los daños respecto al grupo de muestras de la estructura sana, llegados a este punto, es verídico afirmar que para el numero de sensores utilizados y su ubicación sobre la estructura metálica y la metodología del índice estadístico Q en esta prueba, la detección de daños es positiva.

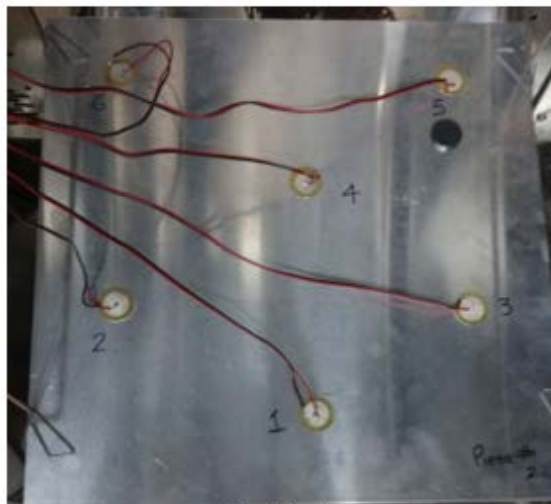
4. Prueba Numero 4:



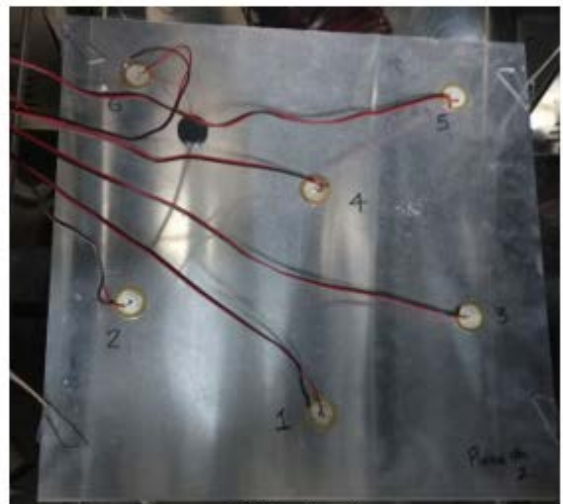
a. Daño 1



b. Daño 2



c. Daño 5.



d. Daño 4.

Figura 73. Instrumentacion para la placa de la prueba #4. Placa implementada en trabajo de grado. Fuente: Autores.ⁱ

a. Distribución de la Varianza.

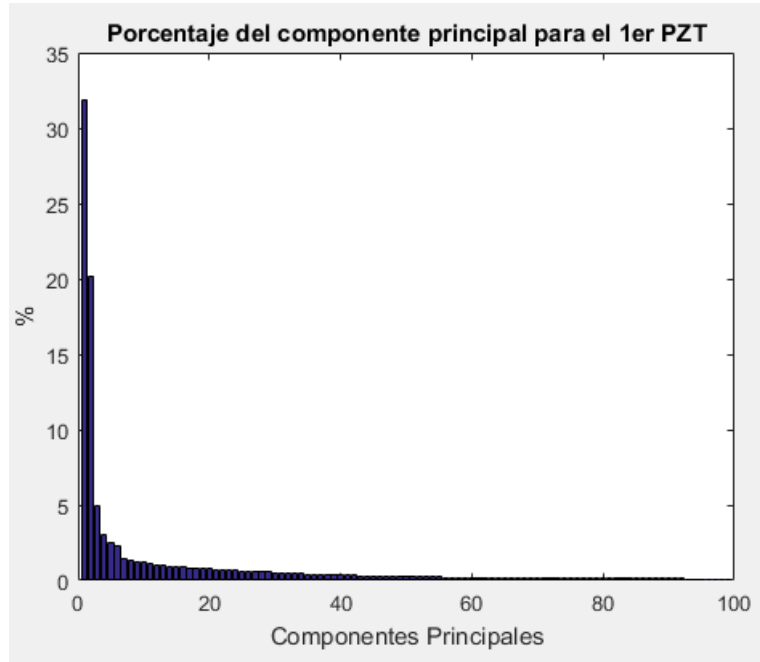


Figura 74. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 4, cuando el 1er piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

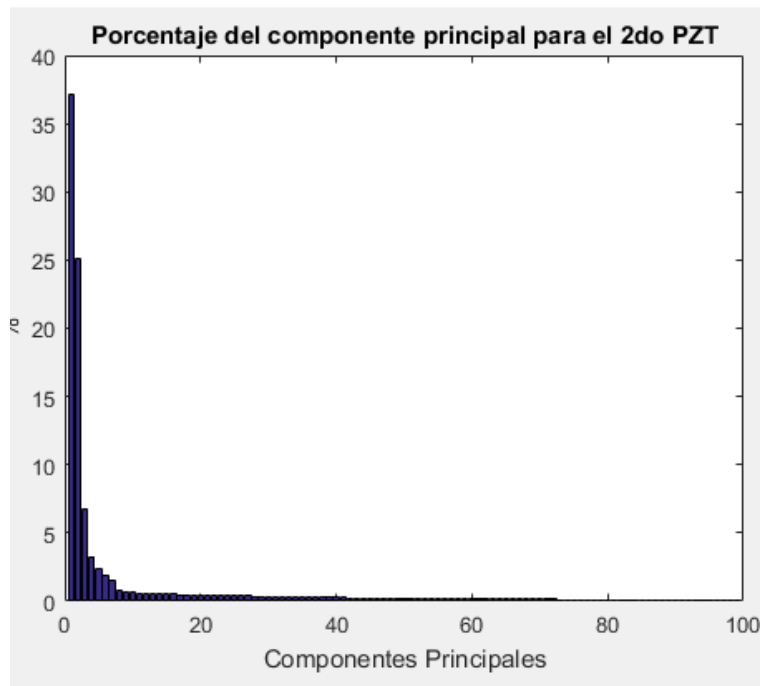


Figura 75. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 4, cuando el 2do piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

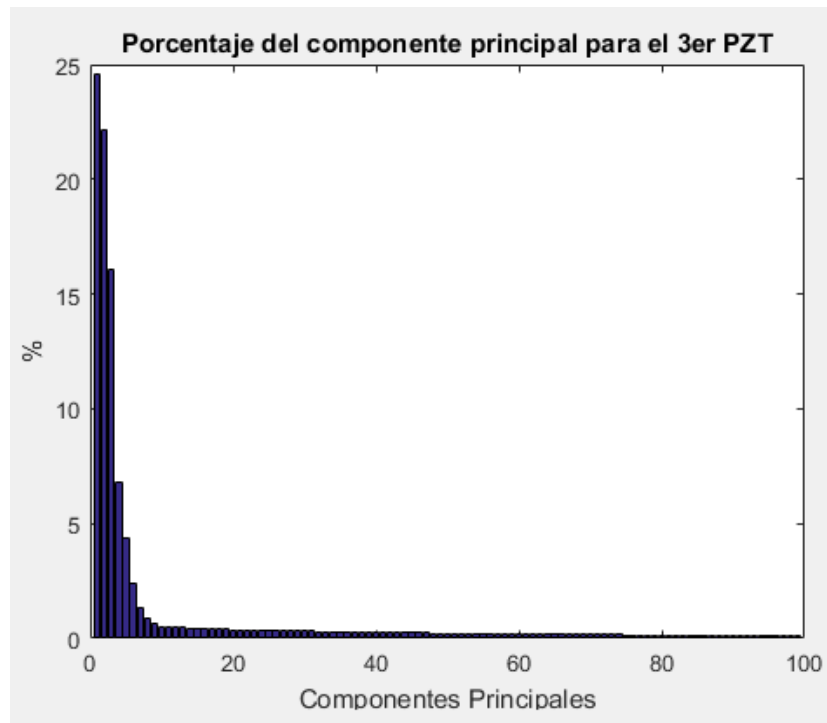


Figura 76. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 4, cuando el 3er piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

