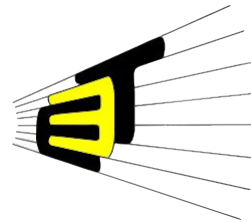


DETECCIÓN DE DEFECTOS EN ESTRUCTURAS MEDIANTE
PIEZODIAGNOSIS BASADO EN MULTIACTUACIÓN Y MODELOS DE
LÍNEA BASE

OSCAR FELIPE PUENTES SANGUINO
MARÍA ALEJANDRA IBARRA SEPULVEDA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018

DETECCIÓN DE DEFECTOS EN ESTRUCTURAS MEDIANTE
PIEZODIAGNOSIS BASADO EN MULTIACTUACIÓN Y MODELOS DE
LÍNEA BASE

OSCAR FELIPE PUENTES SANGUINO
MARÍA ALEJANDRA IBARRA SEPULVEDA

*Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico*

Director
RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA
PhD en Tecnologías de la Información

Codirectores
JHONATAN CAMACHO NAVARRO
Magister Electrónico UIS
GUSTAVO ADOLFO MORENO
Ingeniero Electrónico UIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2018

Dedicado a

*A Dios, que puso en mi camino las oportunidades
que he podido aprovechar,
Mi familia, la fuente que me motiva a lograr cada
meta que me propongo,
Mi padre y mi madre que me han demostrado que
esforzarse trae buenos resultados,
Mi novia que ha dedicado sus horas a ayudarme en
cada paso que he dado,
A mi compañera de proyecto que me enseñó la
importancia de los detalles,
y a todas las personas que tienen parte de su corazón
en las paginas de este libro.*

Oscar Felipe Puentes Sanguino

Dedicado a

Mi madre, Mary , el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, fuente de mi inspiración para cumplir mis metas y querer ser mejor cada día. .

Mi abuelo por su apoyo incondicional, por ser parte de mi logros y enseñarme que con trabajo duro se cumplen los más fuertes retos.

Mi tía Cecilia y mis tíos quienes me han brindado aportes invaluable que servirán para toda mi vida, por su apoyo durante mi profesional.

Por último, a mi compañero, por su paciencia, colaboración, por darme la oportunidad de compartir el desarrollo de este proyecto de grado y por todos momentos qe pasamos en el proceso.

María Alejandra Ibarra Sepulveda

Agradecimientos

Al profesor **Rodolfo Villamizar**, por su asesoría, acompañamiento y colaboración; por su tiempo y enseñanza durante estos últimos años y por ser un excelente director.

A los ingenieros **Gustavo Moreno** y **Jhonatan Camacho** por los conocimientos brindados y las ayudas en los laboratorios.

A la secretaria de centro de estudios, "**Yolandita**", por disposición a ayudarnos en los devenires diarios de la carrera.

A nuestros **familiares**, por su apoyo incondicional en esos momentos difíciles, paciencia y enseñanzas.

A **compañeros y amigos**, quienes han presenciado nuestros buenos y malos momentos, que han permitido crear un lazo de amistad.

A la **Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T)** y a la **Universidad Industrial de Santander (UIS)**

¡Gracias Infinitas!

Índice general

Capítulos	Página
INTRODUCCIÓN	2
1 MARCO TEÓRICO	4
1.1 MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL (SHM)	4
1.2 PIEZODIAGNOSIS Y MULTIACTUACIÓN	5
1.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)	6
1.4 MODELOS DE LÍNEA BASE Y DIAGNÓSTICO DE DAÑOS	7
1.5 MÉTODOS DE COMBINACIÓN DE DATOS PARA MULTIACTUACIÓN	9
1.5.1 COMBINACIÓN DE DATOS EMPÍRICA:	9
1.5.2 COMBINACIÓN DE DATOS ADITIVA	9
1.5.3 COMBINACIÓN DE DATOS PROMEDIO:	10
1.5.4 COMBINACIÓN DE DATOS MULTIPLICATIVA:	10
1.6 INDICES ESTADÍSTICOS PARA ANÁLISIS DE DAÑOS	10
1.6.1 ÍNDICE ESTADÍSTICO DE RESIDUOS Q :	11
1.6.2 ÍNDICE ESTADÍSTICO HOTELLING T^2	11
1.6.3 ÍNDICE DE DISTANCIAS DE MAHALANOBIS:	11
1.7 ANÁLISIS DE ROBUSTEZ MEDIANTE CONTINGENCIA $n - 1$	12
2 METODOLOGÍA	13
2.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA (ZONA DE ANÁLISIS)	14
2.2 ADQUISICIÓN DE DATOS	15
2.3 DISEÑO DE ALGORITMO PARA ADQUISICIÓN DE SEÑALES	18
2.4 ALGORITMO PARA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE LÍNEA BASE	18
3 CASOS DE ESTUDIO	20
3.1 ESCENARIO 1: DIAGNÓSTICO DE DAÑOS PARA GEOMETRÍA CIRCULAR	20
3.2 ESCENARIO 2: DIAGNOSTICO DE DAÑOS PARA GEOMETRÍA CUADRADA	22

3.3	ESCENARIO 3: DIAGNOSTICO DE DAÑOS PARA GEOMETRÍA TRIANGULAR	24
3.4	MÉTODO DE ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
4.1	ANÁLISIS DE EFICIENCIA PARA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN IMPLEMENTADO	29
4.2	EVALUACIÓN DEL DIAGNÓSTICO DE DAÑOS USANDO DIFERENTES ARREGLOS GEOMÉTRICOS DE PZT	30
4.2.1	GEOMETRÍA CIRCULAR, RESULTADOS DESTACADOS	30
4.2.2	GEOMETRÍA CUADRADA, RESULTADOS DESTACADOS	36
4.2.3	GEOMETRÍA TRIANGULAR, RESULTADOS DESTACADOS	38
4.3	ANÁLISIS DE ROBUSTEZ	40
4.3.1	VALIDACIÓN MEDIANTE CONTINGENCIA $n-1$ Y AUTOREPARACIÓN .	40
4.3.2	ROBUSTEZ DEL SISTEMA FRENTE A CAMBIOS DE TEMPERATURA . .	46
	CONCLUSIONES	49
	RECOMENDACIONES	52
	BIBLIOGRAFÍA	54
	ANEXOS	58

Índice de figuras

Figura 1.1	Pirámide de niveles SHM	4
Figura 1.2	Sistema de diagnostico por piezodiagnosis	6
Figura 1.3	Matriz de estados de la estructura	8
Figura 1.4	Proceso de diagnóstico del sistema	8
Figura 2.1	Sistema para adquisición de datos	13
Figura 2.2	Elementos pertenecientes a la zona de análisis	14
Figura 2.3	Izquierda: masas usadas par simulación de daños con un peso de 1kg cada una. Derecha: Masas ubicadas sobre la lamina de aluminio.	15
Figura 2.4	Señal tipo Burst generada para excitación de piezoeléctricos.	15
Figura 2.5	Sistemas de amplificación del sistema: no amplificado mostrando ruido en la salida, correctamente amplificado, y sobre amplificado con saturación a la salida.	16
Figura 2.6	Etapas de multiplexado del sistema	17
Figura 2.7	Matriz de estados de la estructura	18
Figura 2.8	Matriz de casos	19
Figura 3.1	Dimensiones configuración circular	21
Figura 3.2	Actuación simple en configuración circular	21
Figura 3.3	Multiactuación en configuración circular	22
Figura 3.4	configuración cuadrada	22
Figura 3.5	Actuación simple en configuración cuadrada	23
Figura 3.6	Multiactuación en configuración cuadrada	23
Figura 3.7	Dimensiones configuración triangular	24
Figura 3.8	Actuación simple en configuración triangular	24
Figura 3.9	Multiactuación en configuración triangular	25
Figura 3.10	Regiones de ubicación de daños	26

Figura 4.1	Implementación del índice residual Q para el modelo de actuación simple en geometría circular	31
Figura 4.2	Implementación del índice Hotelling T^2 para el modelo de actuación simple en geometría circular	32
Figura 4.3	Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con actuación simple	32
Figura 4.4	Comparación de parámetros porcentuales de los índices en geometría circular para la actuación simple	34
Figura 4.5	Sistema de adquisición de datos	41
Figura 4.6	Resultados de separabilidad en pruebas de contingencia para cada una de las combinaciones de datos	42
Figura 4.7	Falsos positivos resultantes en la simulación para las combinaciones de datos	43
Figura 4.8	Resultados de la simulación con Ruido para cada una de las combinaciones de datos para el índice T^2	44
Figura 4.9	Falsos positivos cada una de las combinaciones de datos para el índice T^2	44
Figura 4.10	Resultados de la simulación con Ruido para cada una de las combinaciones de datos para el índice Mahalanobis	45
Figura 4.11	Falsos positivos cada una de las combinaciones de datos para el índice de distancias de Mahalanobis	46
Figura 4.12	Resultados del sistema frente a cambios de temperatura	48
Figura A1.1	Índice residual Q implementado en configuración circular con actuación simple	58
Figura A1.2	Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con actuación simple	58
Figura A1.3	Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con actuación simple	59
Figura A1.4	Implementación de índices residual Q para una configuración circular implementando métodos de multiactuación.	60
Figura A1.5	Implementación de índices Hotelling T^2 para una configuración circular implementando métodos de multiactuación.	61
Figura A1.6	Implementación de índices de distancias de Mahalanobis para una configuración circular implementando métodos de multiactuación.	62

Figura A1.7 Índice residual Q implementado en configuración circular con combinación empírica	63
Figura A1.8 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con combinación empírica	63
Figura A1.9 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con combinación empírica	63
Figura A1.10 Índice residual Q implementado en configuración circular con combinación aditiva	64
Figura A1.11 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con combinación aditiva	64
Figura A1.12 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con combinación aditiva	64
Figura A1.13 Índice residual Q implementado en configuración circular con combinación promedio	65
Figura A1.14 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con combinación promedio	65
Figura A1.15 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con combinación promedio	65
Figura A1.16 Índice residual Q implementado en configuración circular con combinación multiplicativa	66
Figura A1.17 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con combinación multiplicativa	66
Figura A1.18 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con combinación multiplicativa	66
Figura A2.1 Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con actuación simple	67
Figura A2.2 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con actuación simple	67
Figura A2.3 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con actuación simple	68
Figura A2.4 Implementación de índices residual Q para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación.	69
Figura A2.5 Implementación de índices Hotelling T^2 para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación.	70

Figura A2.6 Implementación de índices de distancias de Mahalanobis para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación. . . .	71
Figura A2.7 Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con combinación empírica	72
Figura A2.8 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con combinación empírica	72
Figura A2.9 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con combinación empírica	72
Figura A2.10 Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con combinación aditiva	73
Figura A2.11 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con combinación aditiva	73
Figura A2.12 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con combinación aditiva	73
Figura A2.13 Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con combinación promedio	74
Figura A2.14 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con combinación promedio	74
Figura A2.15 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con combinación promedio	74
Figura A2.16 Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con combinación multiplicativa	75
Figura A2.17 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con combinación multiplicativa	75
Figura A2.18 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con combinación multiplicativa	75
Figura A3.1 Índice residual Q implementado en configuración triangular con actuación simple	76
Figura A3.2 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con actuación simple	76
Figura A3.3 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con actuación simple	77
Figura A3.4 Implementación de índices residual Q para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación.	78

Figura A3.5 Implementación de índices Hotelling T^2 para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación.	79
Figura A3.6 Implementación de índices de distancias de Mahalanobis para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación.	80
Figura A3.7 Índice residual Q implementado en configuración triangular con combinación empírica	81
Figura A3.8 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con combinación empírica	81
Figura A3.9 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con combinación empírica	81
Figura A3.10 Índice residual Q implementado en configuración triangular con combinación aditiva	82
Figura A3.11 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con combinación aditiva	82
Figura A3.12 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con combinación aditiva	82
Figura A3.13 Índice residual Q implementado en configuración triangular con combinación promedio	83
Figura A3.14 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con combinación promedio	83
Figura A3.15 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con combinación promedio	83
Figura A3.16 Índice residual Q implementado en configuración triangular con combinación multiplicativa	84
Figura A3.17 Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con combinación multiplicativa	84
Figura A3.18 Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con combinación multiplicativa	84
Figura C1.1 Comparación de parámetros porcentuales de los índices en geometría circular	107
Figura C1.2 Comparación de parámetros porcentuales para índice Residual Q para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.	108

Figura C1.3	Comparación de parámetros porcentuales para índice Residual T^2 para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.	108
Figura C1.4	Comparación de parámetros porcentuales para índice de distancias de mahalanobis para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.	109
Figura C1.5	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración circular implementando métodos de multiactuación con combinación empírica.	109
Figura C1.6	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración circular implementando métodos de multiactuación con combinación aditiva.	110
Figura C1.7	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración circular implementando métodos de multiactuación con combinación promedio.	110
Figura C1.8	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración circular implementando métodos de multiactuación con combinación producto.	111
Figura C2.1	Comparación de parámetros porcentuales de los índices en geometría cuadrada	112
Figura C2.2	Comparación de parámetros porcentuales para índice residual Q en la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.	112
Figura C2.3	Comparación de parámetros porcentuales para índice Hotelling T^2 en la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.	113
Figura C2.4	Comparación de parámetros porcentuales para índice de distancias de Mahalanobis en la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.	113
Figura C2.5	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación con combinación empírica.	114
Figura C2.6	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación con combinación aditiva.	114

Figura C2.7	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación con combinación promedio.	115
Figura C2.8	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración Cuadrada implementando métodos de multiactuación con combinación por producto.	115
Figura C3.1	Comparación de parámetros porcentuales de los índices	116
Figura C3.2	Comparación de parámetros porcentuales para índice residual Q en la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.	116
Figura C3.3	Comparación de parámetros porcentuales para índice Hotelling T^2 en la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.	117
Figura C3.4	Comparación de datos para índice de distancias de mahalanobis para la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.	117
Figura C3.5	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación con combinación empírica.	118
Figura C3.6	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación con combinación aditiva.	118
Figura C3.7	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración Triangular implementando métodos de multiactuación con combinación promedio.	119
Figura C3.8	Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración Triangular implementando métodos de multiactuación con combinación por producto.	119

Índice de tablas

Tabla 1	Descripción de proceso de adquisición de datos	28
Tabla 2	Especificación de las gráficas de resultados	29
Tabla 3	Descripción detallada de la duración del proceso de adquisición de datos	30
Tabla 4	Resultados para cada índice por actuación simple en geometría circular	33
Tabla B1.1	Resultados para cada índice por actuación simple en geometría circular	85
Tabla B1.2	Implementación del índice Residual Q para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores	86
Tabla B1.3	Implementación del índice Hotellings T^2 para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores	86
Tabla B1.4	Implementación del índice Mahalanobis para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores	87
Tabla B1.5	Resultados para cada índice por multiactuación en geometría circular por combinación de datos empírica	88
Tabla B1.6	Resultados para cada índice por multiactuación en geometría circular por combinación de datos aditiva	89
Tabla B1.7	Resultados para cada índice por multiactuación en geometría circular por combinación de datos promediada	90
Tabla B1.8	Resultados para cada índice por multiactuación en geometría circular por combinación de datos multiplicativa	91
Tabla B2.1	Resultados para cada índice por actuación simple en geometría cuadrada	92

Tabla B2.2 Implementación del índice Residual Q para la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores	93
Tabla B2.3 Implementación del índice Hotellings T^2 para la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores	94
Tabla B2.4 Implementación del índice Mahalanobis para la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores	95
Tabla B2.5 Resultados para cada índice por multiactuación en geometría cuadrada por combinación de datos empírica	96
Tabla B2.6 Resultados para cada índice por multiactuación en geometría cuadrada por combinación de datos aditiva	97
Tabla B2.7 Resultados para cada índice por multiactuación en geometría cuadrada por combinación de datos promediada	98
Tabla B2.8 Resultados para cada índice por multiactuación en geometría cuadrada por combinación de datos multiplicativa	99
Tabla B3.1 Resultados para cada índice por actuación simple en geometría triangular	100
Tabla B3.2 Implementación del índice Residual Q para la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores	101
Tabla B3.3 Implementación del índice Hotellings T^2 para la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores	101
Tabla B3.4 Implementación del índice Mahalanobis para la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores	102
Tabla B3.5 Resultados para cada índice por multiactuación en geometría triangular por combinación de datos empírica	103
Tabla B3.6 Resultados para cada índice por multiactuación en geometría triangular por combinación de datos aditiva	104
Tabla B3.7 Resultados para cada índice por multiactuación en geometría triangular por combinación de datos promediada	105

Tabla B3.8 Resultados para cada índice por multiactuación en geometría tringular por combinación de datos multiplicativa	106
---	-----

RESUMEN

Título: Detección de defectos en estructuras mediante piezodiagnosic basado en multiactuación y modelos de línea base.¹

Autores:

María Alejandra Ibarra Sepulveda²

Oscar Felipe Puentes Sanguino²

Palabras Clave: Structural Health Monitoring (SHM), Principal Component Analysis (PCA), Multiactuación, Modelo de línea base, Piezodiagnosic, índices de daños.

DESCRIPCIÓN

Los sistemas de detección de fallas basados en el principio de piezodiagnosic, se presentan como una solución de bajo costo a la monitorización de estructuras, permitiendo conocer en tiempo real el estado del sistema. El conjunto de técnicas SHM (Structural Health Monitoring), permite monitorizar estructuras detectando cambios en el sistema que puedan afectar negativamente sus propiedades, para ello, se requiere disponer de una red de sensores distribuidos y conectados que proporcionen información en tiempo real. Los grupos de investigación CEMOS de la Universidad Industrial de Santander y CoDalab de la Universidad Politécnica de Cataluña, han realizado proyectos enfocados en la detección y localización de daños en estructuras, utilizando técnicas de actuación simple de piezoeléctricos (PZT), lo que ha permitido detectar e identificar daños en las estructuras de prueba. Sin embargo los métodos de identificación son susceptibles a falsos positivos debido a cambios en las variables operacionales y ambientales, por lo que se requiere determinar una configuración óptima de PZT que minimice estos falsos positivos. En este proyecto se aprovecharon los principios de multiactuación de PZT sobre superficies laminares para realizar la comparación de distintos arreglos de sensores y así determinar cuál ofrece mayor probabilidad en la detección de daño sobre la estructura, para esto, se analizaron configuraciones geométricas de PZT circular, triangular y cuadrada, en donde se simulaban daños controlados para analizar la robustez del sistema.

¹Trabajo de Grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Rodolfo Villamizar Mejía, PhD.

ABSTRACT

Title: Damage detection in structures through piezodiagnosis based on multi-acting and baseline models¹

Authors:

María Alejandra Ibarra Sepulveda²

Oscar Felipe Puentes Sanguino²

Key Words: SHM, Structural Health Monitoring, Principal Component Analysis (PCA), Multiactuation, Baseline model, Piezodiagnosis, damage rates.

DESCRIPTION

Fault detection systems based on the principle of piezodiagnosis are presented as a low cost solution to the monitoring of structures, allowing real-time knowledge of the system status. The SHM (Structural Health Monitoring) techniques allow monitoring structures by detecting changes in the system that can negatively affect their properties, for this it is necessary to have a network of distributed sensors and connected in such a way as to provide information in real time. The research groups CEMOS of the Universidad Industrial de Santander and CoDalab of the Polytechnic University of Catalonia have carried out projects focused on the detection and localization of damages in structures using simple piezoelectric (PZT) actuation systems, which has allowed to predict damages in the test structures. However, identification methods are susceptible to false positives due to changes in operational and environmental configuration of PZT that minimizes these false positives. In this project, PZT multiactuation principles on laminar surfaces were used to compare different sensor arrays to determine which offers the greatest probability of detecting damage to the structure, for this, circular, triangular and square geometrical configurations of PZT were analyzed, where controlled damage was simulated to analyze the robustness of the system.

¹Bachelor Thesis

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Rodolfo Villamizar Mejía, PhD.

OBJETIVO GENERAL

Adaptar un algoritmo de piezodiagnosic basado en modelos de línea base en configuración de multiactuación para robustecer la identificación de defectos en estructuras en operación continua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar una configuración óptima de un sistema de piezodiagnosic con múltiples puntos de actuación para la adquisición de ondas guiadas en estructuras en términos de robustez y eficiencia del diagnóstico.
- Adaptar un algoritmo que permita combinar información proveniente de modelos de línea base para la identificación de la probabilidad de daño en estructuras.
- Evaluar experimentalmente el desempeño del sistema experto usando datos provenientes de estructuras de superficie laminar en condiciones de laboratorio.

INTRODUCCIÓN

El cuerpo humano reacciona ante situaciones que puedan perjudicar su bienestar, enviando señales eléctricas a través de las fibras nerviosas que llegan hasta el cerebro; es allí donde estas señales son interpretadas. Así también ocurre con una estructura que está en constante monitorización, donde el objetivo es detectar comportamientos extraños que indiquen anomalías en el sistema. Esta detección requiere una inspección, un diagnóstico y finalmente dependiendo de los resultados, una posible reparación que asegure que la estructura analizada se encuentra en condiciones de operaciones seguras [24].

El análisis de salud estructural SHM (Por sus siglas en inglés Structural Health Monitoring) es una tecnología emergente que ha desarrollado métodos de detección de daños y estrategias para la caracterización de los mismos [19, 23]. Una de ellas es la **Piezodiagnosis**, en donde se utilizan transductores piezoeléctricos para instrumentar las estructuras (mecánicas, civiles o aeroespaciales) y de esta manera registrar los datos que serán analizados. Este método permite realizar el diagnóstico, sin embargo se enfrenta a problemas de robustez debido a que es muy sensible a cambios de la estructura, por lo tanto usando los principios de multiactuación nace la necesidad de buscar la configuración óptima que mediante análisis de contingencia y análisis de cambios ambientales puedan definir cual es la configuración óptima para el diagnóstico.

En este proyecto se realizaron pruebas sobre láminas de aluminio, usando un máximo de ocho sensores configurados en una distribución cuadrada, triangular o circular sobre la superficie de la estructura. Para cada configuración se presentan los resultados al aprovechar los principios de multiactuación de los piezoeléctricos, y se compara su influencia en el diagnóstico de daños en estructuras laminares utilizando modelos de línea base e índices de error.

Esta investigación describe la metodología utilizada en los sistemas de adquisición y detección en todas las etapas llevadas a cabo en el desarrollo del proyecto, los instrumentos utilizados, la aplicación de los modelos e índices, y los resultados obtenidos. Los algoritmos de detección de fallas en estructuras aplicando PCA y piezodiagnosia han sido previamente validados por los grupos de investigación CEMOS de la Universidad Industrial de Santander y CoDalab de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Finalmente, los resultados de la presente investigación muestran la necesidad de determinar una configuración óptima, debido a que se demuestra que el diagnóstico de daños varía notablemente en función de la configuración geométrica implementada. De igual manera, se describe la necesidad de actualizar constantemente el modelo de línea base, debido a que cambios ambientales y cambios en la estructura pueden afectar gravemente el diagnóstico de resultados.

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO

1.1. MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL (SHM)

La monitorización de Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés *Structural Health Monitoring*) permite identificar la presencia de daños en la estructura con base en los cambios de sus parámetros estáticos y dinámicos, a través de métodos de modelación analítica y de interpretación de datos. [14]. Dichos parámetros dependen de factores tales como: el material, el tipo de estructura, condiciones ambientales, entre otras. Asimismo, el tiempo de monitorización se realiza en función del tipo y el propósito de la misma, por tanto, se usa permanentemente para ayudar a conocer y entender el comportamiento en tiempo real, esto con el fin de corregir el problema evitando accidentes.

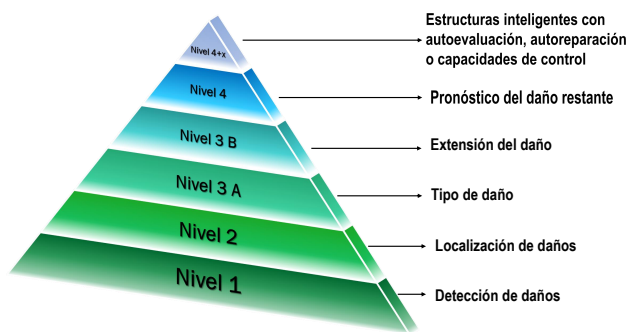


Figura 1.1: Pirámide de niveles SHM

Para el análisis usando SHM existen diferentes niveles para el diagnóstico de daños [18], estos se dividen en cuatro tal como se puede ver en la figura 1.1. Esta investigación se ejecuta en el primer nivel de la pirámide, donde la importancia está en conocer si existe algún cambio en la estructura y si

este cambio representa un daño [3].

Para este proyecto se utilizó una de las metodologías para monitorización de estructuras llamada Piezodiagnosis, cuya definición se ampliará en la próxima sección. El equipo empleado consiste en transductores (o sensores), acondicionadores de señal, dispositivos para adquisición de datos y soportes físico y lógico (hardware y software) para la interpretación. Una detección de daños mediante SHM y piezodiagnosis requiere de transductores piezoeléctricos (PZT) para la excitación y detección de ondas elásticas con el fin de interrogar las estructuras para localizar y caracterizar defectos y daños [23].

1.2. PIEZODIAGNOSIS Y MULTIACTUACIÓN

La piezodiagnosis se define como una técnica de SHM que se basa en el uso de ondas guiadas obtenidas al instrumentar una estructura con dispositivos piezoeléctricos (PZT). El diagnóstico del estado actual de una estructura se realiza mediante el análisis estadístico de las características de propagación de la onda guiada a través de la estructura [1]. Hay dos formas posibles de aprovechar los materiales piezoeléctricos: en la primera se pueden usar como sensores (efecto directo donde las ondas sonoras hacen vibrar el material generando sobre la superficie una tensión eléctrica [4]), y en la segunda forma, se pueden usar como actuadores (efecto inverso [4]) [23]. Este proyecto aprovecha las características de dualidad de los PZT.

En la figura 1.2 se encuentra un ejemplo de piezodiagnosis para una lámina de aluminio, en este sistema se ubica una serie de piezoeléctricos repartidos por la zona de interés. Para que el sistema pueda diagnosticar si existe un daño, debe primero enviar una "*señal de actuación*", que es transmitida por un piezoeléctrico que se encarga de convertir la señal eléctrica en una señal mecánica que pueda ser propagada a través del material, esta señal es recibida por un piezoeléctrico que funciona como sensor, este envía los "*datos del sensor*" a un sistema computacional que analiza los resultados para finalmente definir si existe o no un daño sobre la estructura.

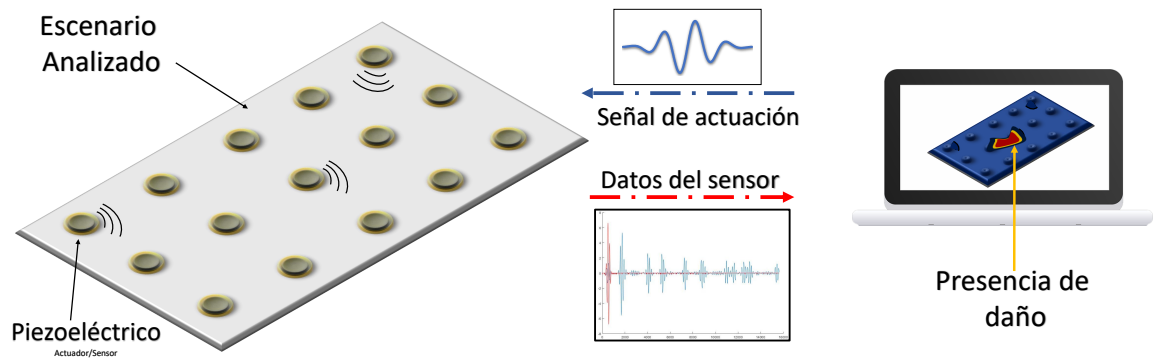


Figura 1.2: Sistema de diagnostico por piezodiagnosis

Los piezoeléctricos tienen la capacidad de funcionar como actuadores y como sensores, por ello, se puede aprovechar este principio para que ellos trabajen en los dos modos a través de la multiactuación. Dicho principio alterna el transductor y evita que este actúe y sense en un mismo experimento. Gracias a esto es posible que un escenario pueda ser analizado con más detalle, y así no sólo logra la detección de daños, sino también abre la posibilidad de que se pueda ubicar la zona de dicho daño, alcanzando buenos resultados. (algunos ejemplos se pueden encontrar en [2], [5], [15]).

1.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)

El análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés *Principal Component Analysis*), es un método estadístico que permite reducir el número de variables conservando la mayor varianza posible [10]. Para un correcto análisis, al implementar PCA se debe tener en cuenta que exista alta correlación de las variables iniciales, esto indica que hay información redundante, por tanto, es conveniente calcular la matriz de correlación. [7] [8].

El análisis parte de una matriz Y , de dimensiones $n \times p$, donde p corresponde al número de variables con n observaciones. La matriz de covarianza X es el resultado de la siguiente transformación.

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_j}{s_j \sqrt{y}} \quad (1.1)$$

donde \bar{y}_j y s_j son el promedio y la desviación estándar para cada una de las variables.

Luego se determinan los valores propios y vectores propios de la matriz de covarianza $X'X$. Los eigenvalores corresponden a la varianza de los valores en cada uno de los componentes y los elementos de los vectores propios corresponden a las coordenadas en el espacio inicial que dan la dirección de los componentes principales [21].

La representación reducida de las variables en el espacio de los componentes principales se obtiene como:

$$Z = XU \quad (1.2)$$

Donde Z es la representación reducida de las variables, X la matriz de valores iniciales estandarizados y U contiene los vectores propios de mayor varianza de $X'X$.

1.4. MODELOS DE LÍNEA BASE Y DIAGNÓSTICO DE DAÑOS

Para poder determinar si existe o no un daño en la estructura que se encuentra bajo análisis, se debe tener inicialmente un modelo que se identifique como el sistema funcionando bajo condiciones normales sin ningún tipo de alteración. La comparación entre las respuestas dinámicas del sistema y el modelo de línea base, permite determinar si existe algún cambio sobre la estructura, y si el mismo puede ser considerado como un daño [3].

PCA puede ser adaptado para obtener un modelo de línea base que represente el estado sin daño de la estructura. En este caso es necesario organizar datos proveniente de los diferentes sensores una matriz de casos x como se puede ver en la figura 1.3

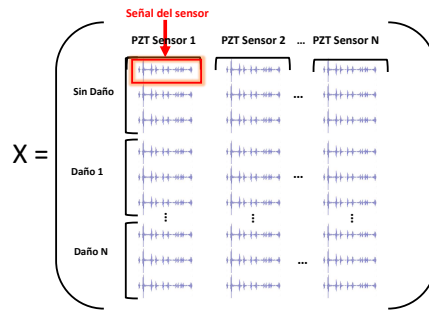


Figura 1.3: Matriz de estados de la estructura

Como se encuentra en la figura 1.4 existen dos etapas necesarias para el diagnóstico de daños: la primera etapa se encarga de generar el modelo de línea base usando los datos adquiridos cuando la estructura se encuentra en condiciones de operación normal, la segunda etapa, analiza cada nuevo dato que ingresa al sistema, el cual es proyectado sobre el modelo de línea base y determina si hay un daño en la estructura. Algunas veces proyectar los datos sobre este modelo, no indica claramente si existe o no un daño, por eso, es necesario usar ciertas medidas estadísticas que puedan ser consideradas como índices de daños.

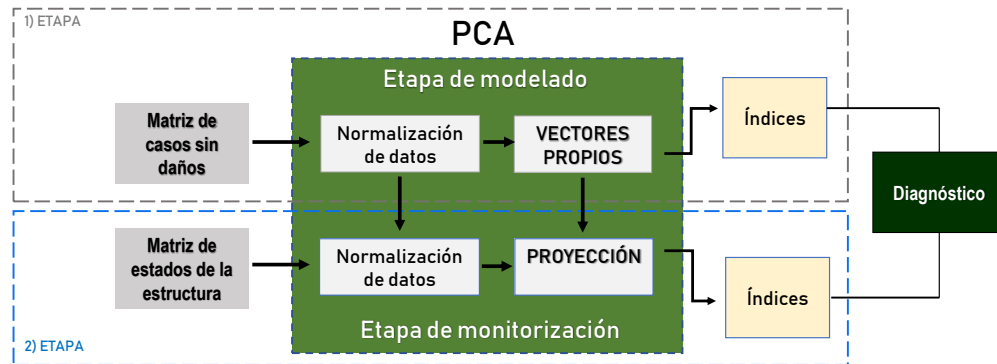


Figura 1.4: Proceso de diagnóstico del sistema

1.5. MÉTODOS DE COMBINACIÓN DE DATOS PARA MULTIACTUACIÓN

Uno de los objetivos del proyecto es la combinación de datos provenientes de modelos de multiactuación, estos métodos de combinación son importantes, debido a que posteriormente serán analizados por los diferentes índices estadísticos para poder diagnosticar correctamente los daños en la estructura, por lo tanto se proponen los siguientes métodos de combinación:

1.5.1 COMBINACIÓN DE DATOS EMPÍRICA: esta combinación se describe por medio de la ecuación 1.3 y 1.4, donde los valores I_n representan los diferentes índices resultantes que serán comparados en esta combinación de datos.

$$C_E = \sqrt[2]{I_{1d}^2 + I_{2d}^2 + \dots + I_{nd}^2} \quad (1.3)$$

$$C_E = \sqrt[2]{2I_1^2 + 2I_2^2 + \dots + 2I_n^2 - 2(I_1I_2 + I_1I_3 + \dots + I_kI_j)} \quad (1.4)$$

donde:

$$I_{nd} = I_k - I_j \quad (1.5)$$

Los valores de k y j de la ecuación 1.5 son los grupos de pares que se realizan con los m índices que se van a combinar, la cantidad de grupos n resultantes se encuentra por medio de la ecuación 1.6 la cual es la formula de combinaciones sin repetición.

$$n = \frac{m!}{2 * (m - 2)!} = \binom{m}{2} \quad (1.6)$$

1.5.2 COMBINACIÓN DE DATOS ADITIVA Este método de combinación de datos modela la dispersión máxima posible de los índices analizados, está definida por la ecuación 1.7, calculando la suma de los índices de una misma clase.

$$C_A = \sum_{j=1}^n I_j \quad (1.7)$$

1.5.3 COMBINACIÓN DE DATOS PROMEDIO: la combinación de datos promedio plantea mostrar como es la tendencia regular de los índices analizados, si se tienen m índices comparados la combinación promedio se definirá por la ecuación 1.8, la cual es la media aritmética de los datos analizados.

$$C_P = \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{m} \quad (1.8)$$

1.5.4 COMBINACIÓN DE DATOS MULTIPLICATIVA: debido a que regularmente los índices usados en el diagnóstico de daños se ubican en regiones diferentes dependiendo de la clasificación del daño, se puede aprovechar la combinación de datos multiplicativa para aumentar la dispersión de los datos, esta combinación mejora los índices funcionales, sin embargo, es posible que en los índices que presenten baja sensibilidad, los datos resultantes no sean de utilidad.

Esta combinación está definida por la ecuación 1.9.

$$C_{Pd} = \prod_{j=1}^m I_j \quad (1.9)$$

1.6. INDICES ESTADÍSTICOS PARA ANÁLISIS DE DAÑOS

Para poder entender y analizar los resultados obtenidos en los diferentes escenarios de estudio, se debe aplicar algún método de organización de los datos, la identificación del daño se logra mediante la implementación de índices estadísticos. Los índices por su parte dependen de una función matemática, donde cada uno entrega un resultado que permitirá observar el comportamiento de los datos adquiridos.

En la presente investigación se evaluaron: el índice estadístico de residuos Q , el índice Hotelling T^2 y el índice de distancias de Mahalanobis. A continuación se hace una breve explicación de los índices estadísticos usados para analizar el presente proyecto:

1.6.1 INDICE ESTADÍSTICO DE RESIDUOS Q : usado para comparar los residuos de los nuevos datos experimentales utilizando como punto de comparación un conjunto de residuos de datos tomados bajo condiciones de operación normal [22]. Este índice se define bajo la ecuación 1.10, la cual representa la suma de los cuadrados de la distancia de $(x - \hat{x})$ (donde x es una observación de los datos y \hat{x} representa la reconstrucción de los datos) para el espacio k -dimensional (donde k representa el espacio reducido de los datos) que el modelo PCA define [10].

$$Q = (x - \hat{x})'(x - \hat{x}) \quad (1.10)$$

1.6.2 INDICE ESTADÍSTICO HOTELLING T^2 mide la variación de cada muestra dentro del modelo, indicando cuán lejos está cada muestra del centro de este. El índice se modela bajo la ecuación 1.11, donde λ_i es la constante que representa la variación de cada componente, y t_{ki} representa la muestra $i^{ésima}$ en observación.

$$T_k^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_{ki}^2}{\lambda_i} \right) = Z^2 \lambda^{-1} Z \quad (1.11)$$

El índice estadístico T^2 representa una medida general de la variación del proceso, cuando el proceso se encuentra operando en condiciones normales, la variación de los índices T^2 se mantienen dentro de la región nominal especificada por el ingeniero del sistema [6]. Si los índices salen de la región nominal sistemáticamente, se puede asumir que el sistema empezó a operar en condiciones anormales.

1.6.3 ÍNDICE DE DISTANCIAS DE MAHALANOBIS: este índice permite conocer la similitud entre dos variables aleatorias calculando las distancias que existen entre sí. El índice de mahalanobis aprovecha la varianza entre las variables

analizadas [13], entregando un resultado más sensible a los cambios de distancia.

Este índice está definido por la ecuación 1.12, donde la distancia entre la variable X (La variable sin daño) y la variable Y (la nueva medida que se desea comparar) depende del valor inverso de la covarianza Σ existente entre sí [11].

$$Mdi = \sqrt[2]{(X - Y)^T \Sigma^{-1} (X - Y)} \quad (1.12)$$

Para modelos que aplican PCA, el índice de distancias de mahalanobis se puede definir por la ecuación 1.13, donde P es la matriz de "scores" producida por PCA y P_0 es el nuevo dato proyectado [12].

$$Mdi = \sqrt[2]{(P - Pd)^T G_0^{-1} (P - Pd)} \quad (1.13)$$

donde:

$$G_0 = P_0 \Lambda_0 P_0^T \quad (1.14)$$

1.7. ANÁLISIS DE ROBUSTEZ MEDIANTE CONTINGENCIA $n - 1$

En una detección de fallas robusta, el sistema debe tener la capacidad reaccionar y seguir funcionando correctamente ante perturbaciones, es decir, proporciona fiabilidad en condiciones variables de operación [9] [17]. En este sentido es posible que ocurra daños en el sistema, ya sea en sensores, actuadores, equipos, a causa de tiempos de reacción, temperatura, ruido entre otros. En el presente trabajo sólo se aborda el problema de la pérdida del funcionamiento de algunos de los transductores (PZT), mediante el método de contingencia ($n - 1$), el cual expresa la capacidad del sistema de enfrentar la falla de alguno de sus componentes, y su funcionamiento no es afectado en gran magnitud. [20]

Capítulo 2

METODOLOGÍA

Este capítulo se describe la metodología utilizada para la implementación del algoritmo, aborda el método desarrollado en el proyecto, y describe las diferentes etapas que fueron diseñadas por lo que se tomo como base los trabajos realizados por los grupos de investigación. Además, se beneficia de los equipos adquiridos para la elaboración de los mismos.

Esta sección describe las etapas diseñadas y los equipos que fueron utilizados para el proceso de adquisición de información. Los equipos aquí descritos se encuentran disponibles en el Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander y hacen parte del grupo CEMOS (Grupo de Investigación en control, electrónica, modelado y simulación).

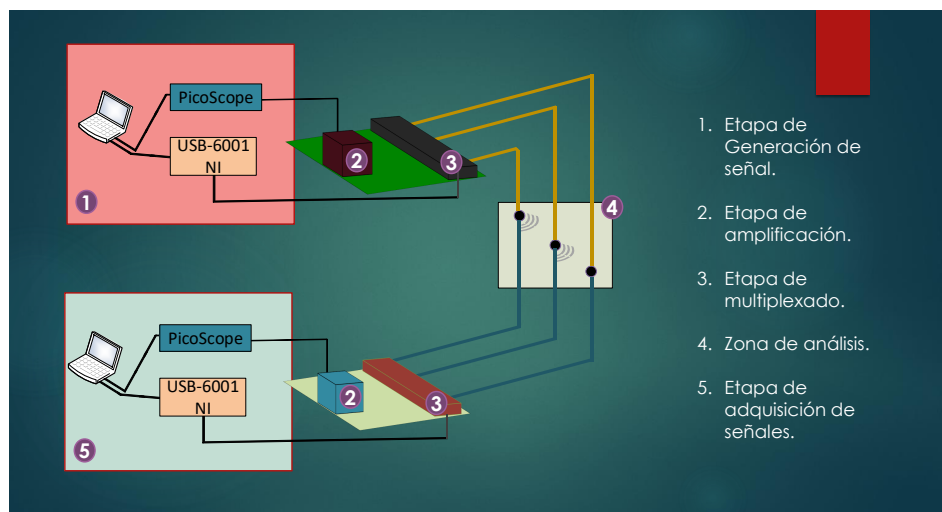


Figura 2.1: Sistema para adquisición de datos

Como muestra el esquema de la figura 2.1 en el desarrollo del proyecto se identifican cinco sistemas principales con sus características técnicas, cada uno de estos serán explicados a continuación, teniendo en cuenta la secuencia en que son ejecutados.

2.1. ACONDICIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA (ZONA DE ANÁLISIS)

En esta etapa se definen los elementos que van a ser materia de estudio, dentro de ella está ubicada, la geometría que va a ser analizada, los elementos que van a ser usados para simular daños y todo aquello que haga parte del análisis del proceso, tal como se señala en la figura 2.2.

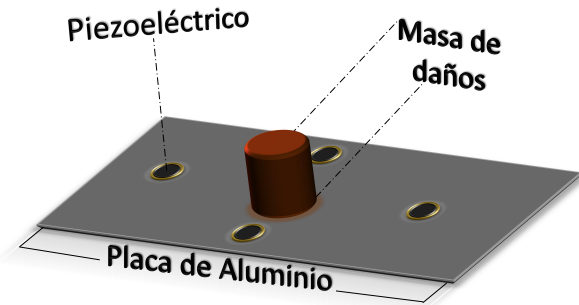


Figura 2.2: Elementos pertenecientes a la zona de análisis

analizar (cuadrada, triangular y circular, cada geometría por aparte). Los daños fueron simulados usando agregaciones de masa de uno y dos kilogramos, estas masas se pueden ver en la figura 2.3.