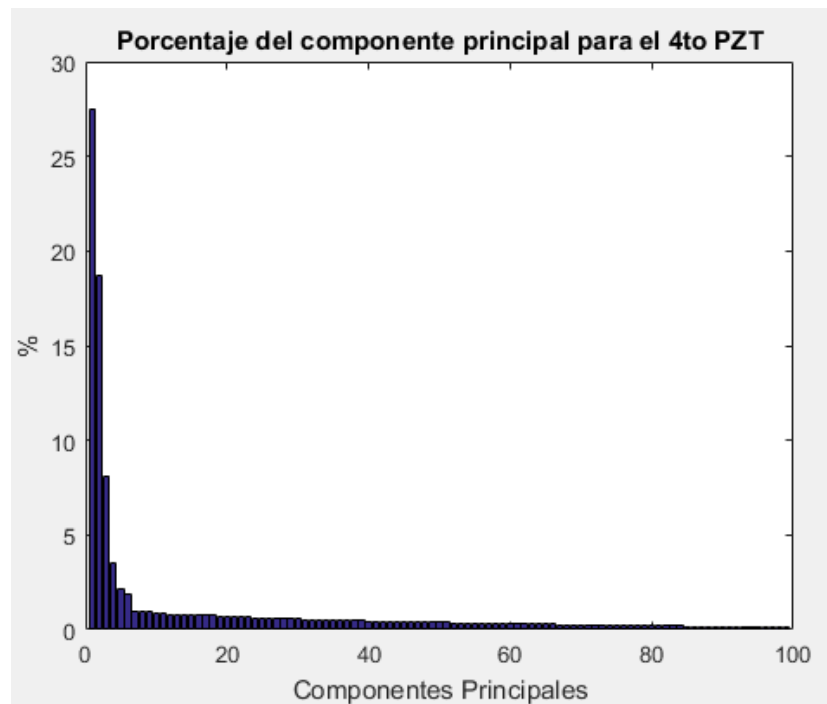


Figura 77. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 4, cuando el 4to piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

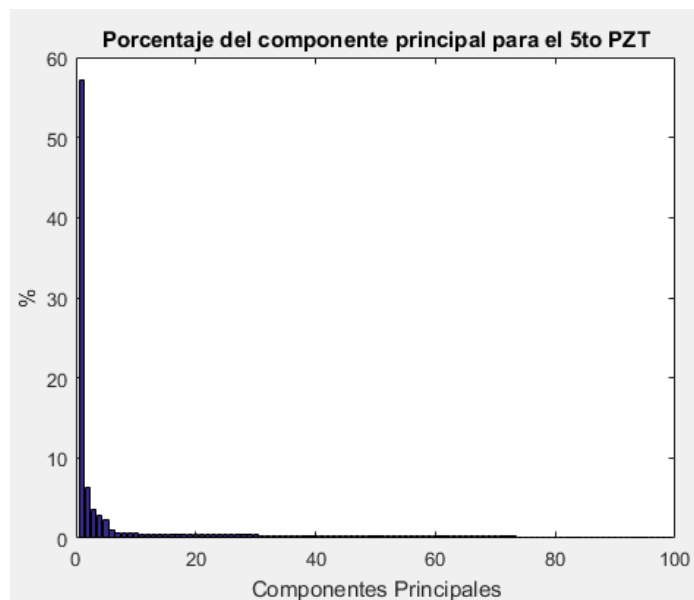


Figura 78. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 4, cuando el 5to piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

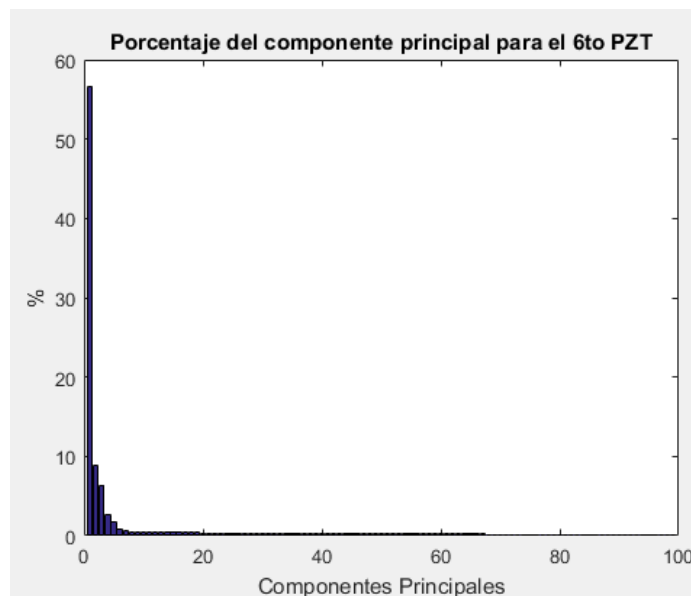


Figura 79. Porcentaje de la varianza acumulada para la prueba 3, cuando el 6to piezoeléctrico trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Las gráficas de la distribución de la varianza acumulada para la prueba número 4 (figuras 74-79), al igual que las gráficas de la distribución de la varianza de la prueba 3, el primer componente principal tiene un valor alto, sin embargo para llegar a más del 80% de la varianza acumulada es necesario pasar del tercer componente, esperando así que las gráficas de “scores” PCA (2D y 3D) proporcionen alguna información importante pero no definitiva para la toma de la decisión de establecer esta metodología viable para la detección de daños sobre estructuras metálicas.