Para este proyecto se contó con ocho dispositivos piezoeléctricos (PTZ), adheridos a la superficie de una lámina de aluminio, se usaron 8 PZT debido a que el dispositivo de multiplexación de datos presentaba esta limitación. Estos fueron ubicados de manera que pudieran formar las geometrías que se deseaban



Figura 2.3: Izquierda: masas usadas par simulación de daños con un peso de 1kg cada una. Derecha: Masas ubicadas sobre la lamina de aluminio.

2.2. ADQUISICIÓN DE DATOS

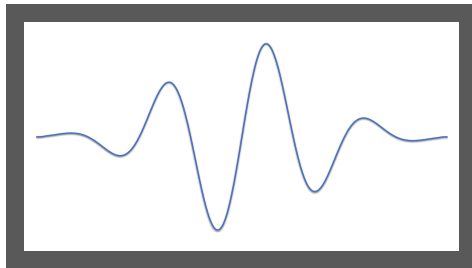


Figura 2.4: Señal tipo Burst generada para excitación de piezoeléctricos.

Usando la herramienta computacional *PicoScope*® se genera una señal tipo "Burst" similar a la que se puede ver en la figura 2.4. Esta señal es configurada con una frecuencia y amplitud que puedan ser aplicables al sistema que se está analizando, en este caso, placas de aluminio.

ETAPA DE AMPLIFICACIÓN Encargada de acondicionar la señal proveniente del equipo de computo hacia el sistema de actuación de manera que pueda ser transmitida desde el actuador hasta el sensor y ser recibida por este último correctamente sin saturar los niveles del sensor.

Esta etapa consta de amplificadores de acondicionamiento de señal con alto rechazo al ruido polarizado en configuración inversora con ganancia variable por medio de una

resistencia con tensión de alimentación de 12 Vpp.

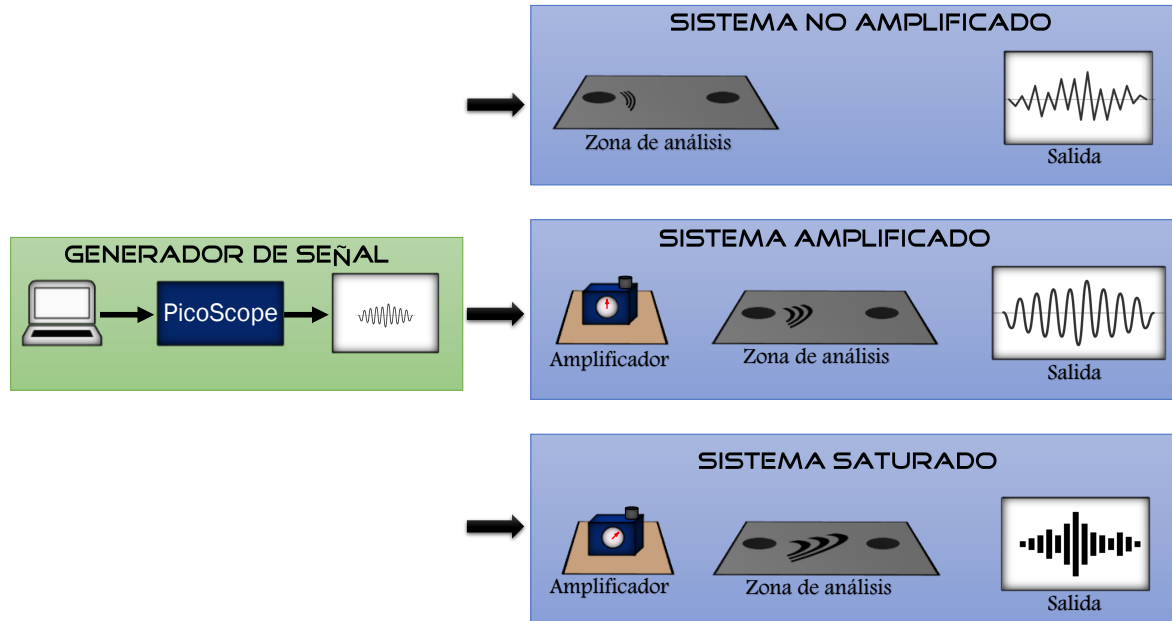


Figura 2.5: Sistemas de amplificación del sistema: no amplificado mostrando ruido en la salida, correctamente amplificado, y sobre amplificado con saturación a la salida.

Este acondicionamiento debe ser implementado debido a que la señal original generada tiene un bajo valor de potencia que no permite que sea dispersada correctamente en el medio de transmisión, y también impide un correcto sensado de datos experimentales (ver en la figura 2.5).

Como se puede ver en la figura 2.5 el ajuste de amplificación debe realizarse correctamente, de otra manera, en la salida no se verá la información como se desea. Si el ajuste de amplificación es muy bajo o nulo la salida se mostrará como una señal de ruido, si la amplificación es muy grande en la salida se encontrará una señal saturada.

ETAPA DE MULTIPLEXADO Aprovechando el principio de transductor de los piezoeléctricos, estos pueden funcionar tanto de actuador como de sensor. Durante esta etapa se configuran los diferentes piezoeléctricos que se encuentran conectados para que trabajen como actuadores, por esto cada piezoeléctrico presenta dos modos:

- **Modo 1. Piezoeléctrico como actuador:** este modo se encarga de alternar cada uno de los piezoeléctricos conectados (para este proyecto ocho piezoeléctricos), de modo que cada cierto tiempo previamente definido la señal generada sea transmitida por un piezoeléctrico diferente, evitando que el que actúa sea el mismo al que sensa la señal.
- **Modo 2. Piezoeléctrico como sensor:** esta etapa permite que cada uno de los transductores sean usados como sensores, para que puedan recibir una señal mecánica y convertirla en una señal eléctrica que sea almacenada posteriormente. Este proceso toma los piezoeléctricos conectados (para este proyecto ocho PZT), alternando cada cierto tiempo el transductor que sensa la señal y evitando que este, sea el que transmite la señal.

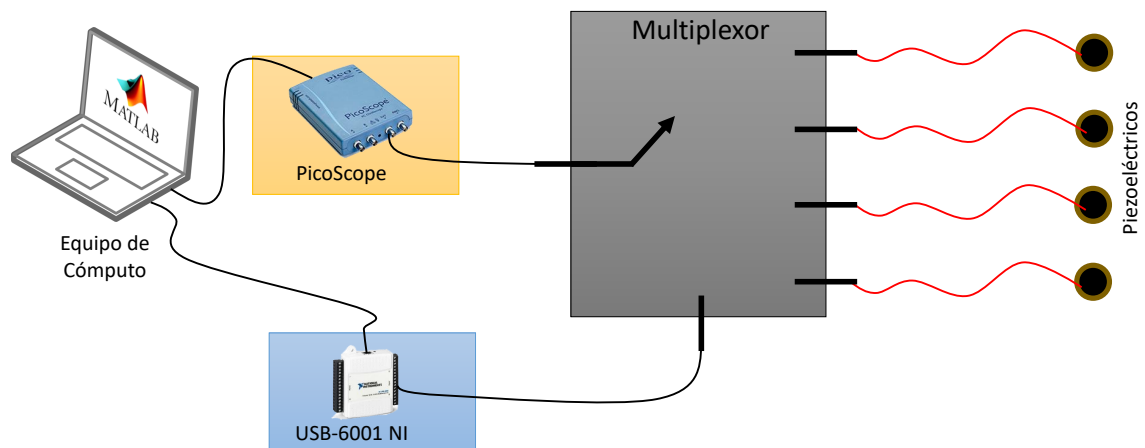


Figura 2.6: Etapa de multiplexado del sistema

El proceso previamente descrito fue realizado por medio de una sistema como el que se puede ver en la figura 2.6. Este fue desarrollado por el grupo de investigación CEMOS y a su vez, diseñado con el fin de optimizar el proceso en la toma de datos, contando además con una tarjeta USB-6001 de *National Instruments* que es la encargada de enviar la orden al módulo de multiactuación para que realice los cambios en el momento deseado por el usuario.

2.3. DISEÑO DE ALGORITMO PARA ADQUISICIÓN DE SEÑALES

Las señales eléctricas generadas y transmitidas a través de la placa de aluminio son sensadas por el piezoeléctrico de turno, esta señal debe ser almacenada de forma que pueda ser usada para estudios posteriores. Dicha etapa guarda la información usando la herramienta computacional Picoscope®, la cual toma la información proveniente del piezoeléctrico y la almacena como un conjunto de datos que representan la señal adquirida.

Para poder almacenar la información ordenadamente y en el momento exacto, se usa la herramienta Matlab®, encargada de enviar la órdenes a Picoscope® por medio de un algoritmo diseñado por el grupo de investigación CEMOS, el cual adquiere los datos de manera autónoma, permitiendo configurar los parámetros de

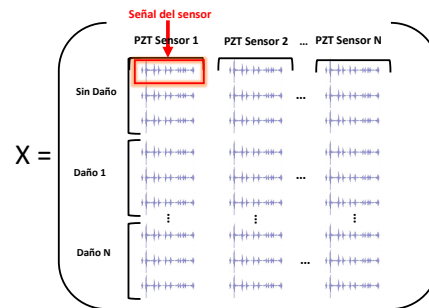


Figura 2.7: Matriz de estados de la estructura

las tarjetas tales como la frecuencia de muestreo, la señal transmitida, entre otros parámetros. Dicho algoritmo recolecta los datos en carpetas diferenciando aquellos estados con daño y sin daño, y permite construir la matriz de estados de la estructura de acuerdo al número de daños, como se muestra en la figura 2.7. De igual forma, se filtra la señal con el objetivo de eliminar ruidos que puedan afectar el análisis, además de aplicar correlación cruzada de los datos.

2.4. ALGORITMO PARA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE LÍNEA BASE

Como se expuso en la sección anterior, los datos adquiridos permiten construir la matriz de estados; una vez construida dicha matriz, se obtiene el modelo PCA utilizando el algoritmo descrito a continuación.

Basados en el método estadístico PCA (Análisis de Componente Principales), investigadores del grupo de investigación CEMOS desarrollaron un algoritmo en MATLAB que implementa el sistema que se presenta en la figura 2.8, donde una vez construida la matriz de casos sin daños y la matriz de estados de la estructura, se procede a obtener el modelo PCA.

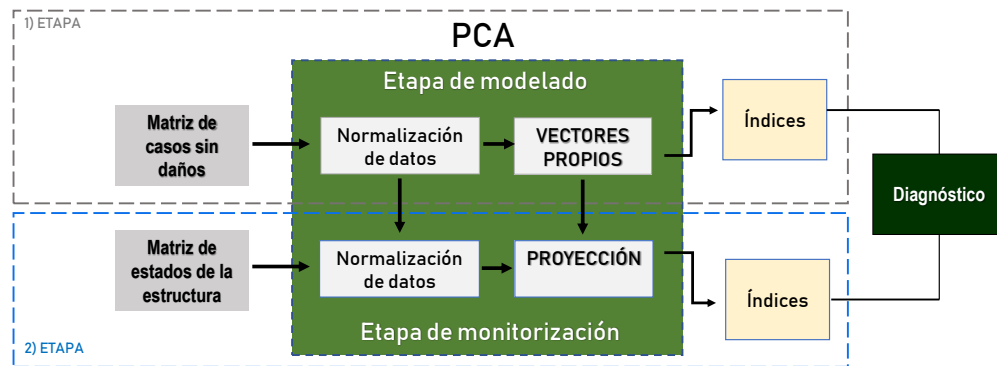


Figura 2.8: Matriz de casos

Este consiste en normalizar la matriz de casos, la cual está compuesta por cada valor estandarizado, por su respectivo valor medio y desviación estándar. Una vez normalizada, se calcula una matriz de covarianza usando la matriz de casos, utilizando la misma cantidad de componentes principales que el número de experimentos. Luego se procede a estimar el vector de componentes principales reducido mediante la obtención de los vectores propios y valores propios de la matriz de covarianza. Concluido el proceso anterior, se construye el modelo de línea base mediante PCA, el cual se compone de:

- La matriz de normalización, compuesta por los valores medios y por la desviación de la matriz de casos sin daños.
- Los vectores propios.
- Las varianzas de los componentes principales conformada por los valores propios.

Capítulo 3

CASOS DE ESTUDIO

Para evaluar el desempeño del algoritmo de detección de fallas, se plantearon tres escenarios, cada uno de ellos asociado a una forma geométrica, los cuales tuvieron como fin estudiar cuál de las configuraciones propuestas fue la más óptima en un sistema de piezodiagnosis con múltiples puntos de actuación. La onda elástica ultrasónica generada por los PZT se propaga en un medio sólido y guiado entre dos superficies libres paralelas, como la superficie superior e inferior de una placa delgada. Su propagación es dispersiva, lo que significa que la velocidad de la onda varía con el espesor de la placa y la frecuencia a la que se generan [16]. Para el desarrollo del proyecto en cada caso se utilizó una lámina de aluminio de un metro cuadrado y dos milímetros de ancho, en las cuales se agregaron masas que presionan la lámina y de esta manera simular daños en el sistema. La construcción de los escenarios se realizó en el Parque Tecnológico de Guatiguará.

3.1. ESCENARIO 1: DIAGNÓSTICO DE DAÑOS PARA GEOMETRÍA CIRCULAR

La configuración propuesta en este escenario, consta de ocho piezoeléctricos (PZT) distribuidos formando un círculo de 50cm de diámetro.

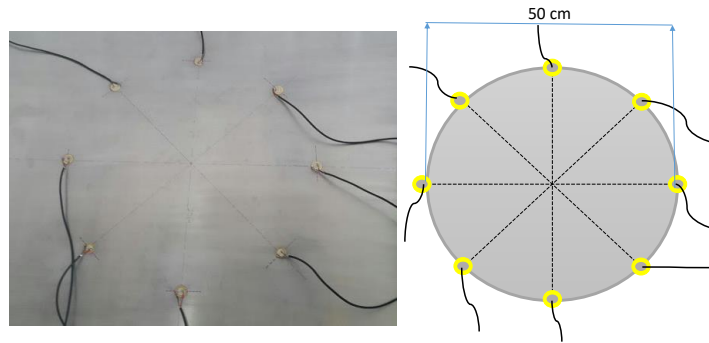


Figura 3.1: Dimensiones configuración circular

Inicialmente se configura el sistema en modo de actuación fija, esto significa que un piezoeléctrico funciona como actuador y los otros siete, trabajan como sensor, tal como se puede encontrar en la figura 3.2. Este modo de actuación fue usado para comprobar si existe algún valor agregado al implementar el método de multiactuación.

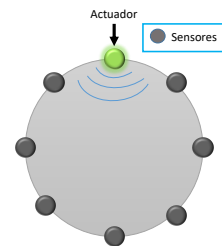


Figura 3.2: Actuación simple en configuración circular

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE MULTIACTUACIÓN PARA UN ESCENARIO CON GEOMETRÍA CIRCULAR Aprovechando la propiedad de transductor de los PZT se implementó el método de multiactuación en esta geometría, para esto se activa el primer PZT como actuador y los otros siete se fijan como sensores, teniendo esto listo se adquieren los datos del experimento y se procede a activar el segundo PZT como actuador y dejar los siete restantes fijo como sensores, esta proceso se realiza hasta que todos los PZT se hayan usado como actuador, tal como se puede encontrar en la figura 3.3.

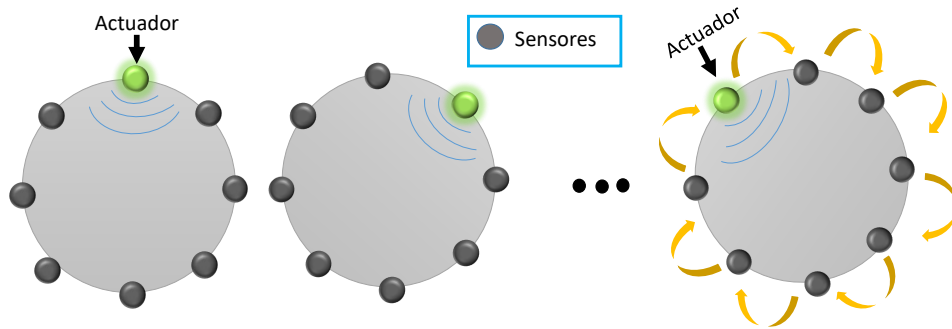


Figura 3.3: Multiactuación en configuración circular

3.2. ESCENARIO 2: DIAGNOSTICO DE DAÑOS PARA GEOMETRÍA CUADRADA

Para la fabricación de este escenario, se organizaron los piezoeléctricos (PZT) de forma cuadrada, dándole a cada uno una nomenclatura del uno al ocho ($S1 - S8$), como se muestra en la figura 3.4. Las dimensiones del área a estudiar son $50\text{cm} \times 50\text{cm}$.

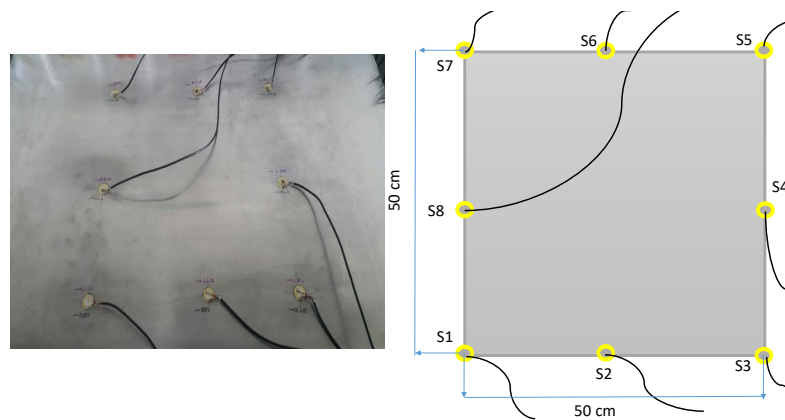


Figura 3.4: configuración cuadrada

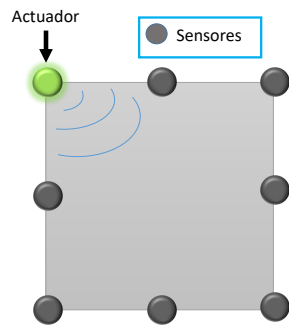


Figura 3.5: Actuación simple en configuración cuadrada

Inicialmente se adquieren los datos del experimento eligiendo un PZT de los ocho disponibles para ser usado como actuador y los siete restantes se fijan como sensores tal como se encuentra en la figura 3.5, esta conexión fue usada como modelo de comparación para encontrar cuál es el aporte que se gana al implementar el método de multiactuación.

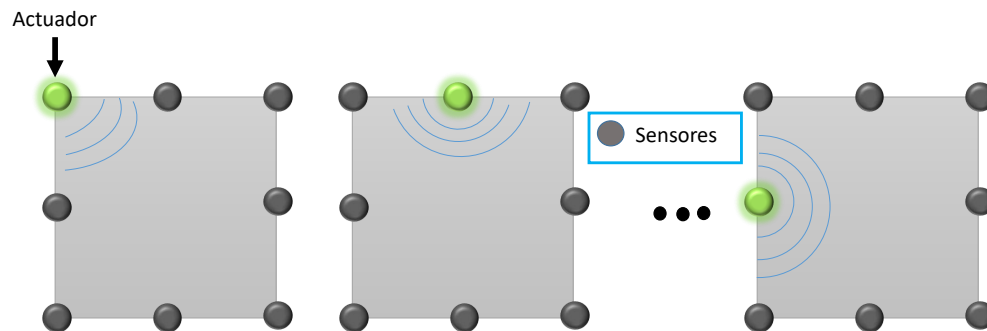


Figura 3.6: Multiactuación en configuración cuadrada

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE MULTIACTUACIÓN PARA UN ESCENARIO CON GEOMETRÍA CUADRADA Este proyecto de investigación buscó aprovechar los principios de multiactuación que se pueden implementar en los PZT por lo tanto, se configuró el sistema de modo que se puedan realizar ocho experimentos, donde un PZT diferente funcionara como actuador en cada uno, tal como se puede ver en la figura 3.6. Sobre estos resultados se implementaron los índices de datos y las distintas combinaciones, y así se encontró cuál es el mejor índice y el aporte de usar el método de multiactuación sobre esta geometría.

3.3. ESCENARIO 3: DIAGNOSTICO DE DAÑOS PARA GEOMETRÍA TRIANGULAR

Como se observa en la figura 3.7, para la construcción de este escenario, se utilizaron ocho piezoeléctricos (PZT), distribuidos de tal forma que conformen un triángulo isósceles de dimensiones $58,36\text{cm} \times 35,36\text{cm}$.