b. Gráfico de “scores” PCA

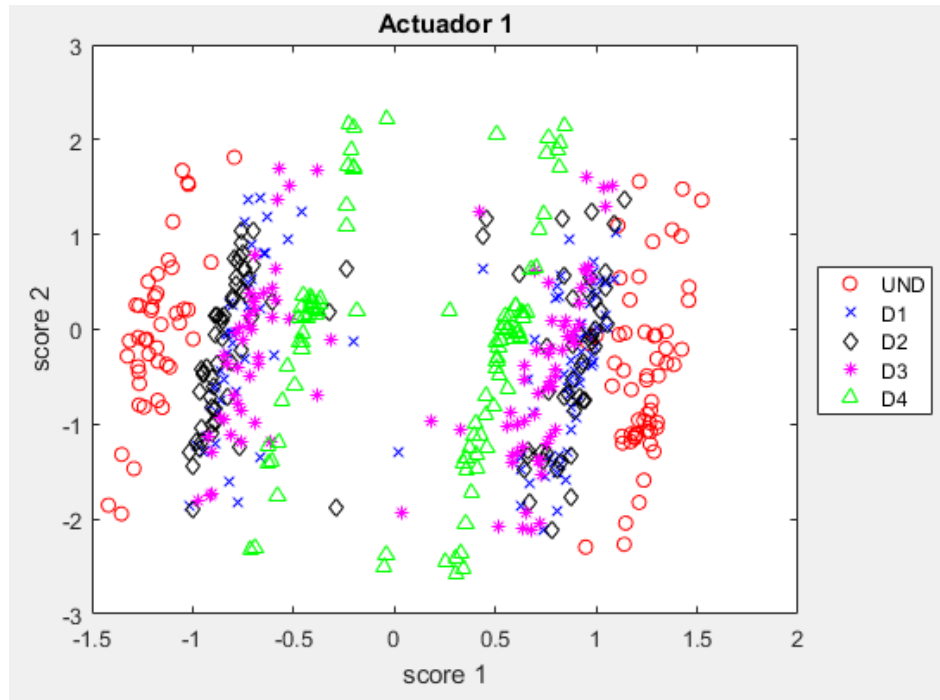


Figura 80. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

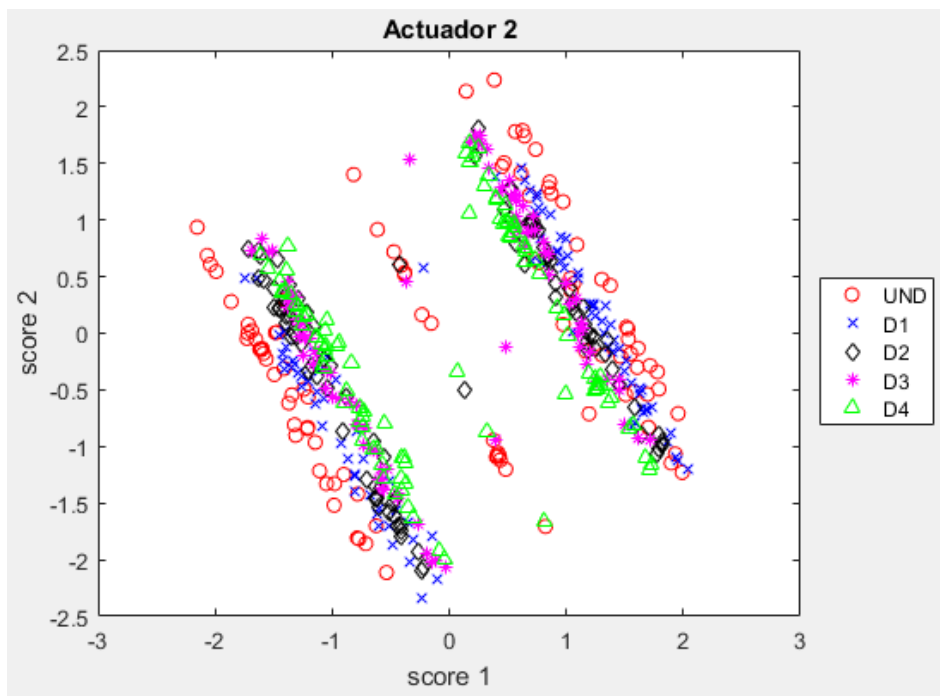


Figura 81. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

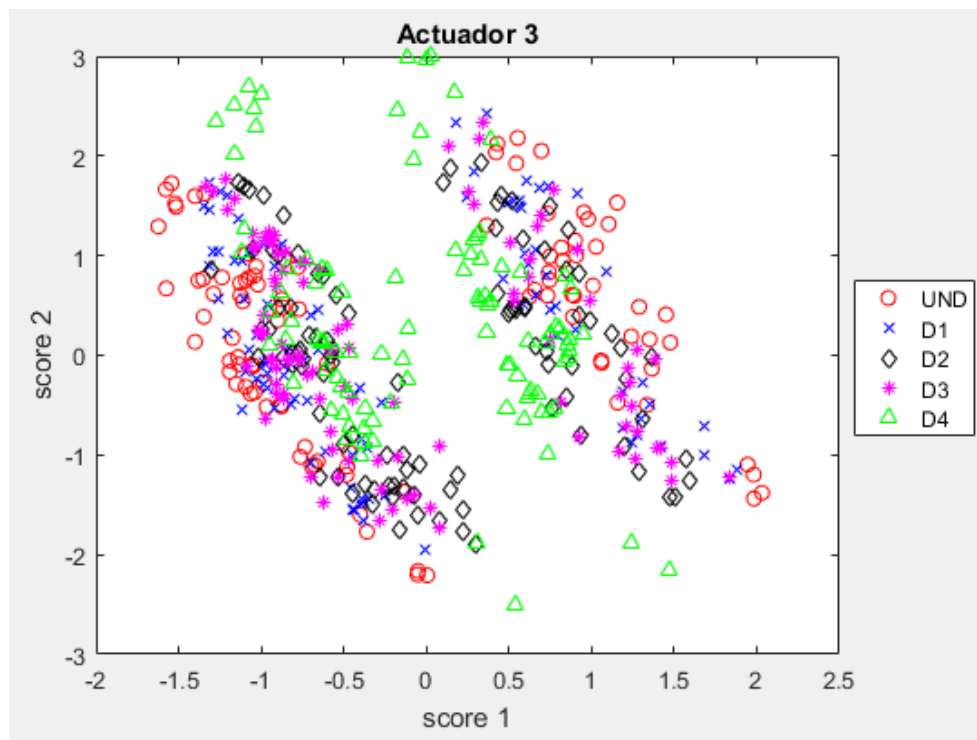


Figura 82. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

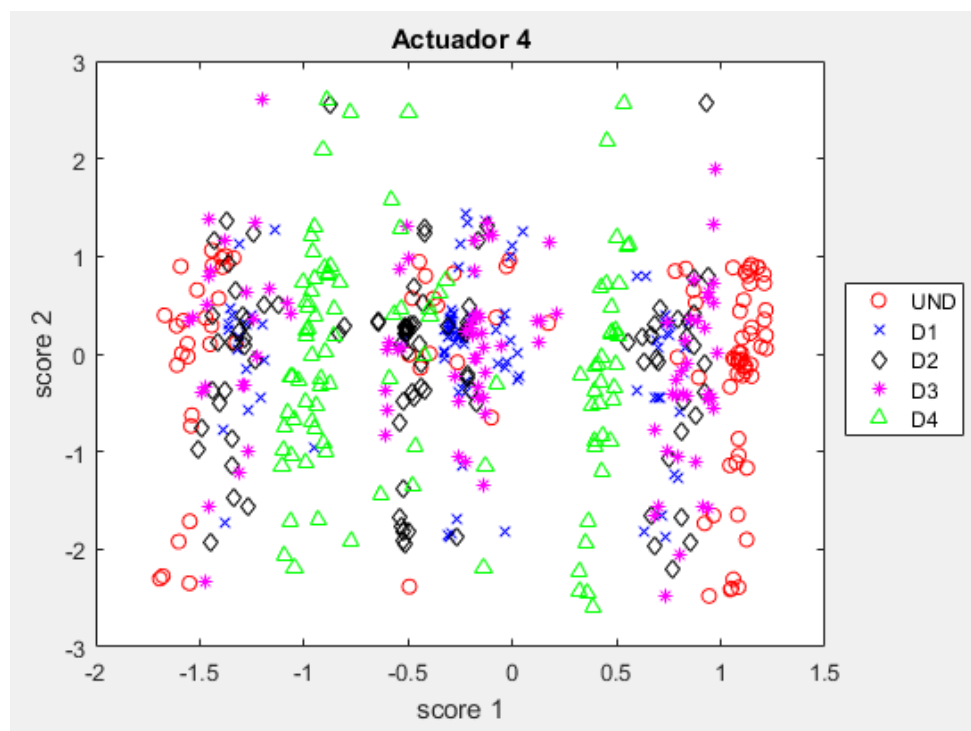


Figura 83. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

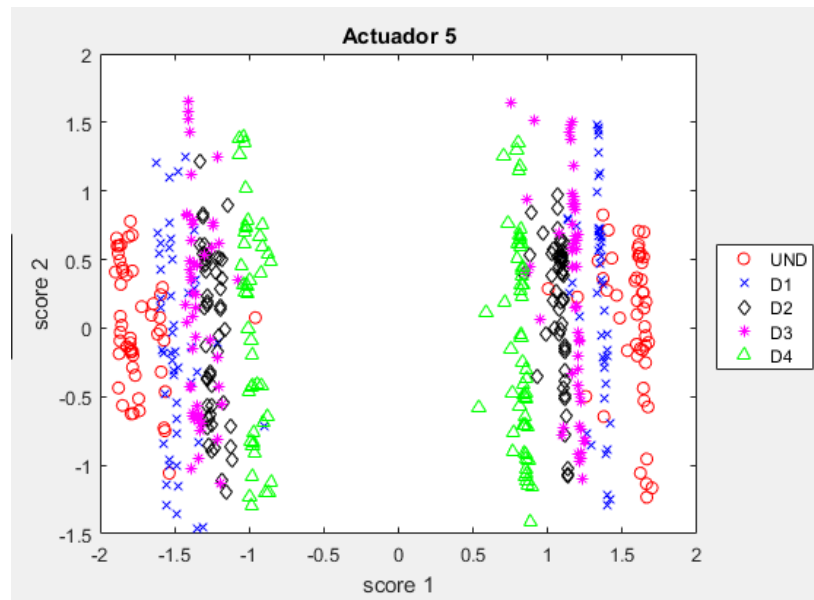


Figura 84. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 5to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

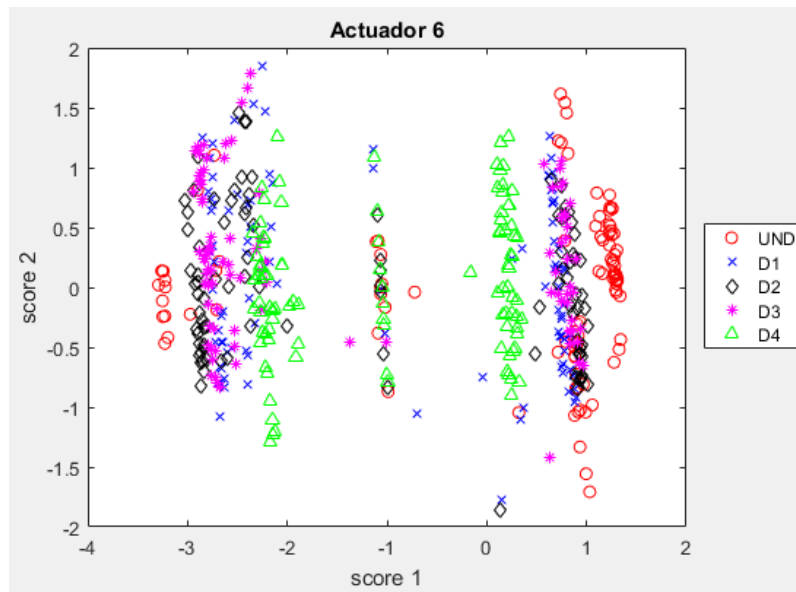


Figura 85. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 6to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

Como se esperaba según el análisis realizado de las gráficas de la distribución de la varianza para la prueba 4, en los gráficos de los “scores” PCA (2D) (figuras 80-85), cada uno de los grupos tratan de mantenerse juntos, sin embargo el solapamiento entre ellos es el factor que no hace viable la utilización de esta metodología en cuanto a la detección de daños sobre estructuras metálicas ya que no es claro diferenciar las muestras de una estructura sana con las muestras de una estructura con algún tipo de daño.

c. Gráficos de “scores” PCA (3 Scores)

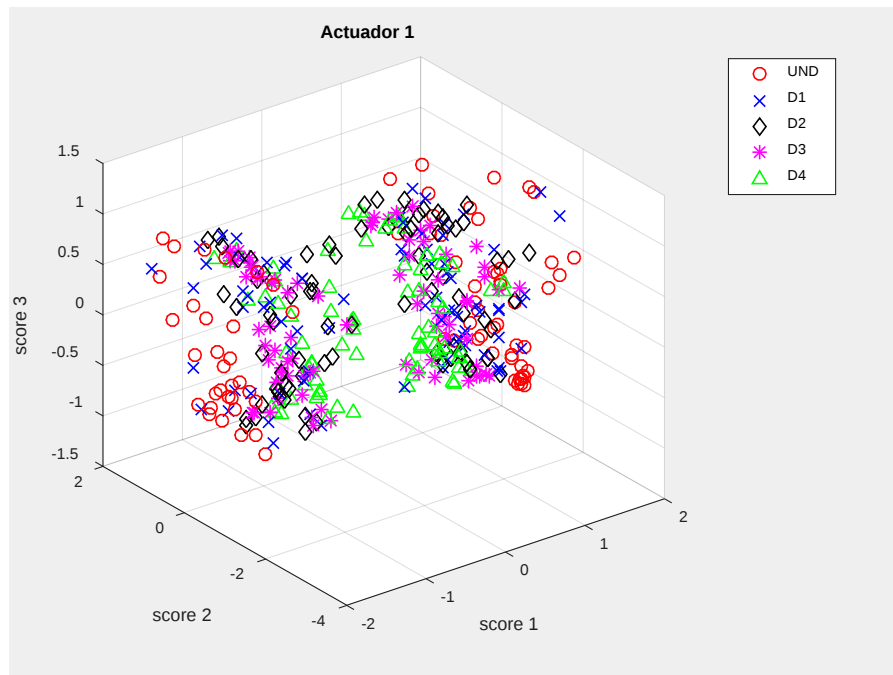


Figura 86. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 1er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

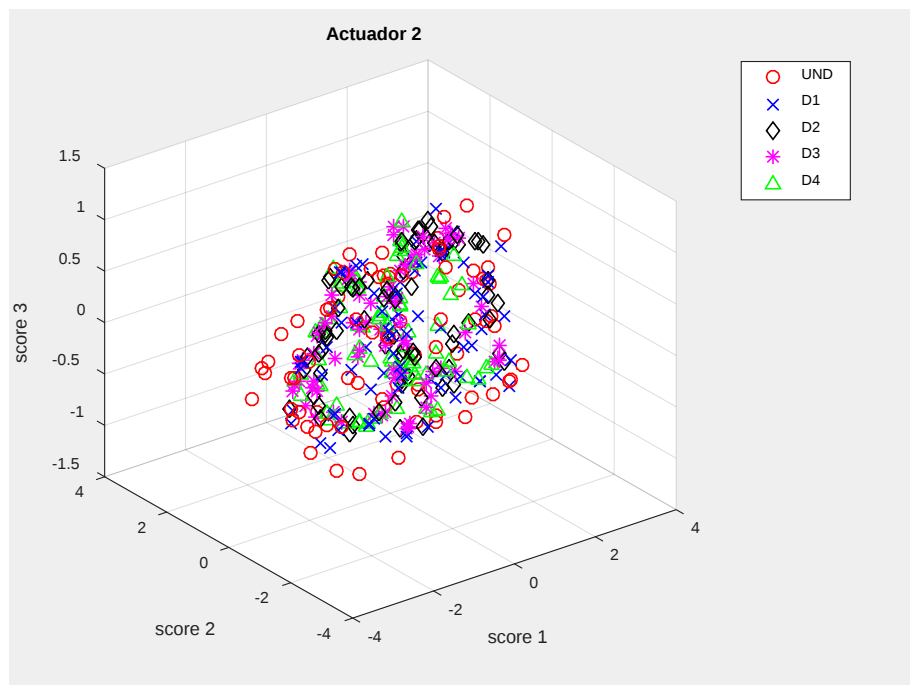


Figura 87. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 2do sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

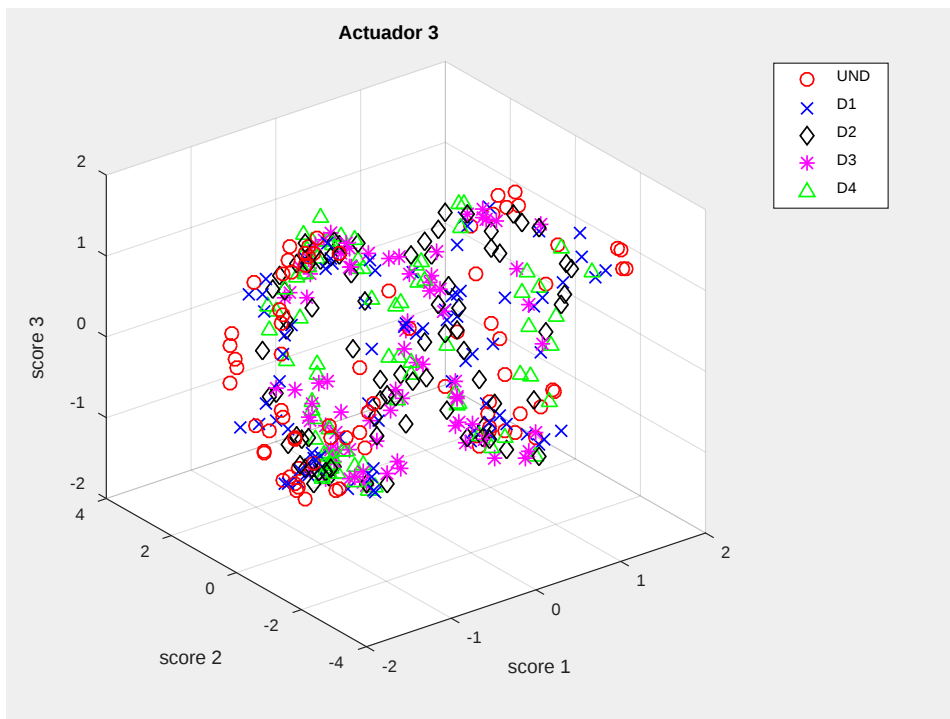


Figura 88. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 3er sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