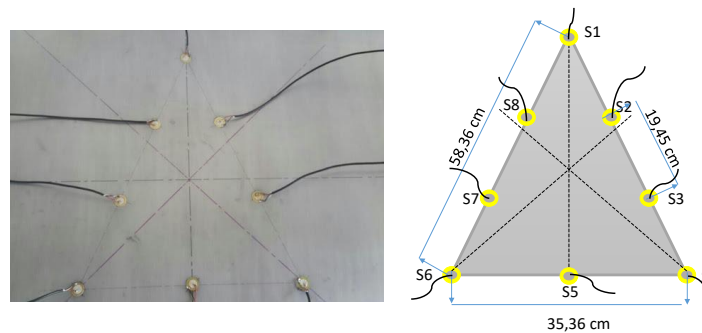


Figura 3.7: Dimensiones configuración triangular

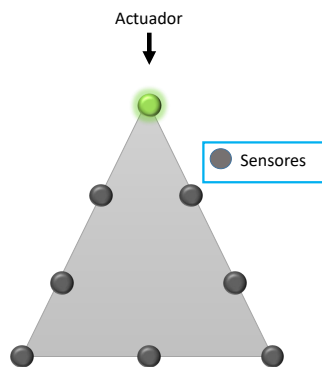


Figura 3.8: Actuación simple en configuración triangular

Inicialmente se configura el sistema para adquirir datos con solo un PZT como actuador como se puede ver en la figura 3.8, esta configuración permitió implementar los distintos índices y combinaciones propuestas y realizar el diagnostico de datos deseado.

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE MULTIACTUACIÓN PARA UN ESCENARIO CON GEOMETRÍA TRIANGULAR Finalmente se configura el

sistema de modo que se generen ocho experimentos, donde para cada experimento un PZT diferente funcionó como actuador, tal como se encuentra en la figura 3.9, estos resultados fueron analizados implementando los diferentes índices estadísticos propuestos y las combinaciones de datos, de esta forma se pudo comparar la calidad de resultados sobre la estructura y comparar los resultados con el método de actuación fija donde solo un PZT funciona como actuador.

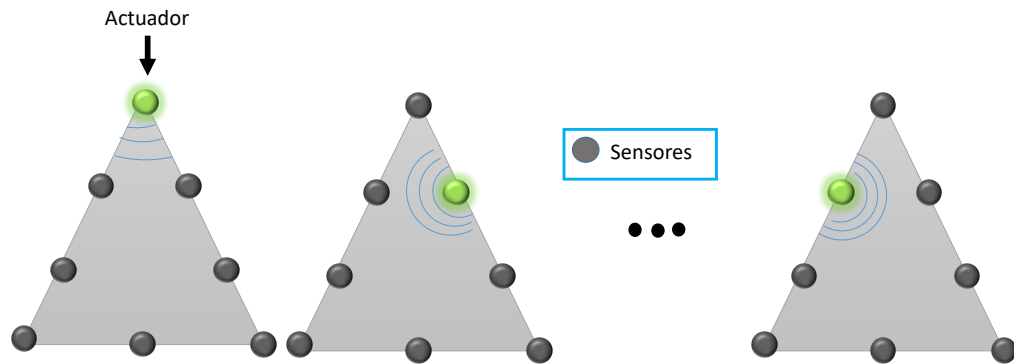


Figura 3.9: Multiactuación en configuración triangular

3.4. MÉTODO DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

Debido a que el propósito final de los experimentos fue diagnosticar daños en las estructuras de pruebas, se implementó los distintos índices de daños en cada estructura, procurando determinar cual método es óptimo para cada escenario, igualmente se comprobó el efecto de las diferentes combinaciones de datos para los datos adquiridos por métodos de multiactuación.

Para cada experimento se ubicaron los daños en cuatro zonas, las cuales se pueden ver en la figura 3.10, analizando cómo responde la estructura en análisis frente a daños ubicados a lo largo de sí misma.



Figura 3.10: Regiones de ubicación de daños

Para cada resultado obtenido se analizarán los siguientes parámetros:

- Número de datos sin daños: especifica la cantidad de datos que se tomaron con la estructura en operación normal.
- Número de datos con daños: especifica la cantidad de datos que se almacenaron cuando en la estructura se simuló algún tipo de daño.
- Datos de tipo falso positivo: representa la cantidad de datos que, siendo daños, se encuentran en la zona de operación normal.
- Valor máximo de los datos: representa el valor máximo que resultó del análisis.
- Sensibilidad del índice: calcula porcentualmente cuántos de los datos con daños se muestran como datos en operación normal. Este cálculo se hace usando la ecuación 3.1.
- Zona de Umbral: muestra cuánto espacio existe entre el último dato en la zona de operación normal y el primer dato en la zona de daños, entre más grande sea esta zona menos posibilidad existe de presentarse un falso positivo.

- Separabilidad porcentual de la zona de Umbral: este parámetro permite conocer qué porcentaje de datos es usado como umbral, entre mayor sea el porcentaje de la zona de umbral se puede definir que el diagnóstico de datos será más exacto debido a que los datos con daños se separan más de los datos sin daños. Esto se calcula usando la ecuación 3.10.
- Desviación estándar σ : la desviación estándar permite conocer cuán separados están los datos del promedio, entre mayor sea la desviación estándar mas probabilidades hay de hacer un buen diagnóstico de los datos para determinar si existe o no existe un daño.
- Promedio de los datos $|\bar{x}|$: permite conocer la media aritmética de todos los datos presentes en el resultado.

$$Sensibilidad = \frac{D - FP}{D} \quad (3.1)$$

$$Agrupamiento = \frac{\text{Zona de umbral}}{\text{Dato Máximo}} * 100 \quad (3.2)$$

Capítulo 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La adquisición de datos descrita en el capítulo 2 se realizó en el Parque Tecnológico Guatiguará y como se explicó anteriormente, existieron tres escenarios de estudio, en los cuales se llevaron a cabo una serie de pruebas con y sin daños. Además, como se verá al final de este capítulo, el escenario que presentó mejores resultados fue validado en términos de robustez y eficiencia. Cada estudio se ejecutó de la manera descrita en la tabla 1.

	Número de Pruebas	Número de Experimentos por Prueba	Duración de cada Experimento (minutos)	Duración Prueba (minutos)
Datos sin daño	1	100	280	280
Datos con daño	4	20	60	240
Duración total				520 (8h 40m)

Tabla 1: Descripción de proceso de adquisición de datos

Para cada una de las pruebas realizadas, se recolectaron los datos como se describió en la tabla 1 y al aplicar los algoritmos desarrollados se obtuvieron diferentes diagnósticos de daños, estos resultados serán expuestos durante este capítulo. Los datos mostrados están organizados según la tabla 2. Los modelos de línea base se crearon usando 50 datos de los 100 adquiridos. Se realizó de esta manera para poder usar los 50 datos restantes para validar la efectividad del modelo de línea base para el sistema en operación normal.

Tipo de Dato	Color Gráfica
Sistema en condiciones normales (Sin daños)	Verde
Daño zona 1	Rojo
Daño zona 2	Magenta
Daño zona 3	Cian
Daño zona 4	Azul

Tabla 2: Especificación de las gráficas de resultados

A continuación se presentarán los resultados obtenidos en los tres escenarios geométricos (circular, cuadrada y triangular), los cuales se analizaron de igual forma en todas las configuraciones, por lo tanto sólo se realizará una descripción detallada del proceso para la actuación simple, donde el fin es extrapolar dos parámetros de comparación (*Separabilidad de la zona de umbral y sensibilidad*), y de esta manera contrastar los resultados.

4.1. ANÁLISIS DE EFICIENCIA PARA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN IMPLEMENTADO

Debido a que el sistema de adquisición de datos y los piezoeléctricos usados son los mismos para todas las geometrías implementadas, pero ubicados de manera diferente, no existe mejora de tiempo al realizar un cambio de geometría; en la tabla 1 se puede notar la duración de cada prueba, una explicación más detallada se puede encontrar en la tabla 3, para este proyecto se define que la eficiencia de la adquisición en función del tiempo es igual para todas las pruebas, por lo tanto, la comparación de resultados se realizará en términos de robustez, sensibilidad y separabilidad de datos.

	Pruebas Sin Daño	Pruebas Con Daño
Duración de una muestra En segundos	3	3
Muestras por Experimento	56	56
Numero de Experimentos	100	20
Tiempo total (Segundos)	16800	3360
(Minutos)	280	56
(Horas)	4.6	

Tabla 3: Descripción detallada de la duración del proceso de adquisición de datos

4.2. EVALUACIÓN DEL DIAGNÓSTICO DE DAÑOS USANDO DIFERENTES ARREGLOS GEOMÉTRICOS DE PZT

4.2.1 GEOMETRÍA CIRCULAR, RESULTADOS DESTACADOS

Implementando la metodología expuesta en el capítulo 3, se configuró el sistema para que un piezoeléctrico funcionara como actuador y los siete restantes como sensores, de este modo se obtuvieron los resultados relacionados en la Figuras 4.1, 4.2 y 4.3, y de igual forma se presentan para las demás configuraciones en el anexo A. Como se observa en la figura 4.1 para el caso del índice residual Q , hay una separación entre la zona con daños y la zona sin daños, a la cual se le denomina *margen de separación*, que en este caso corresponde a 4,9128 , lo que permite realizar el diagnóstico. Este margen de separación se calculo tomando la distancia entre el dato superior del clúster sin daños y el dato inferior del clúster con daños.

Índice residual Q

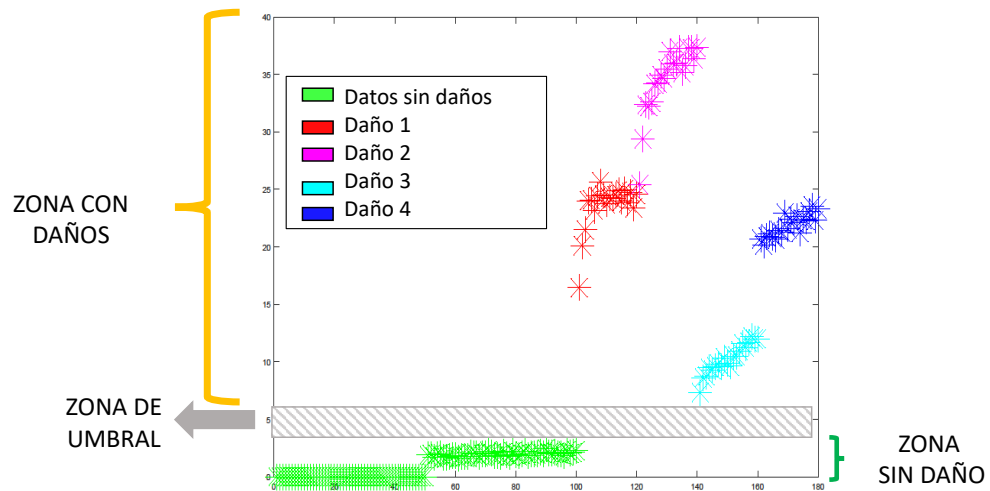


Figura 4.1: Implementación del índice residual Q para el modelo de actuación simple en geometría circular

En contraste con el caso anterior, como se observa en la figura 4.2, para el índice Hotelling el margen de separación es pequeño (1,49) y además ocurren *Falsos Positivos* es decir, existen datos en la zona sin daños que realmente no lo son.

Índice Hotelling T^2

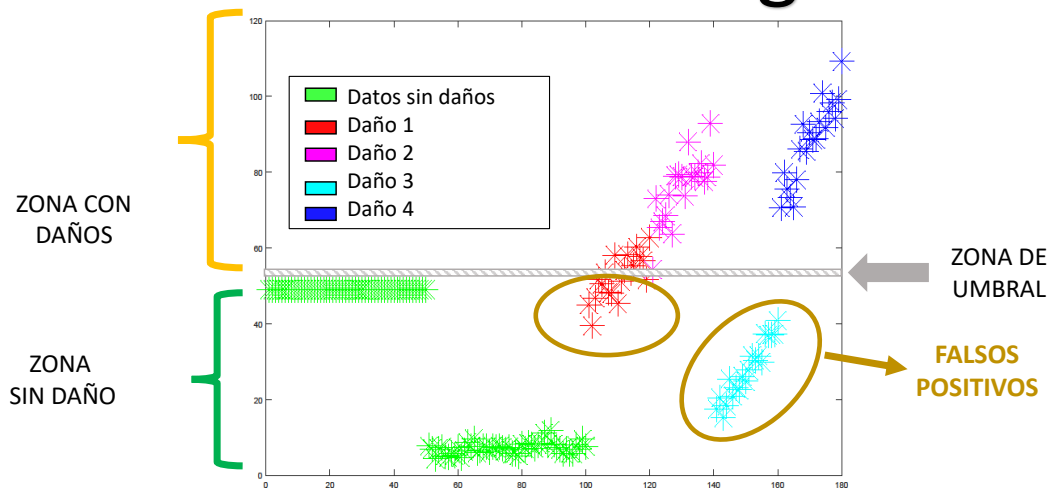


Figura 4.2: Implementación del índice Hotelling T^2 para el modelo de actuación simple en geometría circular

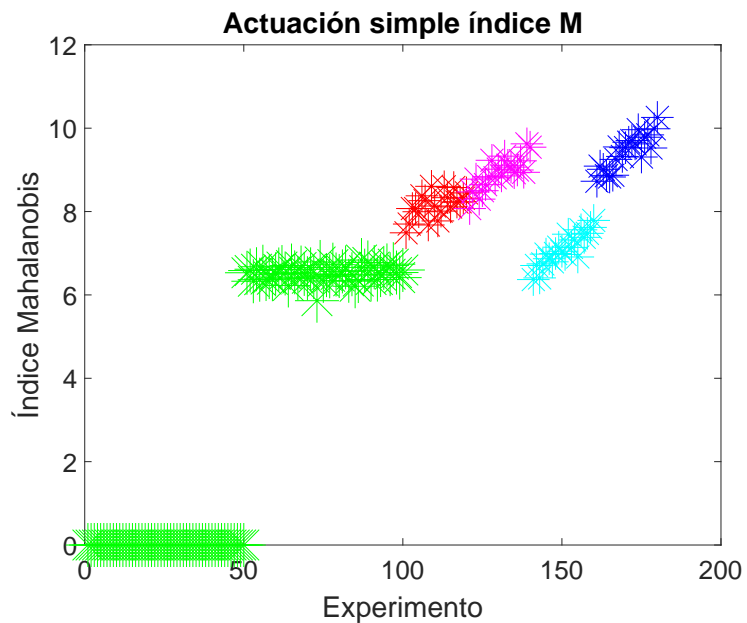


Figura 4.3: Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con actuación simple

Una vez realizado el análisis gráfico, se extrapolaron los resultados en tablas, las cuales se encuentran en el anexo B, en donde se resaltaron 5 características importantes en el análisis comparativo; el número de *Datos con daño* (80 en todos los casos), el número de *Falsos positivos*, valor del *Dato máximo de la prueba*, el valor *Promedio de los datos* y la *Desviación estándar*.

Para el caso de estudio en la tabla 4, se observa que en el índice Mahalanobis se presentaron 12 falsos positivos, lo que se traduce en que la sensibilidad sería de menos del 100 %, es decir, no detecta correctamente el daño. Además el margen de separación es la más pequeña de las tres, por lo que se espera un porcentaje de separabilidad relativamente pequeña (2 %).

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	26	12
Valor máximo de los datos	37,3565	109,2089	10,2581
Sensibilidad	100 %	68 %	85 %
Margen de separación	4,9128	1,49	0,2
Separabilidad del margen de separación	13 %	1 %	2 %
Desviación Estandar	12,2794	27,9663	3,5919
Promedio de los datos	10,5697	42,7256	5,5396

Tabla 4: Resultados para cada índice por actuación simple en geometría circular

Finalmente, analizando los parámetros de comparación, se obtiene la gráfica de barras que se encuentra en la figura 4.4, como se analizó previamente, el índice Q presenta la mejor sensibilidad, destacando que es el índice óptimo al diagnóstico de

daños en el escenario circular para actuación simple; este índice presenta la mejor separabilidad de la zona de umbral separando los datos con daño de los datos en operación estable, con un coeficiente de variación de 116 %, para crear una dispersión de datos suficiente que permite identificar la zona de daños en el área de operación continua.

Este capítulo analizará los resultados de implementar diferentes combinaciones de datos en las configuraciones geométricas previamente expuestas, por lo tanto, para cada geometría se procederá a mostrar el mejor caso, el peor caso y un caso que sea óptimo y aceptable, de modo que para el lector sea claro el funcionamiento del sistema.

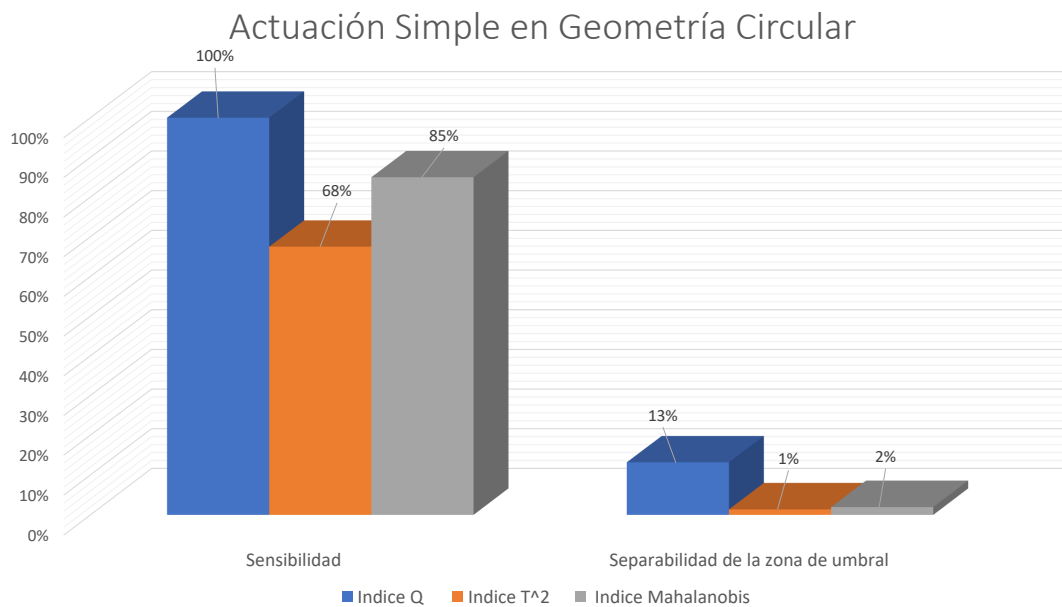


Figura 4.4: Comparación de parámetros porcentuales de los índices en geometría circular para la actuación simple

Al aplicar el código al escenario circular, se obtuvieron los resultados que se encuentran en el Anexo A1, estos muestran gráficamente cómo se comportan los datos para cada uno de los índices en actuación simple, multiactuación y para las diferentes combinaciones, los cuales fueron extrapolados a las tablas que se encuentran en el Anexo B1, y comparados por gráficos de barras en el Anexo C1.

Se procederá a mostrar los resultados destacados en la geometría circular:

Mejor Caso, índice Mahalanobis multiplicativo

Luego de analizar todos los resultados que se pueden encontrar en los anexos A1,B1 y C1, se define que el índice con la mejor combinación es Mahalanobis en combinación multiplicativa (anexo A1.8), este resultado presenta una sensibilidad del 100 %, es decir, el sistema tiene la capacidad de detectar los cambios en su estructura y no presenta falsos positivos en sus resultados.

Este índice presenta un margen de separación del 4 % que representa un espacio de millones de puntos, aunque parece pequeña porcentualmente. Finalmente, presenta un coeficiente de variación del 152 %, esto indica que existe alta dispersión de datos, permitiendo no solo detectar el daño sino también organizar los datos en clusters que dan información específica de cada daño.

Se define como el índice óptimo para una detección de datos con configuración geométrica circular, sin embargo, este índice no se recomienda para sistemas embebidos por la alta cantidad de bits manejados.

Caso Aceptable, índice Q promediado

Para una configuración geométrica circular que implementa métodos de multiactuación, el índice Q promediado entrega unos datos que permiten una detección de datos correcta, como se puede ver en el anexo B1.7 este modelo tiene una sensibilidad del 100 %, con una margen de separación del 37 % que asegura que la detección será correcta debido a que los datos tienen una separabilidad importante.

Este índice con esta combinación de datos presenta un coeficiente de variación del 111 %, adecuado para un buen diagnóstico, pero no permite definir claramente diferentes clusters en caso que se desee conocer información puntual de cada daño.

Se reconoce este índice como un índice adecuado para un detección óptima en sistemas de bajos recursos, debido a que no utiliza una gran cantidad de bits y no falla

en su detección.

Peor caso, índice T^2 simple

Según los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio (anexo A1.1), este índice es el que presenta mayor cantidad de falsos positivos, de 80 datos experimentados, 41 fueron diagnosticados erróneamente por lo tanto, presenta una sensibilidad del 48 %, la cual es muy baja en comparación con los otros índices estudiados.

Este índice presenta una separabilidad del 0 %, por esa razón, tanto los datos de daño como los de operación estable, se encuentran muy cercanos, evitando un correcto diagnóstico, y finalmente presenta un coeficiente de variación del 76 %. Se puede ver que cuando los coeficientes de variación son menores al 100 % los datos se agrupan demasiado y tienden a fallar.

Se sugiere evitar los modelos de combinación simple para esta geometría cuando se tienen sistemas que permiten multiactuación debido a que como se puede ver los modelos de actuación simple tienden a presentar los errores más grandes, tal como se puede observar en los anexos.

4.2.2 GEOMETRÍA CUADRADA, RESULTADOS DESTACADOS Los resultados de implementar la geometría cuadrada se encuentran en la página de anexos A2, estos resultados permiten ver cómo se comportan los diferentes índices y combinaciones, de modo que pueda ser entendible para el lector. Estos son extraídos en las tablas de anexos B2 y comparados en los gráficos C2, y se procedió a determinar los casos más destacados.

Para la geometría cuadrada se destaca que no existieron falsos positivos en sus resultados, por lo tanto la elección de los casos se basó en la capacidad de separar sus clusters y generar un separación aceptable.

Mejor caso, índice T^2 multiplicativo

Si el lector analiza el Anexo A2.8 y la tabla del anexo B2.8 y las compara con los demás resultados encontrará que el índice T^2 en combinación multiplicativa presenta una sensibilidad del 100 %, y un coeficiente de variación del 284 %, lo cual se puede traducir a una dispersión importante de los datos, permitiendo separar los daños en clusters diferentes para un estudio posterior.

Estos resultados muestran una separabilidad del 0 % que puede hacer pensar que no es un índice óptimo, sin embargo, el margen de separación es de $6,3 \times 10^{18}$ lo cual representa una separabilidad que asegura una detección para una cantidad considerable de datos.

Se recomienda usar este índice si se cuenta con un equipo de computo capaz de manejar una gran cantidad de bits, debido a que este índice al ser multiplicativo almacena número de un orden elevado.

Caso aceptable, índice mahalanobis empírico

Al analizar los resultados del anexo A2.6 y B2.6 y compararlo con los demás resultados se puede encontrar que este índice asegura un resultado óptimo y brinda una separabilidad adecuada de los datos sin usar una gran cantidad de bits, para este caso se cuenta con un coeficiente de variación del 145 % lo cual indica que los datos se dispersan considerablemente y con una separabilidad del 13 % indicando que el cluster general de daños y el cluster de datos en operación continua se separan brindando un correcto diagnóstico de datos.

Este índice es adecuado para sistemas embebidos, o sistemas que deseen usar pocos recursos computacionales en su diagnóstico, y desee asegurar que el diagnóstico de daños es correcto.

Peor caso, índice mahalanobis simple

Debido a que los resultados en general de esta geometría son aceptables, el peor caso analizado será el que presenta un coeficiente de variación menor, esto es debido a que no permite la separación de clusters. El índice de mahalanobis simple (ver Anexo A2.1 y B2.1) permite realizar un diagnóstico correcto con una sensibilidad del 100 %, sin embargo, su coeficiente de variación es del 82 % el mas bajo de todos los casos, significando esto que sus datos están muy agrupados y no permite la diferenciación de los mismos.

Esté índice presenta una separabilidad del 8 %, pero en valores numéricos este porcentaje representa 2 puntos de separabilidad lo cual representa que el sistema frente a cambios inesperados puede fallar.

4.2.3 GEOMETRÍA TRIANGULAR, RESULTADOS DESTACADOS

Luego de implementar todas las geometrías y analizar los resultados que se encuentran en las páginas de anexos, se puede ver claramente que este modelo presenta un rendimiento interesante, debido a que es el caso con mejores resultados. En la página de anexos A3 se observan directamente los resultados obtenidos, estos datos son extrapolados a las tablas de la página de anexos B3, y comparados en las gráficas de la pagina de anexos C3, con estos datos se definieron los casos más destacados, los cuales se mostrarán a continuación.

Mejor caso, índice Mahalanobis multiplicativo

Si el lector analiza los resultados que se encuentran en el anexo A3, B3 y C3 se podrá dar cuenta que el índice de mahalanobis multiplicativo presenta un diagnóstico correcto con una sensibilidad del 100 %, demostrando que detecta las variaciones en la estructura analizada en las diferentes zonas estudiadas.

Este índice presenta una separabilidad del 2 % que aunque a primera vista parece un porcentaje pequeño se puede ver en las tablas B3.8 que representa un valor de millones de puntos, generando una separabilidad entre el cluster de daños y el cluster de operación continua lo suficientemente grande para entregar un diagnóstico óptimo.

Finalmente este índice muestra un coeficiente de variación del 197 %, demostrando que los datos se dispersan lo cual, además de entregar un diagnóstico correcto también permite la separabilidad de sus datos en diferentes clusters dependiendo del daño realizado.

Al igual que en las geometrías anteriores, se recomienda este caso para sistemas que tengan una capacidad de computo elevada, debido a que al usar una cantidad de bits grande aumenta la cantidad de recursos computacionales requeridos para poder operar.

Caso aceptable, índice Q promediado

Si el usuario desea tener un diagnóstico correcto con una cantidad de operaciones computacionales reducida se recomienda usar el índice Q con una combinación promediada, este índice entregó para los experimentos realizados una sensibilidad del 100 % lo cual significa que no existieron falsos positivos en sus diagnósticos, además de una separabilidad del 41 %, representando que el cluster general de daños y el cluster de datos de operación estable se encuentra suficientemente separados para dar un resultado correcto.

Este índice tiene un coeficiente de variación del 114 % mostrando una dispersión de los datos amplia y permitiendo separar cada daño en zonas diferentes.

Peor caso, índice Mahalanobis simple

Al ser implementada la geometría triangular se puede encontrar que siempre se obtuvo un diagnóstico correcto y en la mayoría de casos se pueden separar los daños en diferentes clusters fácilmente, por lo tanto el peor caso se encuentra cuando la dispersión de los datos es menor, lo cual representa que los clusters de datos se encuentran mas proximos entre sí y el diagnóstico puede fallar frente a cambios inesperados.

Este índice entrega un coeficiente de variación de 86 %, con una separabilidad del

24 % entre el cluster de operación estable y el cluster de daños. Se recomienda que en los casos de diagnóstico de daños en estructuras donde se pueda contar con modelos de multiactuación se aprovechen las combinaciones de datos, esto debido a que se puede demostrar con base en los demás resultados que las combinaciones tienden a mejorar el sistema de diagnóstico.

4.3. ANÁLISIS DE ROBUSTEZ

En esta sección se estudiará los resultados obtenidos en el análisis de robustez mediante contingencia $n-1$ y cambios de temperatura, los cuales se realizaron sólo para la geometría triangular, debido a que esta presentó mejores resultados en el diagnóstico. Se evaluó el desempeño utilizando sólo los parámetros de *margen de separación* en escala porcentual y *Falsos Positivos* de igual forma que en la sección anterior. Inicialmente se realizó el análisis para el índice Q contrastando los resultados con los datos Autorreparados, seguido del índice T^2 y por último el índice de Mahalanobis.

4.3.1 VALIDACIÓN MEDIANTE CONTINGENCIA $n-1$ Y AUTOREPARACIÓN Debido a que pueden ocurrir daños en el sistema, se evaluó el diagnóstico resultante cuando un PZT se desconecta. Como se observa en la figura 4.2, uno de los PZT al azar es desconectado después de haber sido realizado el modelo de línea base.

Adicionalmente se introduce el término de autoreparación, esto significa que el algoritmo implementado es capaz de determinar si uno de los PZT se ha desconectado o está fallando y eliminar sus datos del diagnóstico.

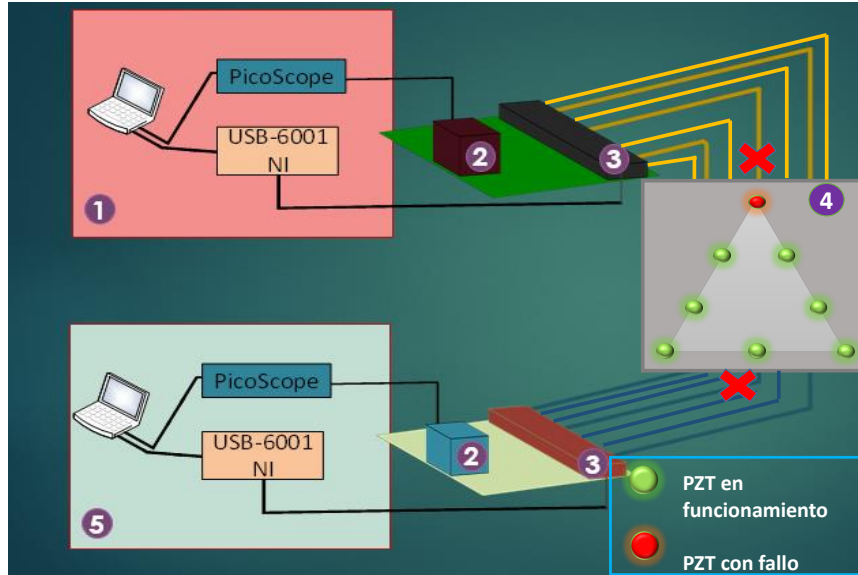


Figura 4.5: Sistema de adquisición de datos

La simulación del daño, se realizó incorporando *Ruido Gaussiano* de amplitud máxima de 0.12 [V], lo que corresponde al 1% de la amplitud máxima de la señal generada en la Etapa 1. Una vez implementado el algoritmo, sin los condicionales de autorreparación, se obtuvieron los resultados expuestos de la figura 4.6, donde se observa que a medida que el sistema pierde un PZT, la separabilidad disminuye considerablemente cuando uno de los sensores presenta ruido, caso contrario sucede cuando el sistema se autorecupera e intenta seguir el comportamiento del proceso original sin ruido.

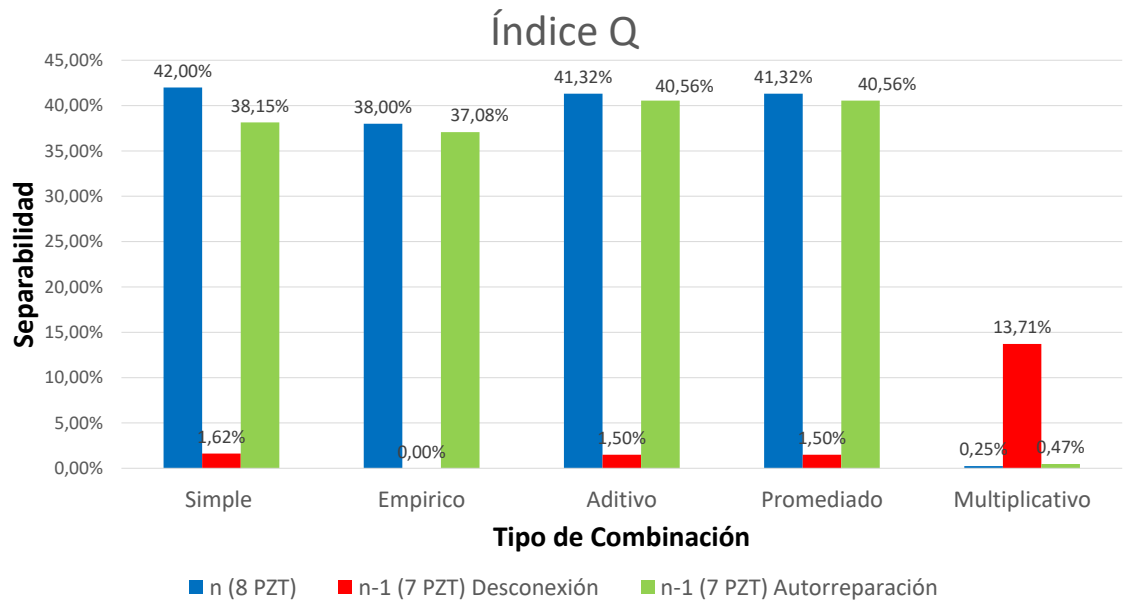


Figura 4.6: Resultados de separabilidad en pruebas de contingencia para cada una de las combinaciones de datos

En términos de falsos positivos para el caso del índice Q, como se observa en la figura 4.7, se presentaron sólo falsos positivos en la combinación empírica (con un total de 80 falsos positivos). Es decir para la validación de contingencia la combinación empírica nunca logró detectar daños aún cuando estos existían.

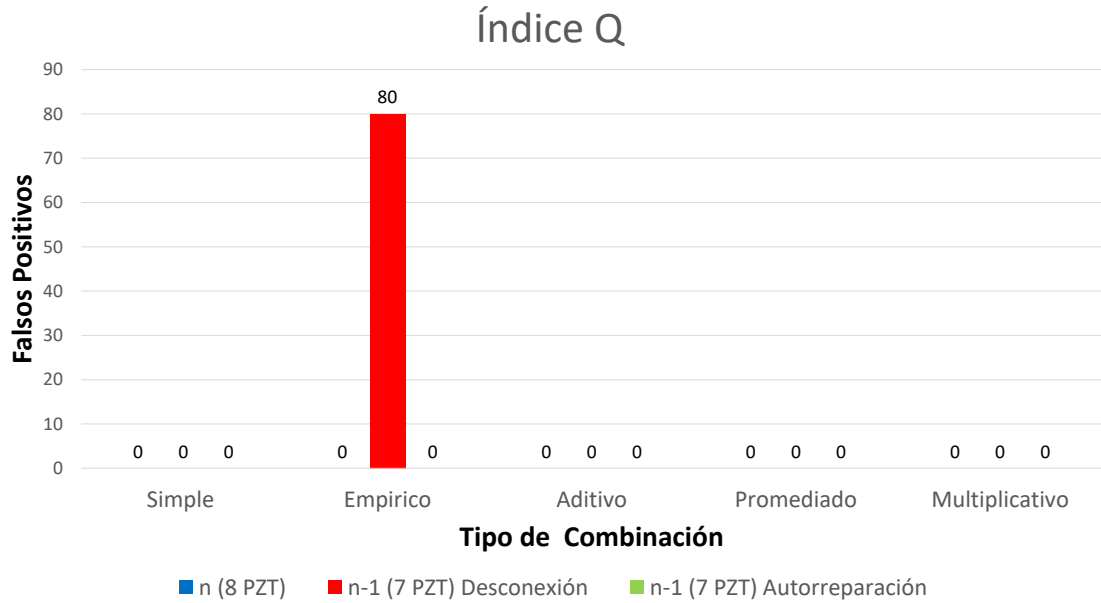


Figura 4.7: Falsos positivos resultantes en la simulación para las combinaciones de datos

Como se observa en la figura 4.8, exceptuando la configuración simple, en las combinaciones implementadas se aumenta el porcentaje de separabilidad cuando uno de los PZT presenta ruido, lo cual es un comportamiento inesperado, pero que mantiene un diagnóstico aceptable. Se observa que la combinación simple y empírica presenta falsos positivos, sin embargo las otras combinaciones no presentan falsos positivos en ningún momento, por lo tanto se puede definir que son combinaciones de datos mas robustas para el índice Hotelling T^2 .

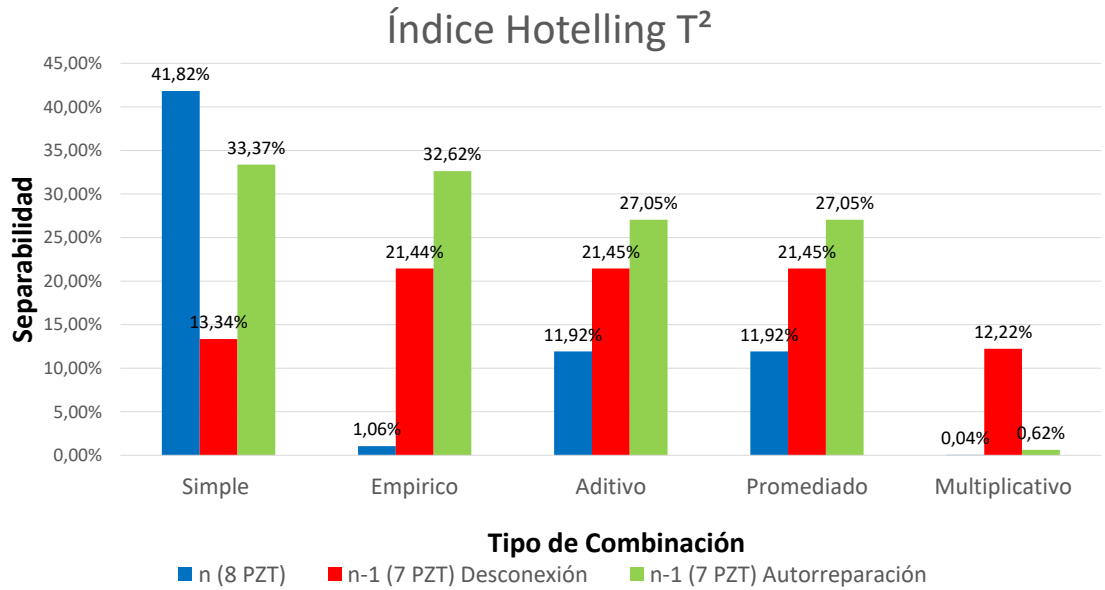


Figura 4.8: Resultados de la simulación con Ruido para cada una de las combinaciones de datos para el índice T^2

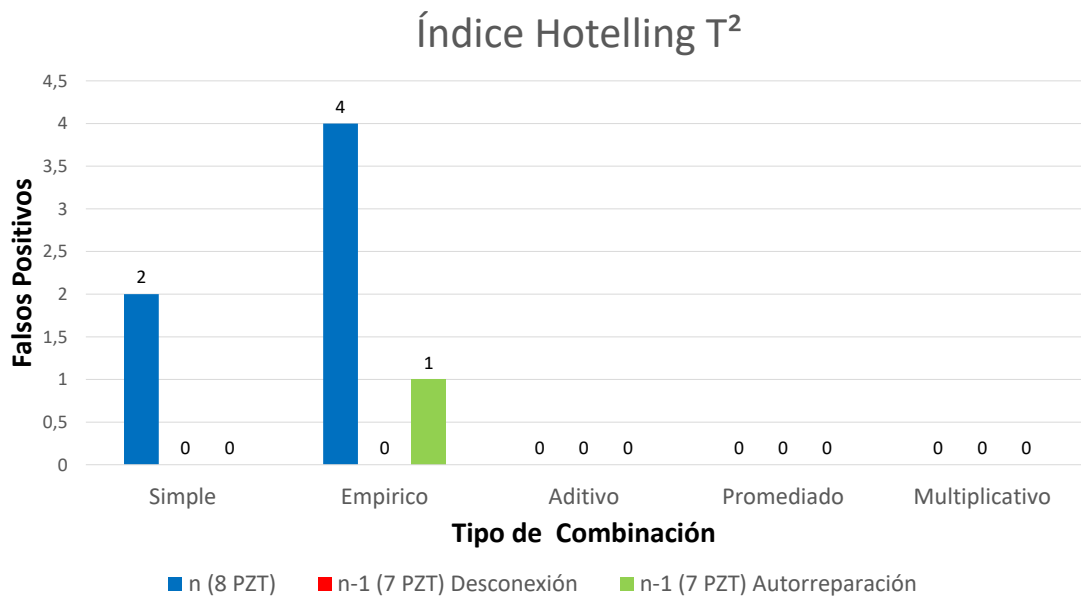


Figura 4.9: Falsos positivos cada una de las combinaciones de datos para el índice T^2

Por último se analizaron los resultados obtenidos para el índice Mahalanobis,

presentados en la figura 4.10, donde se observa que cuando se desconecta un sensor se tiene un comportamiento indeseado en la combinación empírica, debido a que se tiene una sensibilidad del 0 %, sin embargo este impase es solucionado al implementar el algoritmo de autorecuperación. Contrastado con el sistema en autorreparación, se observa que si bien el margen de separación disminuye en la combinación multiplicativa, para las demás combinaciones se mantiene relativamente estable, por lo que se puede concluir que este índice tiene un buen desempeño en el sistema autorreparado y es robusto ante el fallo de un PZT.