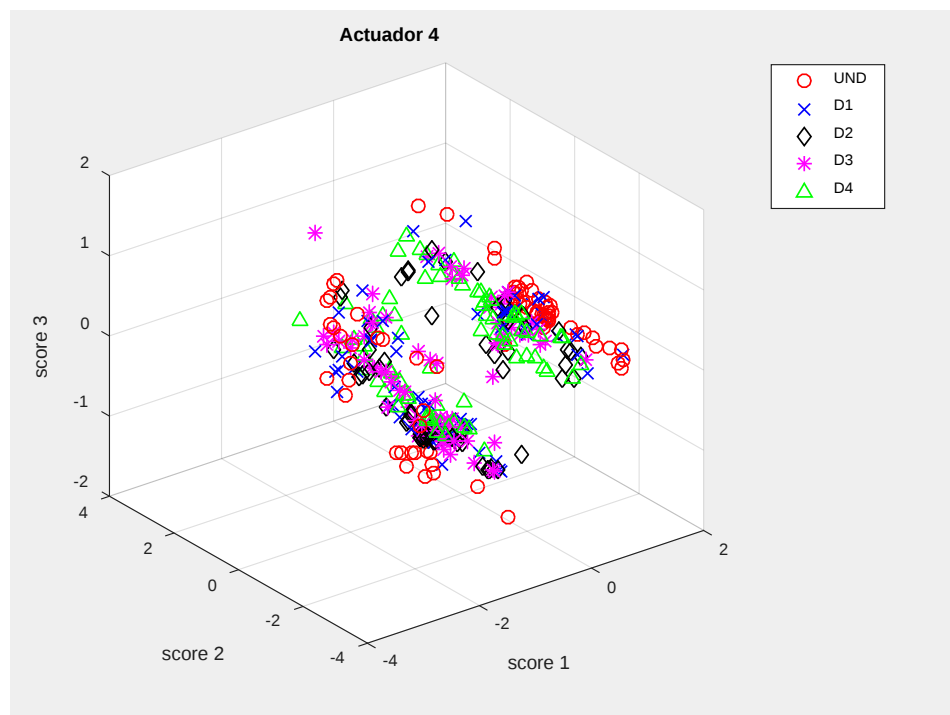


Figura 89. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 4to sensor trabaja como actuador. Fuente: Autores.

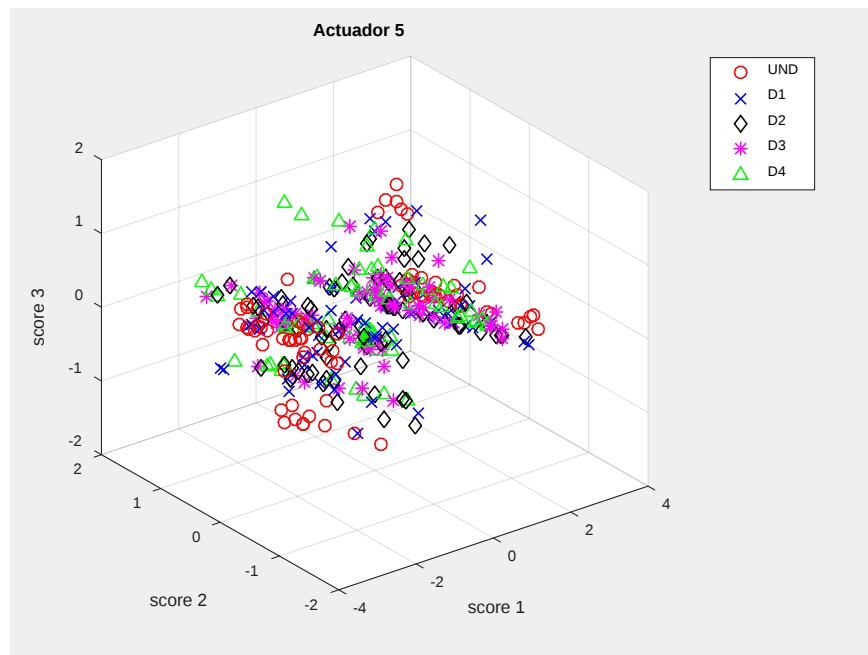


Figura 90. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 5to sensor trabaja como actuador.

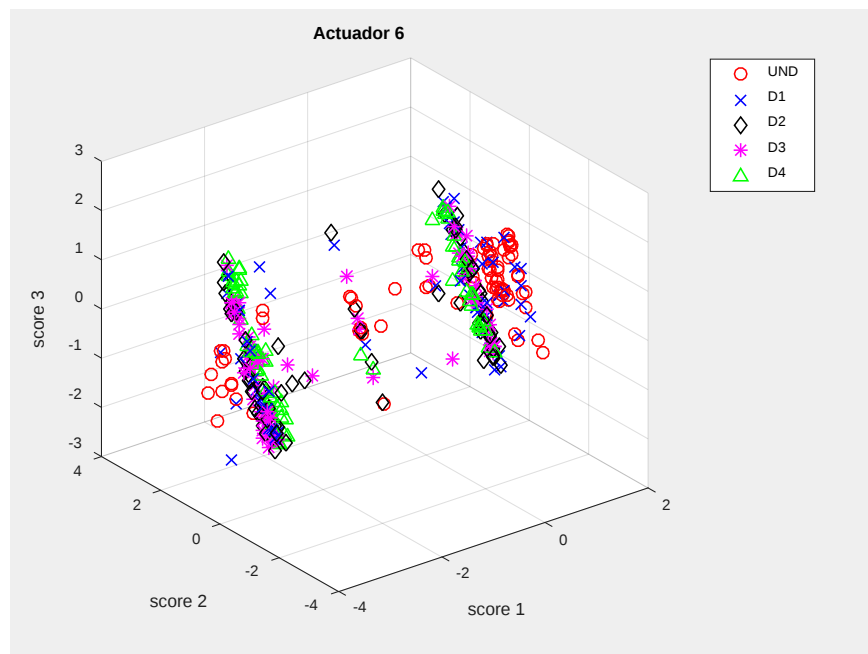


Figura 91. Gráfico de scores para la prueba 4, cuando el 6to sensor trabaja como actuador.

A diferencia de la prueba 3, en la prueba 4 se tiene 4 daños, razón por la cual en los grupos de muestras de las gráficas de “scores” PCA en 3D (figuras 86-91). Se observa como estos están solapados en su gran mayoría unos con otros, dando así

a entender que es imposible diferenciar algún daño X respecto a la estructura sana. Dicho lo anterior, se descarta esta metodología y se procede con el análisis del índice estadístico Q.

d. Q-Index

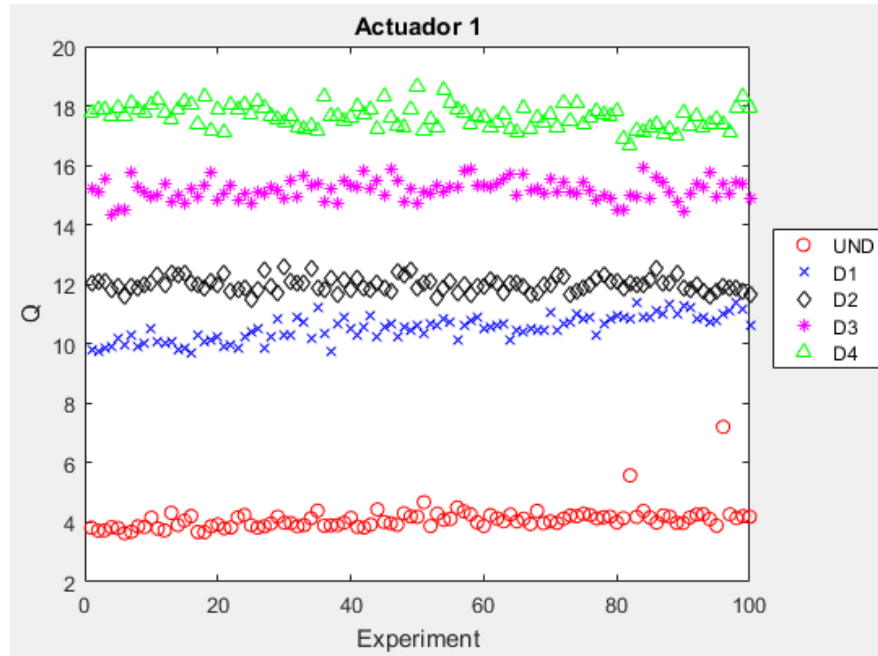


Figura 92. Índice Q para la prueba 4 cuando el 1er sensor trabaja como actuador.

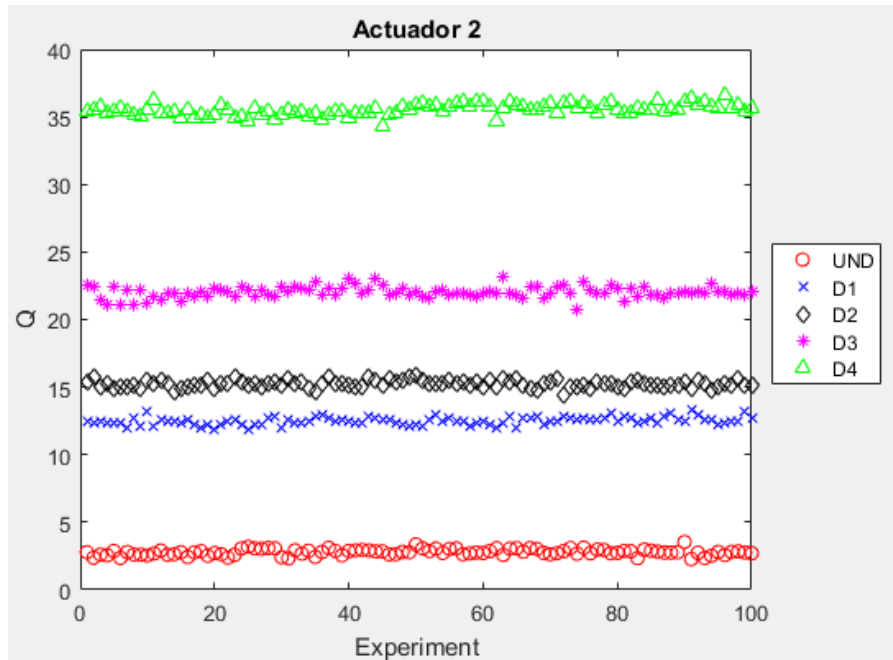


Figura 93. Índice Q para la prueba 4 cuando el 2do sensor trabaja como actuador.

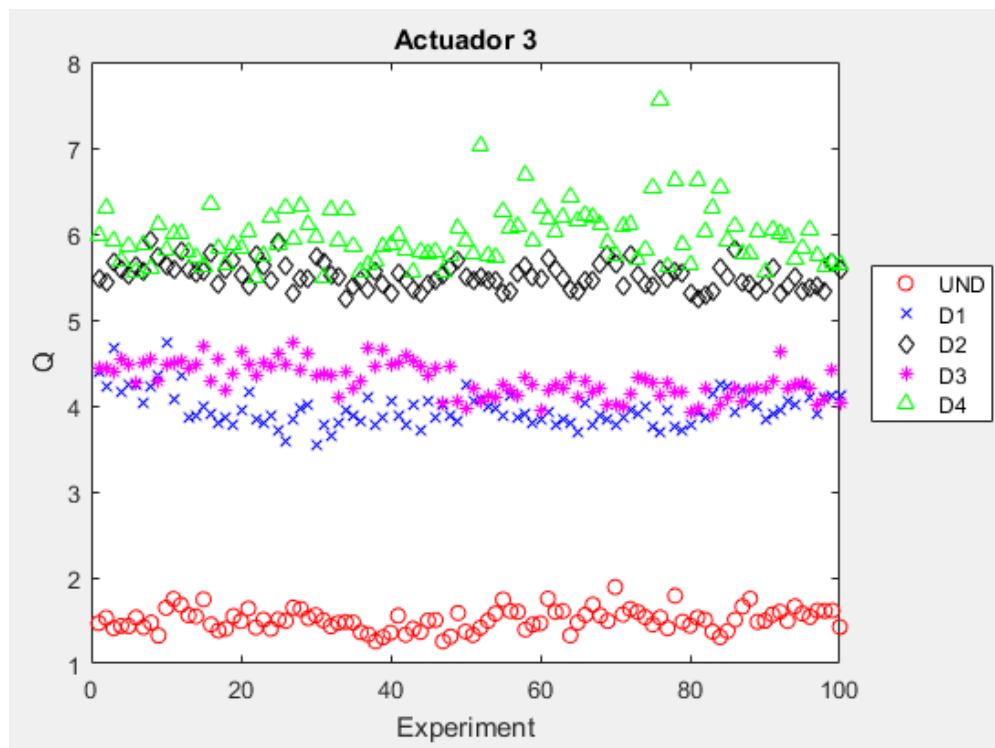


Figura 94. Índice Q para la prueba 4 cuando el 3er sensor trabaja como actuador.

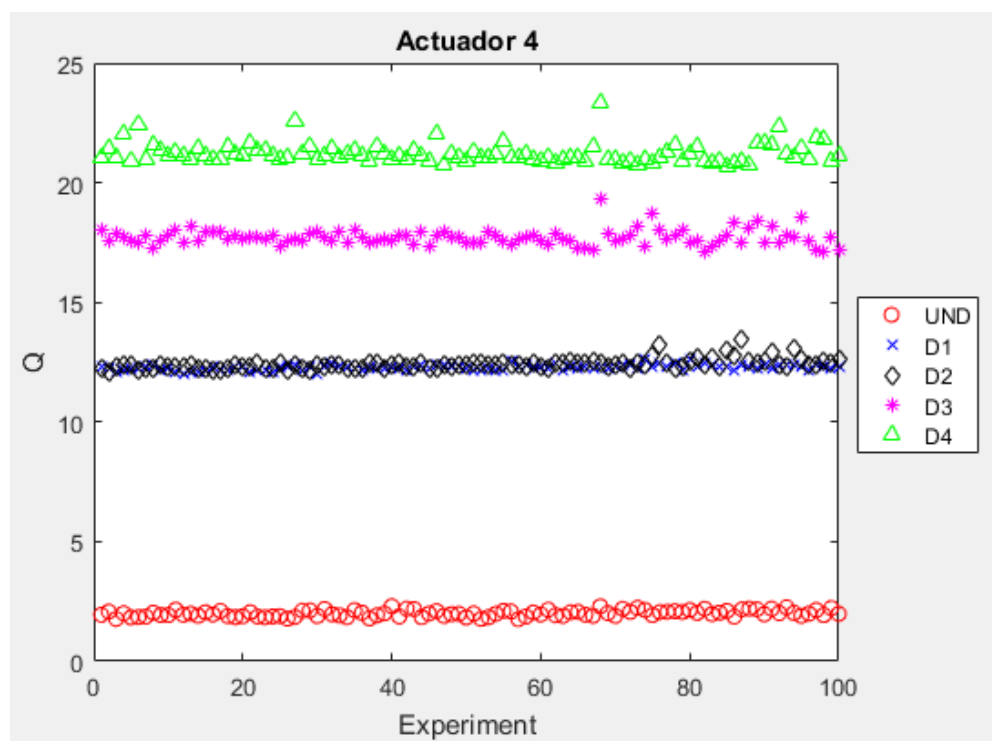


Figura 95. Índice Q para la prueba 4 cuando el 4to sensor trabaja como actuador.

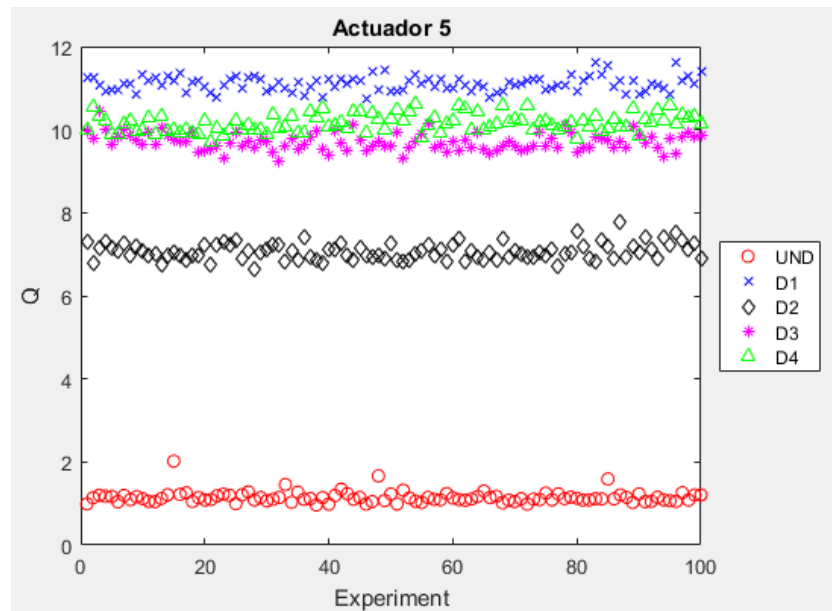


Figura 96. Índice Q para la prueba 4 cuando el 5to sensor trabaja como actuador.