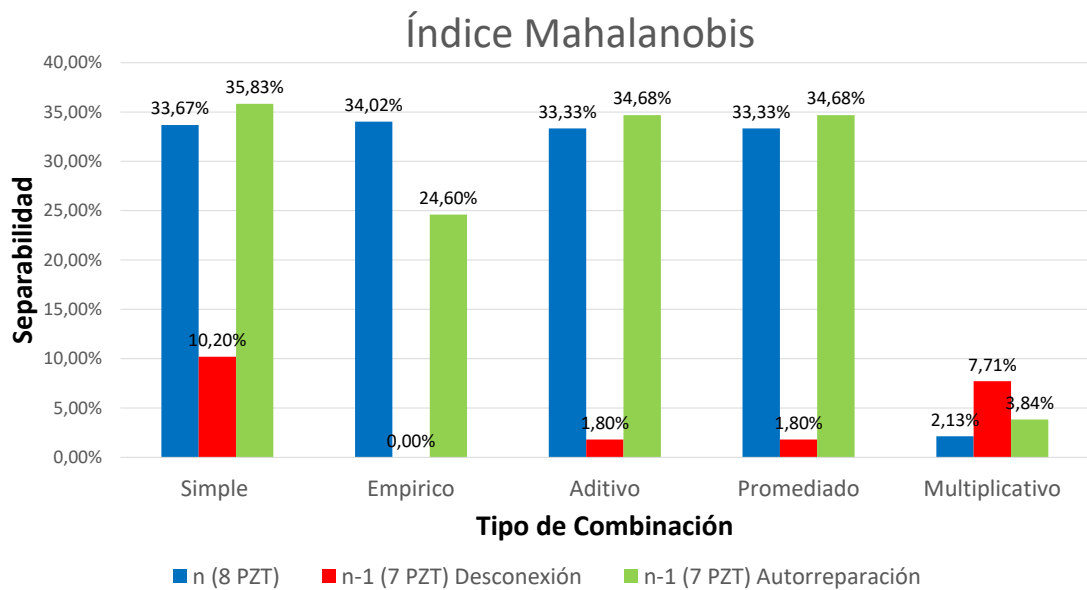


Figura 4.10: Resultados de la simulación con Ruido para cada una de las combinaciones de datos para el índice Mahalanobis

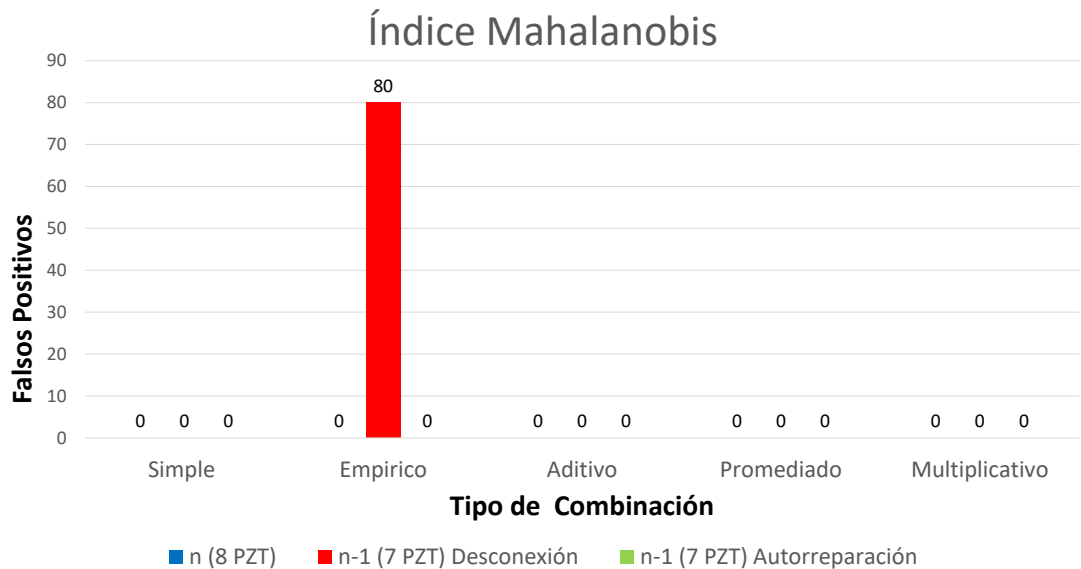


Figura 4.11: Falsos positivos cada una de las combinaciones de datos para el índice de distancias de Mahalanobis

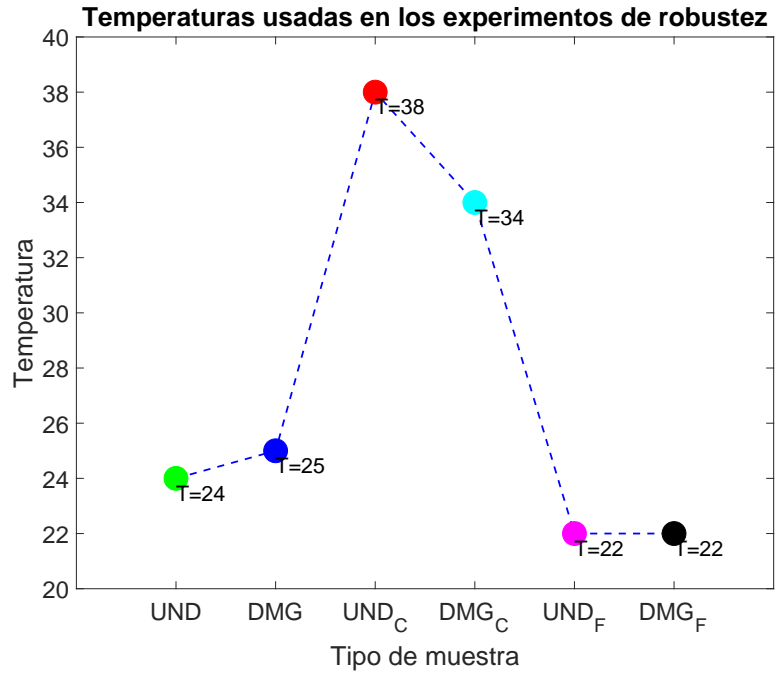
Del anterior análisis se infiere que los índices más robustos ante el fallo de uno y dos PZT, son el *Índice Q* y el *índice Mahalanobis* sólo cuando el algoritmo es modificado para eliminar los datos con ruido realizando el modelo de línea base con los PZT restantes.

4.3.2 ROBUSTEZ DEL SISTEMA FRENTE A CAMBIOS DE TEMPERATURA Si un sistema de piezoelectricos se enfrenta a cambios de temperatura, sus resultados van a variar notablemente, como se ha analizado en otros proyectos de grado [1], para esta investigación se sometió la geometría triangular a cambios de temperatura obteniendo los resultados de la figura 4.12, este análisis se implemento el índice Q promediado, debido a que presento muy buenos resultados en la estructura original (ver capítulo 4.1) .

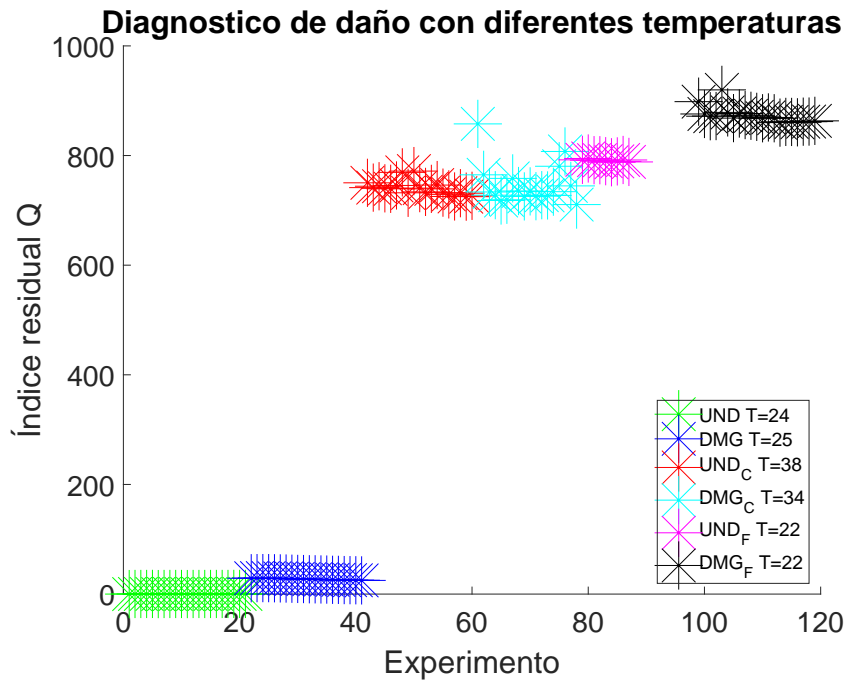
Como se puede ver en la figura 4.12a el sistema registró daños frente a distintos niveles entregando los resultados que se pueden encontrar en la figura 4.12b, como se puede notar inmediatamente el sistema por si solo no es robusto frente a cambios de temperatura, esto se debe a que el modelo de línea base se generó a una temperatura específica.

La figura 4.12b permite ver que a medida que la temperatura cambia los datos en operación continua, se ubica en distintos sectores de la gráfica, resultando que situaciones donde la estructura se encuentra sin daños se diagnostiquen como falsos positivos.

Una posible solución a este problema está en que el modelo de línea base sea actualizado continuamente bajo supervisión de un técnico, esto sucede debido a que como se pudo analizar en este proyecto el modelo de línea base no se ajusta correctamente al sistema a medida que pasa el tiempo, una explicación de esto puede ser que el sistema presenta microcambios imposibles de ver a simple vista.



(a) Niveles de temperatura usada



(b) Resultado de diagnostico frente a cambios de temperatura

Figura 4.12: Resultados del sistema frente a cambios de temperatura

CONCLUSIONES

1. Se comprueba que, al implementar métodos de multiactuación en un sistema de diagnosis usando piezoeléctricos, este se hace más robusto debido a que logra detectar de manera óptima los daños en la estructura, aún cuando se presentan desconexiones de los sensores o cambios suaves de temperatura. Esto se logra gracias a la combinación de la información que proviene de los sensores independientemente de su ubicación, porque los PZT aportan información de la estructura dependiendo de dónde se encuentran ubicados, tal como se verificó en los resultados del proyecto.
2. Al usar diferentes configuraciones geométricas, los resultados de cada índice de diagnóstico cambian, así como también los resultados de adquisición de daños debido a la ubicación de los PZT sobre la estructura y la combinación de datos aplicada. En el caso de la geometría cuadrada con combinación multiplicativa la sensibilidad fue del 100 % mientras que en la geometría cuadrada el mismo índice pero con combinación simple presento una sensibilidad del 48 %, demostrando los cambios que pueden ejercer la variación de estos parámetros.
3. Como resultado de los algoritmos de combinación de datos implementados, se concluye que la combinación de datos multiplicativa, es la mejor de las combinaciones analizadas porque reduce los falsos positivos permitiendo llevar un sistema de baja sensibilidad a una del 100 %. Por ejemplo, la geometría circular con índice T^2 , donde la sensibilidad pasa del 68 % en actuación simple al 100 % en combinación multiplicativa.

4. Se concluye que para el diagnóstico de datos la mejor configuración geométrica es la triangular, debido a que presenta la mejor separabilidad de sus datos (hasta 50 % de separabilidad) y una alta sensibilidad (100 % de sensibilidad para todas las combinaciones). Además, esta geometría es más robusta frente a daños de sensores, como se comprobó, el desempeño del sistema sigue siendo estable aún cuando uno de los sensores se desconecta.

5. Por medio del análisis de contingencia se encuentra que, un sistema de detección basado en actuación sencilla, es altamente sensible a desconexiones de los sensores dando como resultado diagnósticos erróneos. Gracias a los principios de multiactuación y la combinación de datos se encuentra que el índice de Mahalanobis y el índice estadístico Q, siguen realizando un diagnóstico aceptable a pesar de que alguno de los sensores falla. Se debe prescindir del uso de la combinación simple y la combinación empírica para evitar falsos positivos.

6. El sistema es altamente sensible a los cambios de temperatura. Como se pudo ver en los resultados, las variaciones de temperatura fuertes representaron falsos diagnósticos, por lo tanto, se concluye que si el sistema se encuentra frente a cambios constantes de temperatura, este presentará diagnósticos erróneos. En las pruebas se encontró que un cambio de 10° da como resultado diagnósticos erróneos para todas las pruebas realizadas.

7. Finalmente, como resultado experimental del desempeño se identifica que el sistema es en términos de eficiencia igual para las diferentes geometrías analizadas, sin embargo, la robustez del sistema varía en función de la geometría implementada, la combinación de datos usada y el índice con el que se analizan los datos. Una buena elección de estos parámetros permitirá detectar correctamente los daños en una estructura. Como resultado de este proyecto se concluye que la geometría triangular con combinación de datos multiplicativa e índice de Mahalanobis permitirá realizar un diagnóstico correcto para estructuras laminares bajo condiciones ambientales constantes. Si las condiciones ambientales se mantienen constantes o sin cambios bruscos, se puede usar el algoritmo adaptado para análisis de sistemas en operación continua.

RECOMENDACIONES

1. Esta investigación fue realizada en condiciones ideales de laboratorio, por lo que se sugiere estudiar el efecto de los cambios de temperatura y humedad en condiciones ambientales no controladas. Por otro lado, futuras investigaciones podrían evaluar la habilidad del sistema de diferenciar el tipo de daño, además de calcular la mínima distancia de ubicación entre los piezoeléctricos
2. Como se encontró en este proyecto un sistema que logre detectar daños en los PZT proveerá un modelo robusto frente a desconexiones de los piezoelectricos, por lo tanto se propone diseñar un sistema con estas características que pueda ser probado en condiciones no controladas de laboratorio.
3. Se puede ver que el sistema es altamente sensible a cambios de temperatura, se recomienda que el sistema debe actualizar su modelo de línea base constantemente de modo que pueda estar preparado para diagnosticar correctamente frente a cambios en la estructura. Se sugiere también extender el estudio a otro tipo de estructuras para de esta manera, contribuir a mejorar la seguridad en más áreas.
4. La monitorización de salud estructural (SHM) se organiza en cuatro niveles, en este proyecto se estudió el primero, el cual consiste en determinar la presencia de daños en una estructura, entonces se sugiere explorar los otros niveles donde se considera la localización del daño, la cuantificación de la intensidad y la vida útil de la estructura.
5. Finalmente, un método de autorecuperación donde el mismo sistema sea capaz

de determinar cuando un sensor se daña y eliminarlo del análisis dará como resultado un diagnóstico correcto aun en presencia de ruido en el sistema.

Bibliografía

- [1] ADOLFO, G., BELTRÁN, M., AND NAVARRO, J. C. Detección y clasificación de defectos en estructuras tipo tubería mediante reconocimiento de patrones.
- [2] ASSIS, F. D., BARBOSA, A., TAKIY, A. E., HIGUTI, R. T., CARBONARI, R. C., KITANO, C., CARLOS, E., AND SILVA, N. Coupling Rate Measurement of a Novel Multi- Actuated Piezoelectric Device Using Optical Interferometry.
- [3] BY DIEGO ALEXANDER TIBADUIZA BURGOS, AND RODELLAR BENEDÉ LUIS EDUARDO MUJICA, J. DESIGN AND VALIDATION OF A STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM FOR AERONAUTICAL STRUCTURES.
- [4] CANDELA, A., AND GÓMEZ, L. Transductor piezoeléctrico de nanocristales de ZnO sobre substrato flexible para su integración en edificios. 34–37.
- [5] CARBONARI, R. C., SILVA, E. C. N., AND PAULINO, G. H. Multi-actuated functionally graded piezoelectric micro-tools design using topology optimization - art. no. 616609. *Smart Structures and Materials 2006: Modeling, Signal Processing, and Control 6166*, 11 (2006), 16609.
- [6] CHEN, Q., KRUGER, U., MERONK, M., AND LEUNG, A. Y. T. Synthesis of T2 and Q statistics for process monitoring. *Control Engineering Practice 12*, 6 (2004), 745–755.
- [7] COLINA, L. C. El Análisis De Componentes Principales. *Papers 37* (1991), 31–63.
- [8] FAZIA, R., TAOUALI, O., ELAISSI, I., AND BOUGUILA, N. Online Fault Detection Methods and Fault Detection Indices Based on PCA Approach. *Recent Researches in Electrical Engineering* (2014), 69–78.

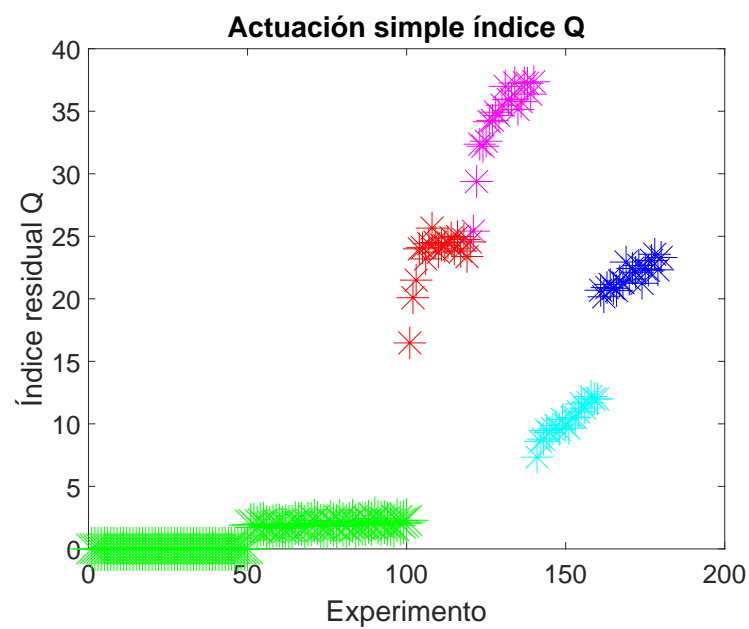
- [9] J., M. A., AND N., D. P. DETECCIÓN Y AISLAMIENTO ROBUSTO DE FALLAS MEDIANTE OBSERVADORES CON ENTRADAS DESCONOCIDAS. *Sensors (Peterborough, NH)* (2009), 209–217.
- [10] JACKSON, J. E. PCA with more than two variables. *User's Guide to Principal Component Analysis* (1991), 26–62.
- [11] JAFFEL, I., TAOUALI, O., HARKAT, M. F., AND MESSAOUD, H. A fault detection index using principal component analysis and mahalanobis distance. *IFAC-PapersOnLine* 28, 21 (2015), 1397–1401.
- [12] LAHDHIRI, H., TAOUALI, O., ELAISSI, I., JAFFEL, I., HARAKAT, M. F., AND MESSAOUD, H. A new fault detection index based on Mahalanobis distance and kernel method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2017).
- [13] MAESSCHALCK, R. D., AND MASSART, D. L. The Mahalanobis distance.
- [14] MARULANDA C., J., THOMSON, P., AND MARULANDA A., J. Monitoreo De Salud Estructural. *Ingeniería y Competitividad* 2, 2 (2000), 40–46.
- [15] MUJICA, L., D.A.TIBADUIZA, AND RODELLAR, J. DATA-DRIVEN MULTIACTUATOR PIEZOELECTRIC SYSTEM FOR STRUCTURAL DAMAGE LOCALIZATION.
- [16] MULLER, A., ROBERTSON-WELSH, B., GAYDECKI, P., GRESIL, M., AND SOUTIS, C. Structural Health Monitoring Using Lamb Wave Reflections and Total Focusing Method for Image Reconstruction. *Applied Composite Materials* 24, 2 (2017), 553–573.
- [17] PONCE MUÑOZ, P. Sistemas robustos. *Revista Marina* (2012), 570–587.
- [18] RYTTER, A. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*. PhD thesis, Denmark, 1993. Ph.D.-Thesis defended publicly at the University of Aalborg, April 20, 1993 PDF for print: 206 pp.
- [19] SHIH, H.-R., WALTERS, W. L., ZHENG, W., AND EVERETT, J. Course Modules on Structural Health Monitoring with Smart Materials. *The Journal of Technology Studies*.

- [20] VÉLEZ, JOSÉ; FRANCO, C. M. Criterios de robustez para sistemas lineales. 1–9.
- [21] VILLARROEL, L., ALVAREZ, J., AND MALDONADO, D. Aplicación del Análisis de Componentes Principales en el Desarrollo de Productos. *Acta Nova* 2, 3 (2003), 399–408.
- [22] WESTERHUIS, J. A., GURDEN, S. P., AND SMILDE, A. K. Standardized q-statistic for improved sensitivity in the monitoring of residuals in mspc. *Journal of Chemometrics* 14, 4 (2000), 335–349.
- [23] WURITI, G. STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF ALUMINUM PLATE USING ACOUSTIC SENSORS.
- [24] ÉRIC PINET, HAMEL, C., GLIŠIĆ, B., INAUDI, D., AND MIRON, N. Health monitoring with optical fiber sensors: from human body to civil structures. *Proc.SPIE 6532* (2007), 6532 – 6532 – 12.