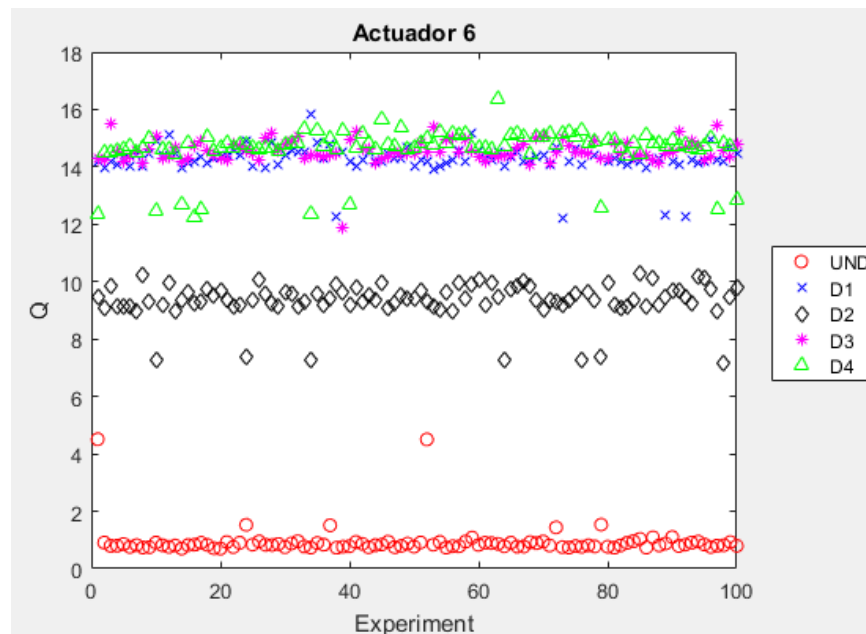


Figura 97. Índice Q para la prueba 4 cuando el 6to sensor trabaja como actuador.

Como ya se sabe, el índice estadístico Q, compara uno a uno las muestras con su proyección en el modelo PCA construido de la estructura sana. Para las gráficas de la prueba 4 (figuras 92-97) es claro evidenciar el grupo de muestras de la estructura sana con el grupo de muestras de los diferentes daños simulados para la prueba, sabiendo esto es verídico afirmar que para el numero de sensores y la ubicación sobre la estructura, la metodología del índice estadístico Q es idónea para la detección de daños sobre la estructura.

Concluyendo finalmente, para obtener un resultado verídico en los procesos de identificación de daños sobre estructuras metálicas es pertinente la siguiente configuración de los transductores piezoeléctricos sobre la estructura a estudiar, cumpliendo así el objetivo de reducir la cantidad de sensores utilizados en tal proceso.

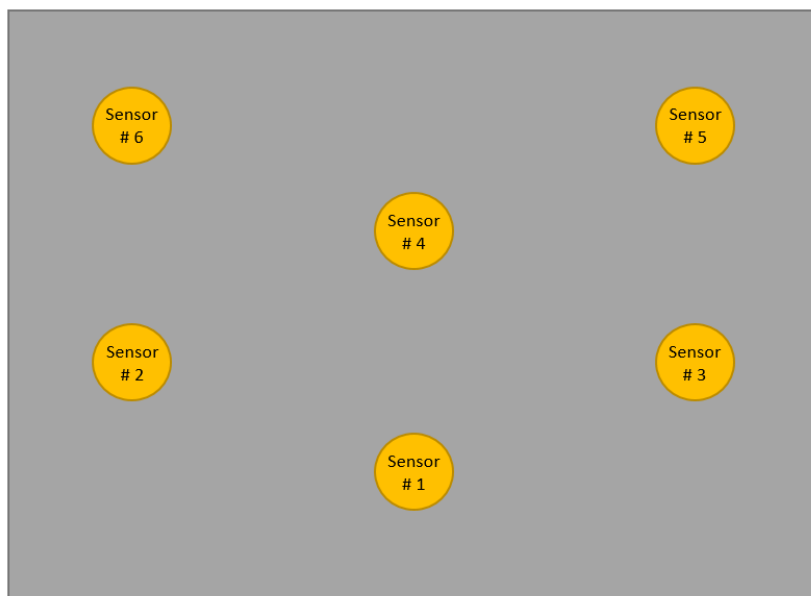


Figura 98. Configuración resultante de la ubicación de los sensores piezoeléctricos para poder obtener un resultado verídico en los procesos de identificación de daños sobre estructuras metálicas. Basados en los análisis de la prueba 4 (figura 73) Fuente: Autores. ⁱ

Conclusiones.

Para la instrumentación en estructuras metálicas, los transductores piezoeléctricos (PZT) proporcionan varias ventajas, en las cuales se destacan principalmente dos:

1. El precio es relativamente bajo respecto con otros sensores que normalmente se utilizan para aplicaciones SHM.
2. Por su naturaleza de transductor, los PZT pueden funcionar como actuador o sensores.

La aplicación PCA como método estadístico multivariable para crear un modelo por cada fase presenta varias ventajas:

- Los modelos de referencia deben calcularse solo una vez en cada experimento conociendo los datos de la estructura sana.
- Los modelos de referencia PCA son una representación reducida de todos los datos originales, garantizando así una reducción en el costo computacional.

La metodología implementada en esta tesis permitió definir cuál es la mejor configuración de la ubicación de los sensores piezoeléctricos para la detección de daños sobre estructuras metálicas (placas de Aluminio) utilizando PCA. La ventaja en esta técnica radica en la simplicidad del proceso, ya que para determinar el estado de una estructura hace falta llevar a cabo los siguientes pasos:

- Recolección de nuevos datos.
- Procesamiento de los datos.
- Proyección a los modelos.

A su vez estas proyecciones pueden usarse para detectar daños en cada fase. La contribución de esta tesis permite que a partir del uso del índice de daño Q se identifique el estado de una placa de Aluminio. Se realizaron experimentos con varias configuraciones de la ubicación de los transductores piezoeléctricos sobre las placas de Aluminio.

En general, en los gráficos de la distribución de la varianza acumulada, los primeros dos o tres componentes principales no tenían un valor muy alto razón por lo cual hacía falta llegar hasta más allá del octavo componente, para obtener más del 80% de la varianza, así mismo, en los gráficos de los "scores" PCA, la información no representa argumentos válidos para la determinar si la estructura tiene algún daño o no, esto no significaba que la información no fuera vital para el proceso de encontrar una metodología para determinar el mínimo número de sensores y su ubicación en placas de aluminio usando sistemas piezoeléctricos

activos, si no por el contrario, gracias a estas conclusiones, se procede en la utilización de otra metodología.

La metodología usada posteriormente fue la del índice estadístico Q. Cuando se observó los gráficos del índice Q, para las pruebas 3 y 4, se pudo determinar que la diferencia uno a uno existente entre una muestra y otra (estructura sana, daño 1, daño 2, etc) es clara y consistente, queriendo decir esto que las muestras que representan a la estructura sana están totalmente lejanas de todo el grupo de muestras de los daños, concluyendo así que para estas dos pruebas (3 y 4), la metodología del índice estadístico Q es la ideal para la determinación de daños sobre la estructura.

Trabajo a futuro

El monitoreo de estructuras SHM, es un tema de investigación moderna. En google académico se registran alrededor de 1.340.000 artículos sobre SHM, entre los años del 2008 y 2017. Lo que es una prueba de que existe un gran interés por investigar sobre SHM.

En la última década, se ha investigado arduamente en la tecnología de detección de fibra óptica, la tecnología de detección de cerámica piezoeléctrica (PZT) basada en la propagación de ondas, la tecnología inteligente de detección basada en cemento y la tecnología de detección de corrosión, han sido revisadas críticamente, que son campos de investigación muy importantes para SHM. Además, lo que permite que el SHM se pueda aplicar en la ingeniería sísmica, la ingeniería eólica y la evaluación del rendimiento del ciclo de vida. (Basados en el artículo Structural Health Monitoring in mainland China: Review and Future Trends). link: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1475921710365269>.