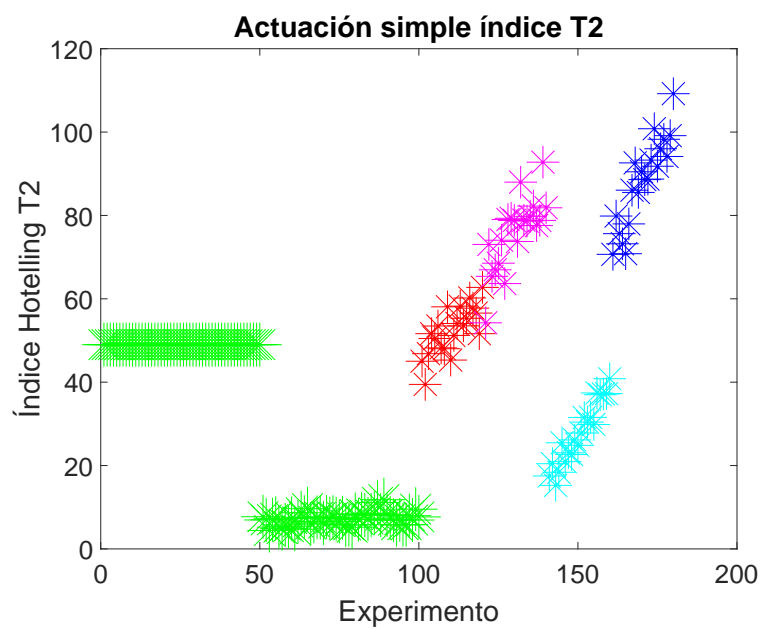
ANEXOS

Anexo A: Gráficas de índices

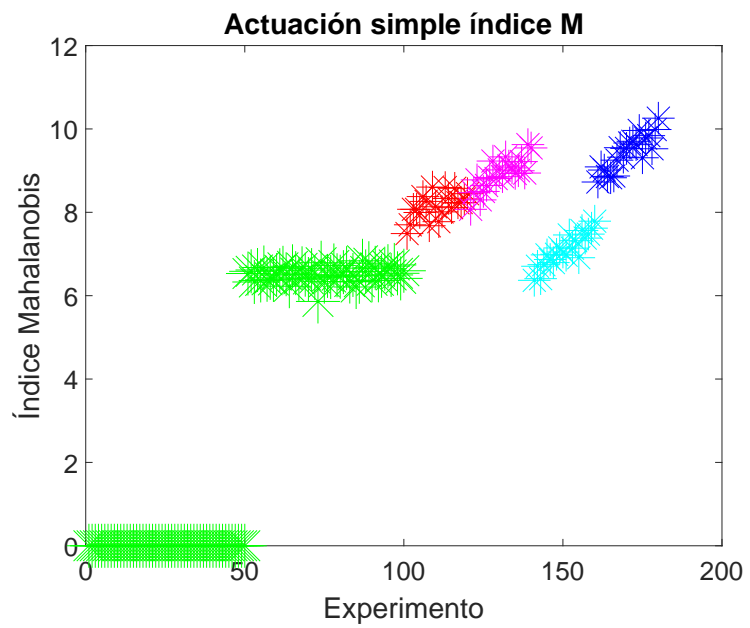
Anexo A1: Combinaciones en geometría circular



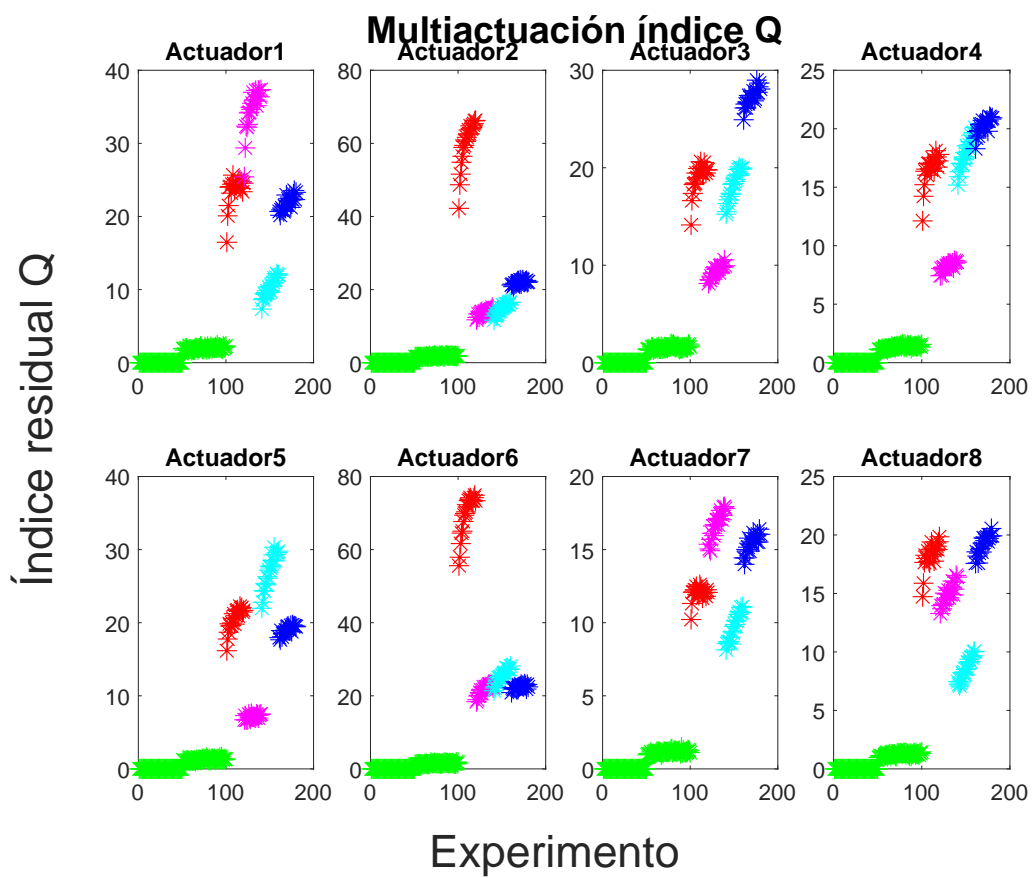
Anexo A1.1 : Índice residual Q implementado en configuración circular con actuación simple



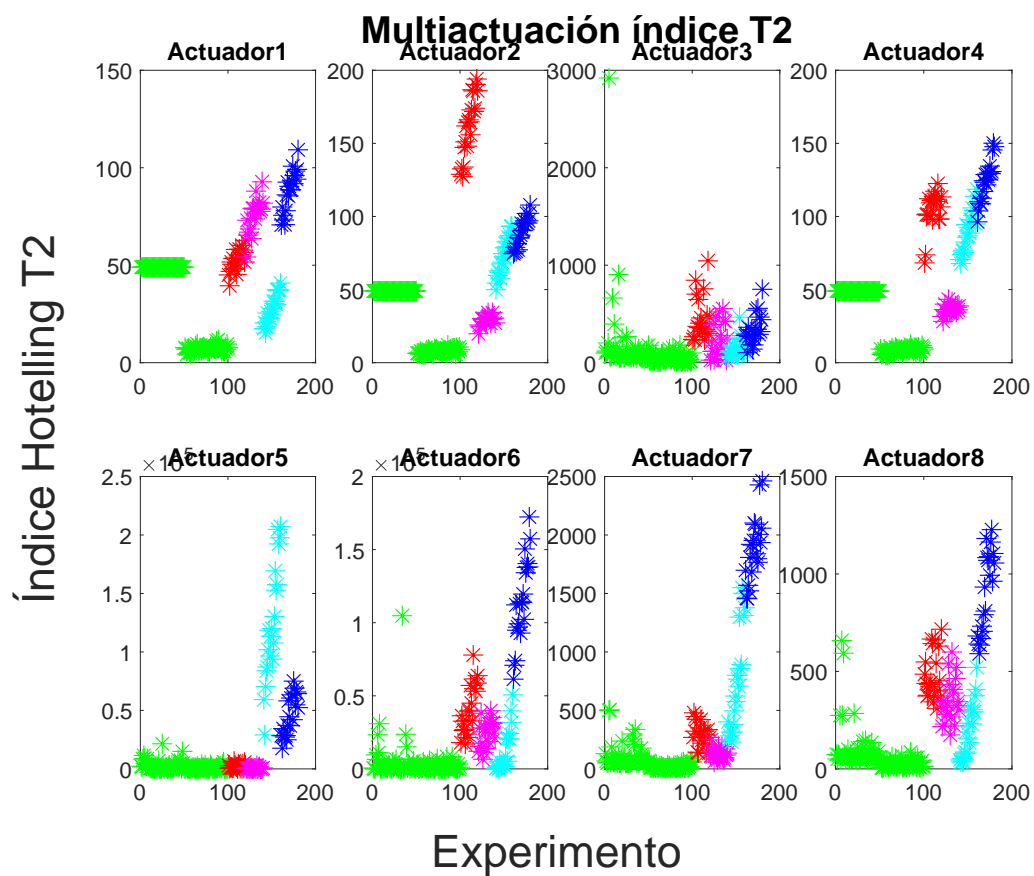
Anexo A1.2 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con actuación simple



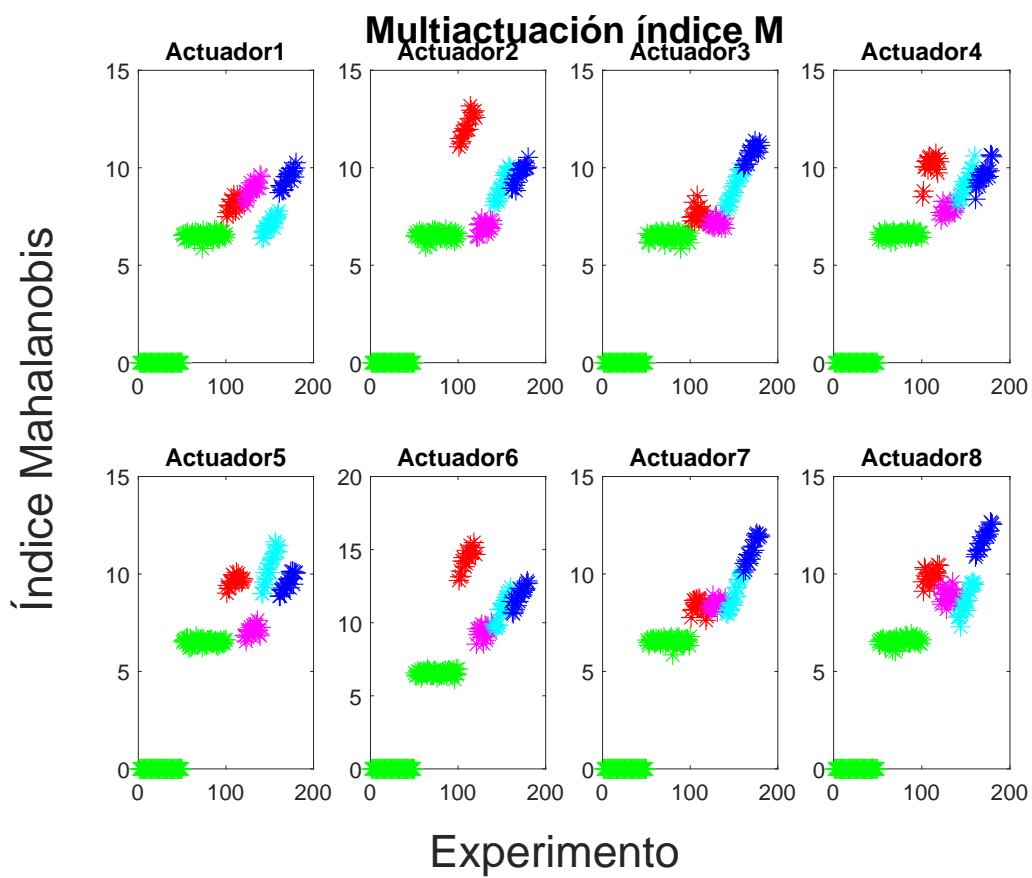
Anexo A1.3 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con actuación simple



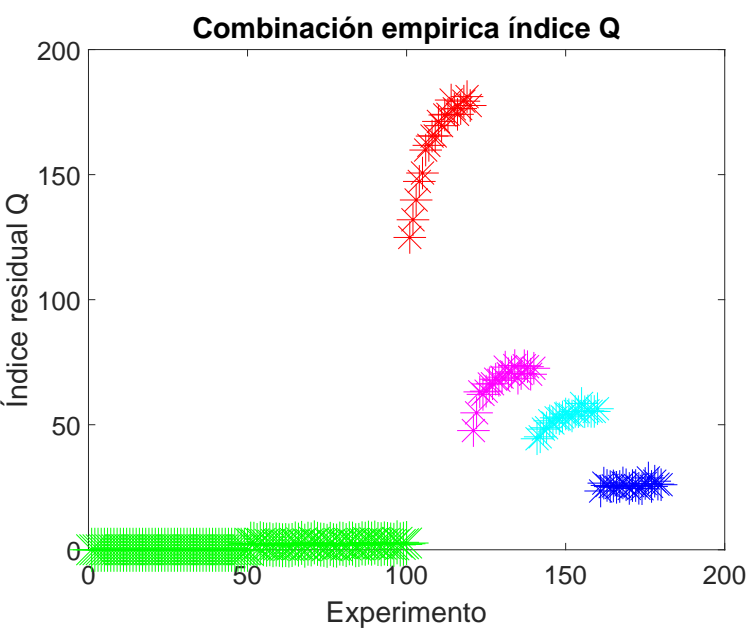
Anexo A1.4 : Implementación de índices residual Q para una configuración circular implementando métodos de multiactuación.



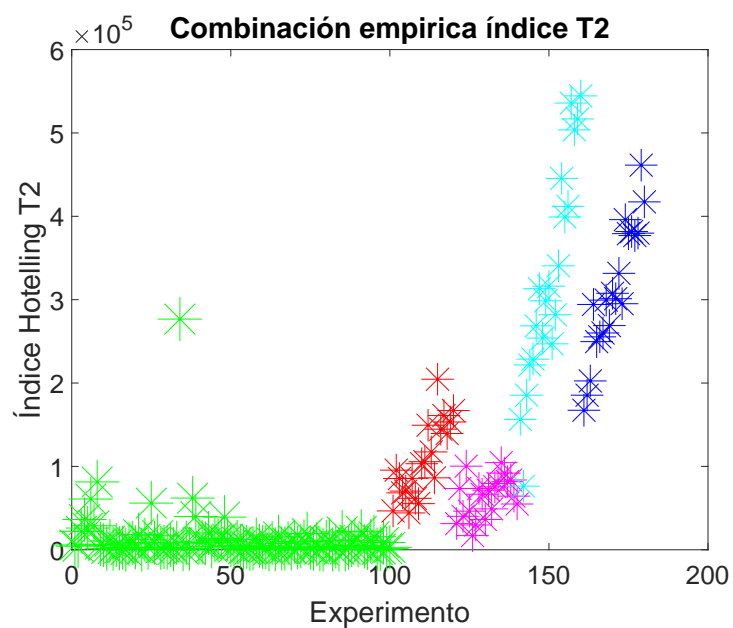
Anexo A1.5 : Implementación de índices Hotelling T^2 para una configuración circular implementando métodos de multiactuación.



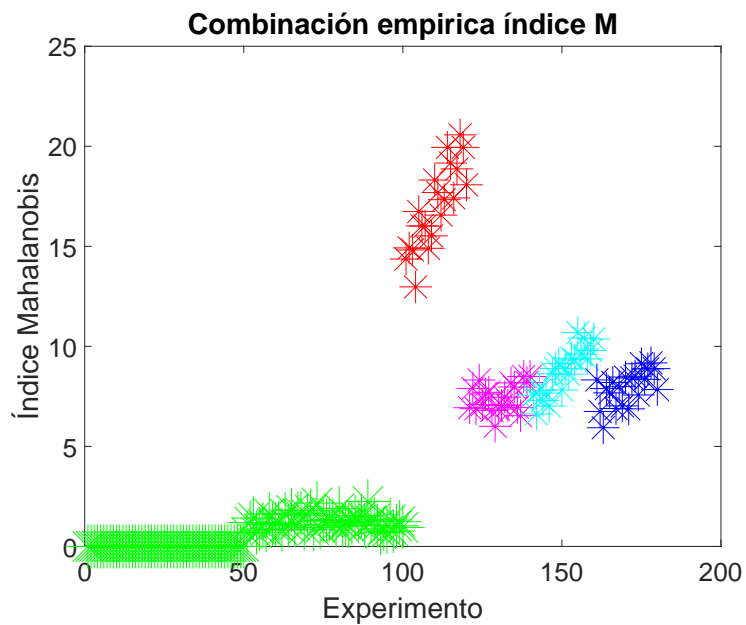
Anexo A1.6 : Implementación de índices de distancias de Mahalanobis para una configuración circular implementando métodos de multiactuación.



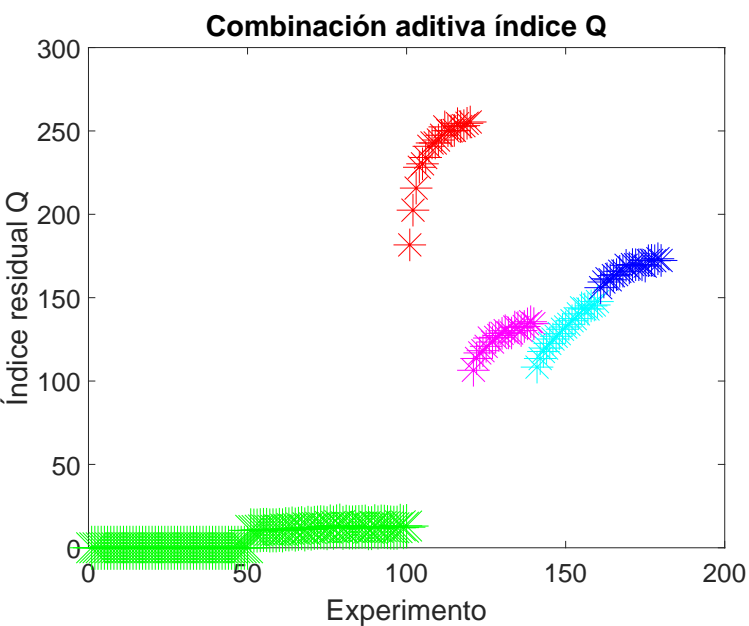
Anexo A1.7 : Índice residual Q implementado en configuración circular con combinación empírica



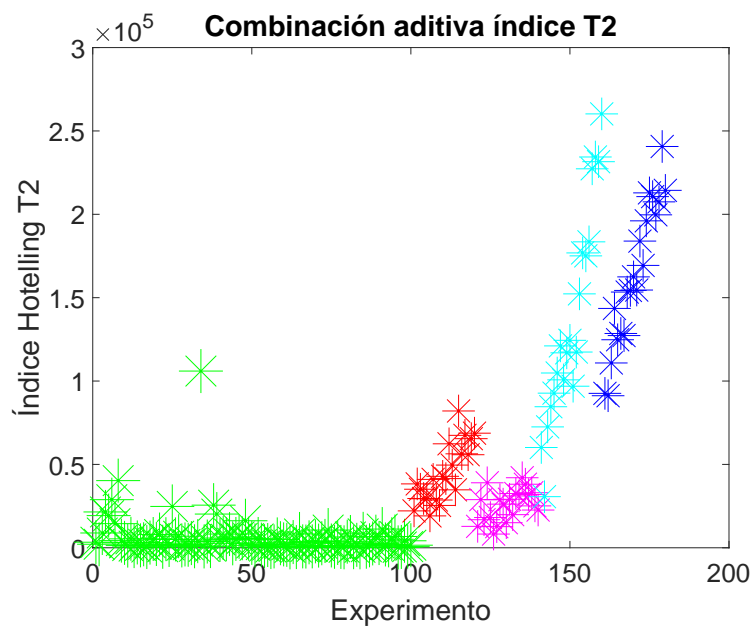
Anexo A1.8 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con combinación empírica



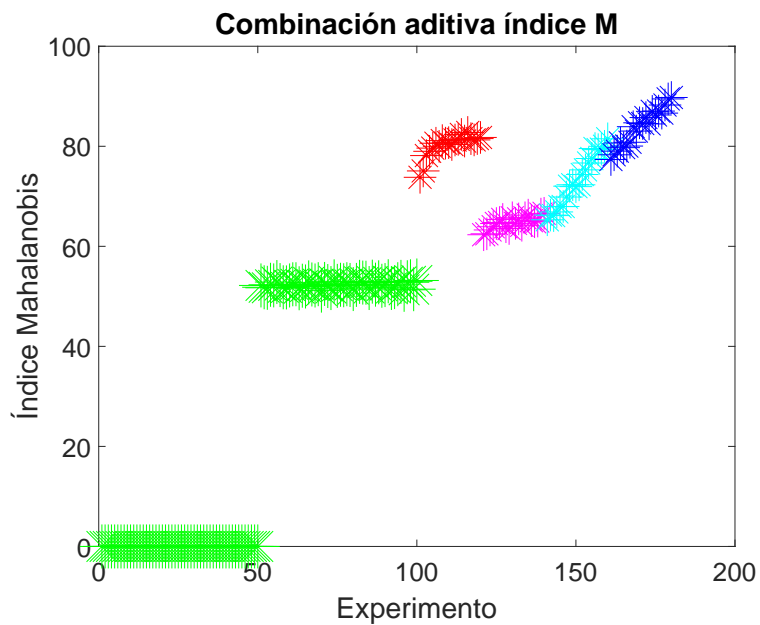
Anexo A1.9 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con combinación empírica



Anexo A1.10 : Índice residual Q implementado en configuración circular con combinación aditiva

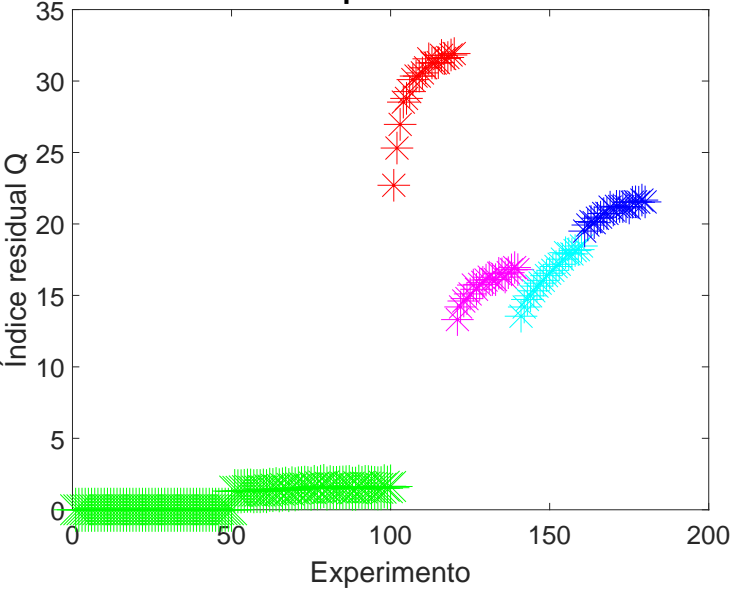


Anexo A1.11 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con combinación aditiva