Es importante destacar que la ingeniería civil tiene como objetivo universal crear estructuras sismo-resistentes, lo que hace que el SHM tenga un papel fundamental en el monitoreo de estructuras débiles que puedan fallar en una catástrofe.

El SHM en el servicio de las estructuras de ingeniería ha asumido un papel importante en la evaluación de su seguridad e integridad. Los sensores de rejilla de fibra de Bragg (FBG) se han convertido en una herramienta fiable y no destructiva para la supervisión, el diagnóstico y el control en estructuras civiles. La versatilidad de los sensores FBG representa una ventaja clave sobre otras tecnologías en el campo de detección estructural. En este artículo, se han revisado críticamente las actividades recientes de investigación y desarrollo en el monitoreo estructural de la salud utilizando sensores FBG, destacando las áreas donde se necesita más trabajo. También se discuten algunos esquemas de empaquetado para sensores de tensión FBG. Finalmente, se han abordado algunas limitaciones y barreras de mercado asociadas con el uso de estos sensores. (Basados en el artículo Fibre Bragg gratings in structural health monitoring — Present status and applications, por Mousumi Majumder , Tarun Kumar Gangopadhyay, Ashim Kumar Chakraborty, Kamal Dasgupta, D.K.Bhattacharya).

link: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424708002380>.

BIBLIOGRAFÍA

1. Astorga, Ariana y Rivero, Pedro. Patologías en las edificaciones. s.l. : Centro de Investigación en Gestión integral de Riesgos, 2009. Módulo III Sección IV.
2. Charles, R. Farrar y Scott, W Doebling. An overview of modal-based damage identification methods. [Los Alamos National Laboratory] Los Alamos, NM : Engineering Analysis Group.
3. Quintero Parra, Andrés Felipe y Mejía, Rodolfo Villamizar. Structural Health Monitoring: An Intelligent Agent Approach. Bogotá : Cienc. Ing. Neogranad Vol 20 No 1, Junio 2010.
4. Anaya, Carlos y Barajas, Cesar. Metodología para la detección de daños en estructuras metálicas empleando la técnica de análisis modal teórico-experimental. [Escuela de Ingeniería Mecánica] Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2011.
5. Sánchez, Ángel. Universidad Rey Juan Carlos. Tema 5. Reconocimiento de patrones. [En línea] 2007. [Citado el: 7 de Abril de 2016.] <http://www.escet.urjc.es/~visiona/>.
6. Carrión, Francisco Javier. Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras. Sanfandila, Qro : Instituto Mexicano del Transporte, 2012.
7. Pérez, Jaime, Rodríguez Rocha, Ramsés y Gómez Ramírez, Eduardo. Detección de daño en edificios utilizando redes neuronales. México D.F : Instituto Politécnico Nacional, Universidad La Salle, 2008.
8. Mejía, Andrés Felipe Quintero Parra - Rodolfo Villamizar. ESTADO DEL ARTE EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL:. Bogotá : Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 2010.
9. Universidad Santo Tomás. [En línea] [Citado el: 28 de Abril de 2016.] <http://facultadingenieriaelectronica.usta.edu.co/index.php/ingenieria-electronica/docentes-directivos-pregrado>.
10. Universidad Experimental Nacional del Táchira. Instrumentación Industrial. [En línea] <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/>.

11. Wang, Ming L., Lynch, Jerome y Sohn, Hoon. Sensor Technologies for Civil Infrastructures: Sensing Hardware and Data Collection Methods Performance Assessment. Cambridge : Woodhead, Elsevier, 2014.
12. Duan, Wen Hui, Wang, Quan y Quek, Ser Tong. Applications of Piezoelectric Materials in Structural Health Monitoring and Repair: Selected Research Examples. Canada : Materials, 2010.
13. Ingenieria, Ambher. Ambher Ingeniería™, . Monitoreo de la salud estructural. [En línea] [Citado el: 12 de Marzo de 2016.] www.ambher.com.
14. R, Jorge. DocSlide. Monitoreo de salud estructural. [En línea] 8 de Agosto de 2015. [Citado el: 20 de Marzo de 2016.] <http://documents.tips/documents/monitoreo-de-salud-estructural.html>.
15. NDT Resorce Center. [En línea] [Citado el: 22 de Abril de 2016.] <https://www.nde-ed.org>.
16. Tibaduiza Burgos, Diego Alexander. Desing and Validation of a Structural Health Monitoring System for Aeronautical Structures. Deparment of Matematica Aplicada III, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona : s.n., 2012.
17. Tibaduiza, Diego Alexander, y otros. Combined and I Indices Based on Principal Component Analysis for Damage Detection and Localization.
18. A. Salehian. La identificación de la ubicación de un daño repentino en laminados compuestos utilizando enfoque wavelet. Tesis de maestría, Worcester Polytechnic Institute, 2003
19. H. Sohn, K. Worden, and C.R. Farrar. Statistical damage classification under changing environmental and operational conditions. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 13(9):561–574, 2002.
20. L. Mujica, J. Rodellar, y J. Veh'i. Un enfoque de razonamiento basado en casos de daños comosessment en estructuras inteligentes. En III Conferencia Temática ECCCOMAS de estructuras inteligentes y Materiales. Gdansk, Polonia., Julio de 2007.
21. L. Mujica, J. Veh'i, W. Staszewski, y K. Worden. detección de daños por impacto en el aire compuestos de artesanía utilizando un razonamiento basado en el conocimiento. Structural Health Monitoring, una revista internacional, 7 (3): 215-230, 2008
22. WJ Staszewski. pre-procesamiento de datos avanzados por daños identificación basada en el patrón reconocimiento. La Revista Internacional de

Sistema y Ciencia, Número especial sobre la detección inteligente de fallos, 31 (11): 1381-1396, nov de 2000

23. CR Farrar, F. Hemez, G. Park, AN Robertson, H. Sohn, y A Williams. Un acoplada enfoque para desarrollar soluciones daños pronóstico. Clave Ingeniería de Materiales, 245246: 289-306, 2003.

24. C. Farrar y N. Lieven. el pronóstico de daños: el futuro de la vigilancia de la salud estructural. Phil. Trans. R. Soc. UN, 365: 623-632, 2007.

25. Y. Zhang, C. Zhou, y Z. Li. sensor de emisión acústica pintura Piezo y su aplicación con el pronóstico de la salud estructural en línea. En Quinto Taller Europeo de Vigilancia de la Salud Estructural, 2010

26. Y. Ling y S. Mahadevan. Integración de vigilancia de la salud estructural y la fatiga DAÑO pronóstico edad. Sistema mecánico y Procesamiento de Señales, 28: 89-104, 2012. [112] TH Loutas, A

27. http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm

28. LE Mujica, J Rodellar, A Fernández y A Guemes. Q-statistic and T2 -statistic PCA-based measures for damage assessment in structures. 2016

29. Martin A. Salazar, Fabio A. Guarnieri. Análisis y Evaluación del Comportamiento de Sensores Piezoeléctricos. 2010

30. Josef Krautkramer and Herbet Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials, Edition Sprinnger, New York 1977

31. Edited by Tribikram Kundu, Untrasonic Nondestructive Evaluation Engineering and Biological Material Characterization.

REFERENCIA TABLAS Y CONTENIDO.

ⁱ "Estudio de la ubicación de sensores piezoeléctricos usados en procesos de identificación de daños sobre estructuras metálicas", Universidad Santo Tomas, Bogotá Colombia.

ⁱⁱ ONERA, Chatillon, FranciaClaus-Peter Fritzen, Universidad de Siegen, Alemania Alfredo Güemes, Universidad Politécnica, Madrid, España. Vigilancia de la salud estructural. Capítulo 1 Introducción a SHM, Publicado en línea: <https://www.wiley.com/en-us/Structural+Health+Monitoring-p-9781905209019>, 5 de enero de 2010.

ⁱⁱⁱ Desing and Validation of a Structural Health Monitoring System for Aeronautical Structures. Department of Matematica Aplicada III, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona: s.n., 2012.