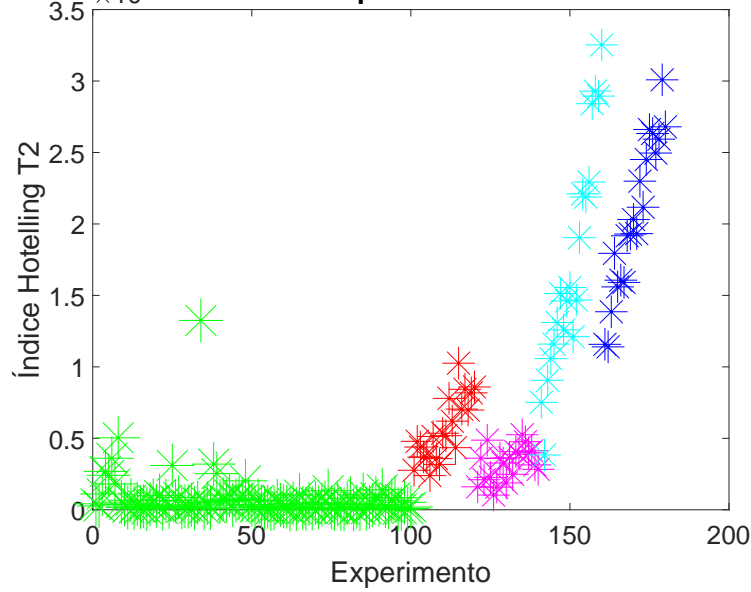
Anexo A1.12 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con combinación aditiva

Combinación promediado índice Q



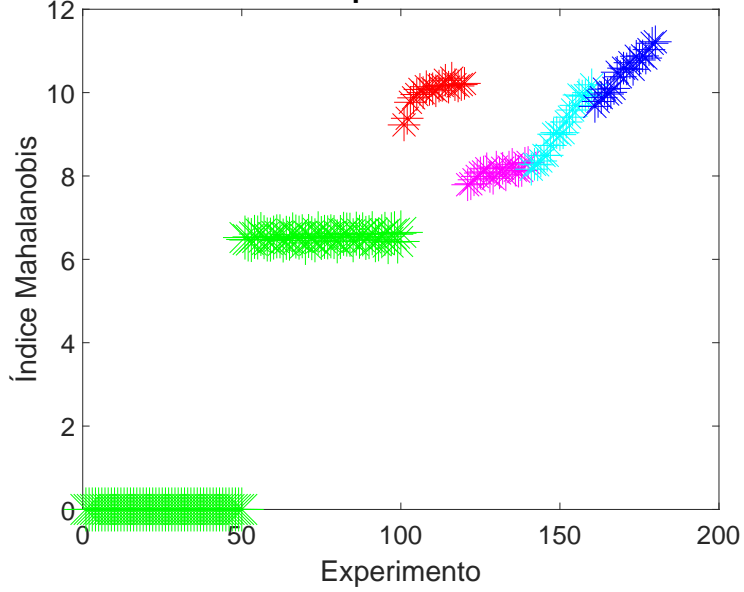
Anexo A1.13 : Índice residual Q implementado en configuración circular con combinación promedio

Combinación promediado índice T2

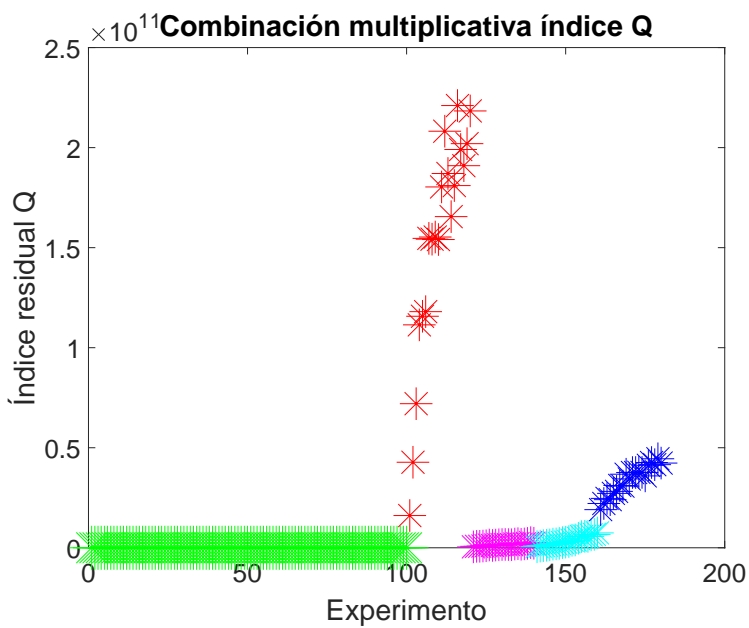


Anexo A1.14 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con combinación promedio

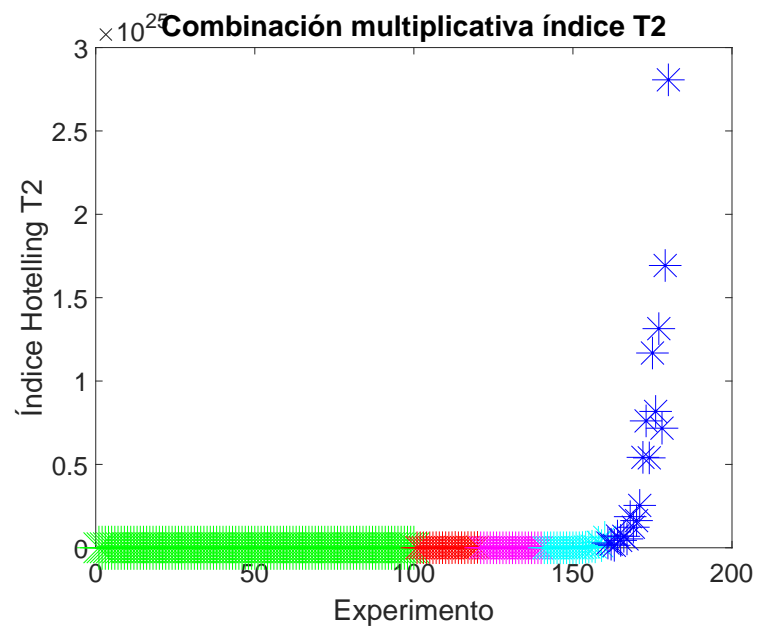
Combinación promediado índice M



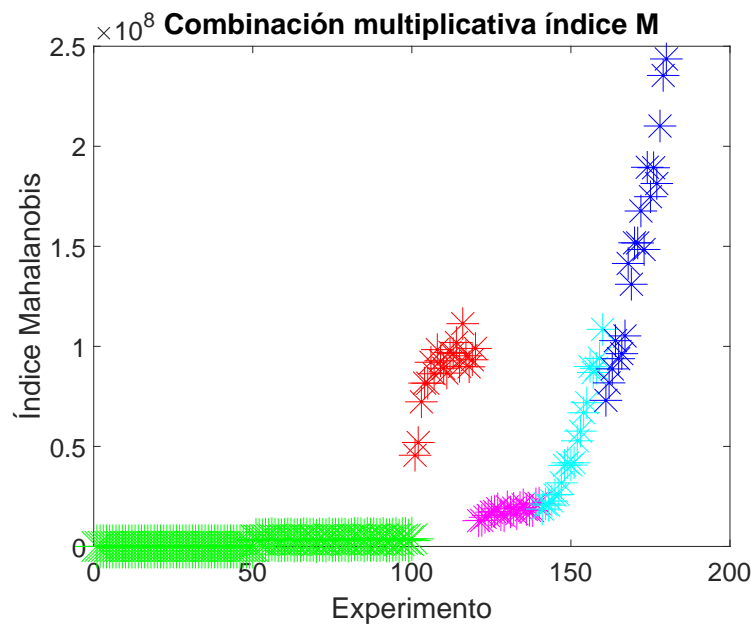
Anexo A1.15 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con combinación promedio



Anexo A1.16 : Índice residual Q implementado en configuración circular con combinación multiplicativa

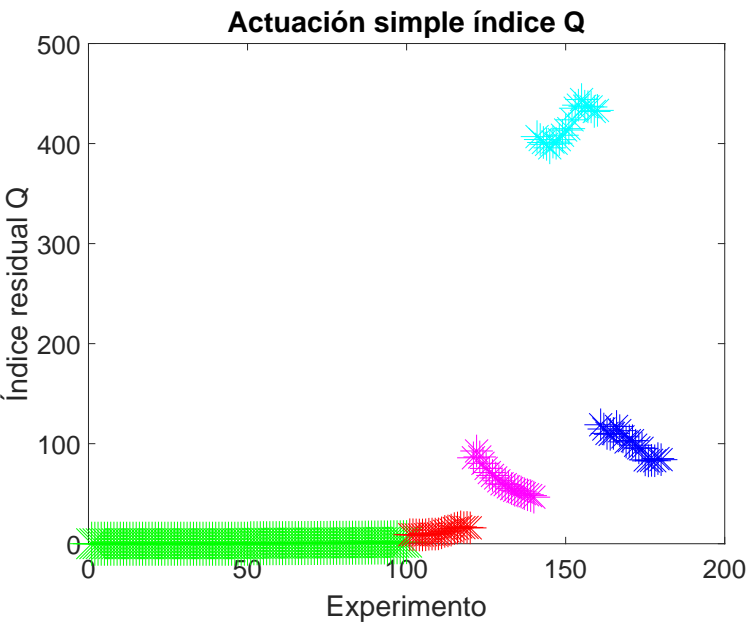


Anexo A1.17 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración circular con combinación multiplicativa

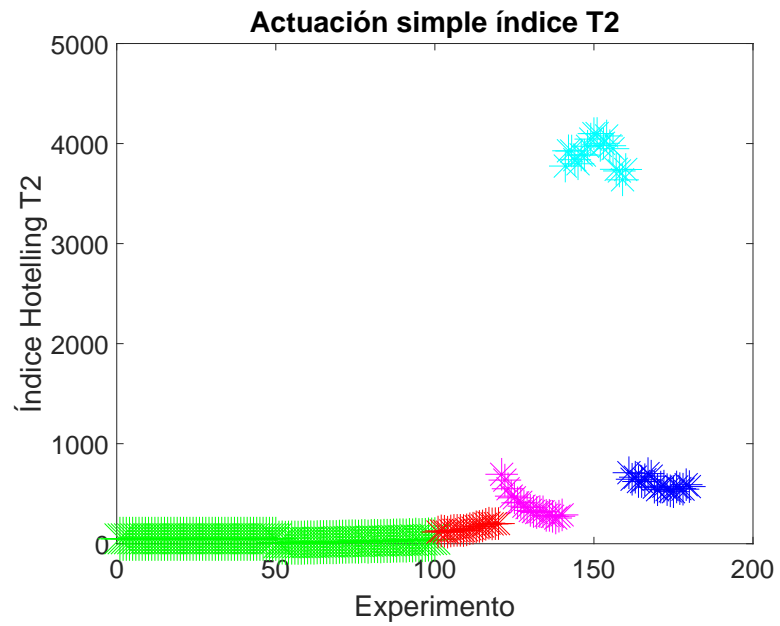


Anexo A1.18 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración circular con combinación multiplicativa

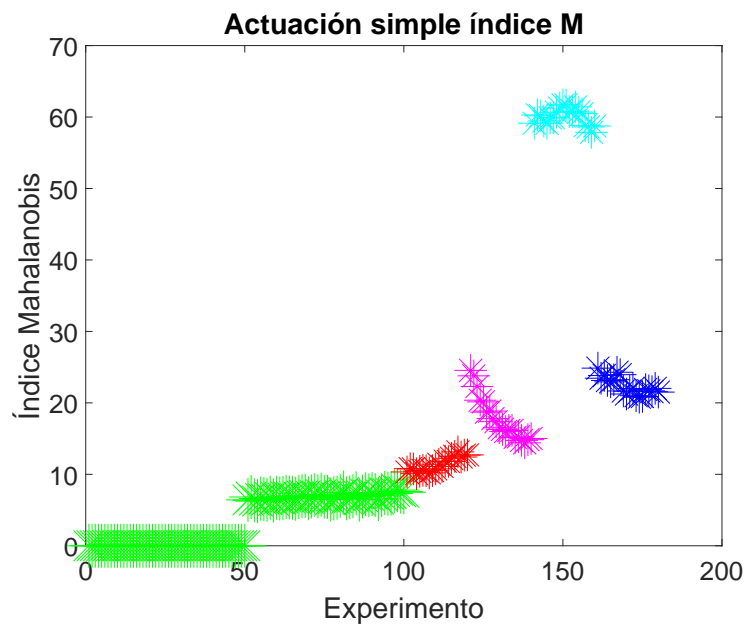
Anexo A2: Combinaciones en geometría cuadrada



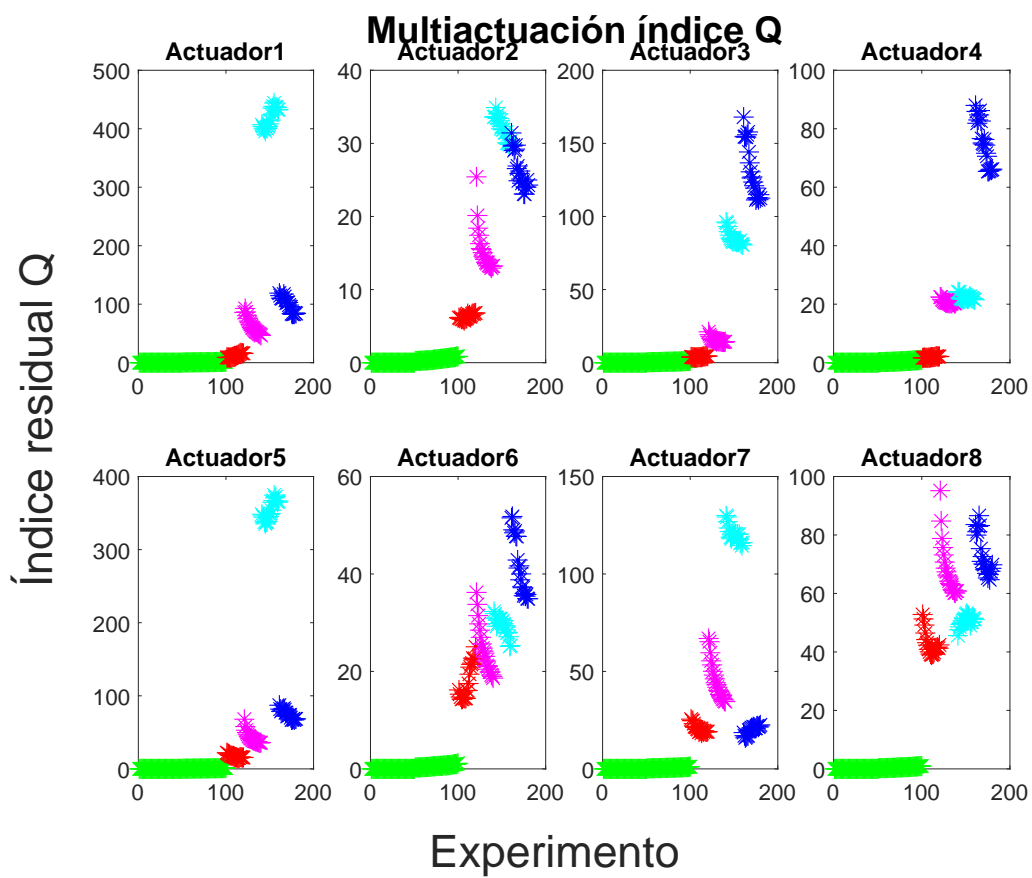
Anexo A2.1 : Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con actuación simple



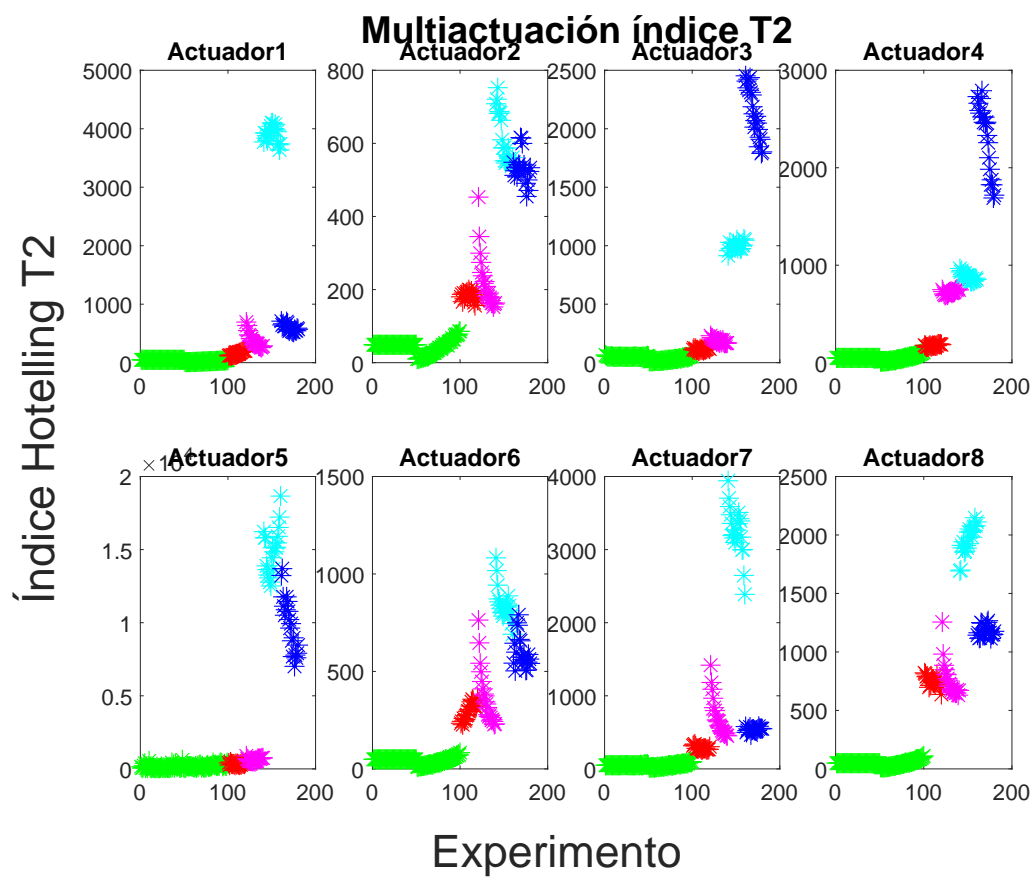
Anexo A2.2 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con actuación simple



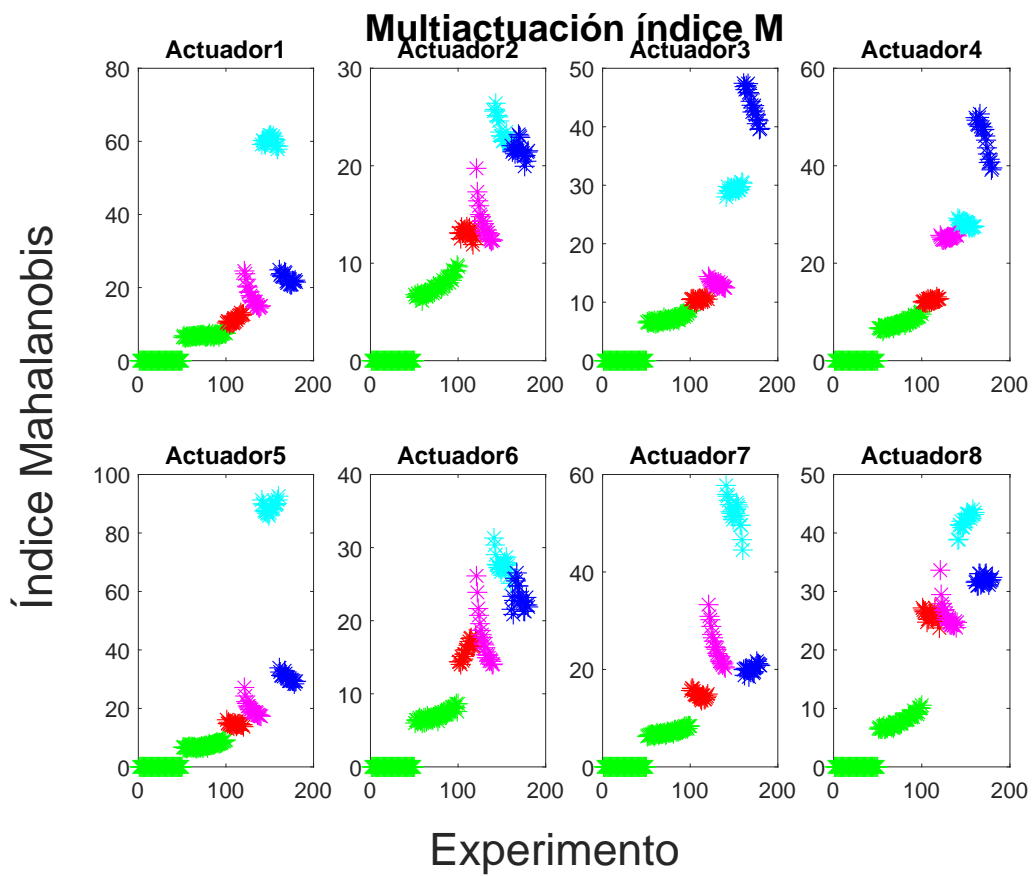
Anexo A2.3 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con actuación simple



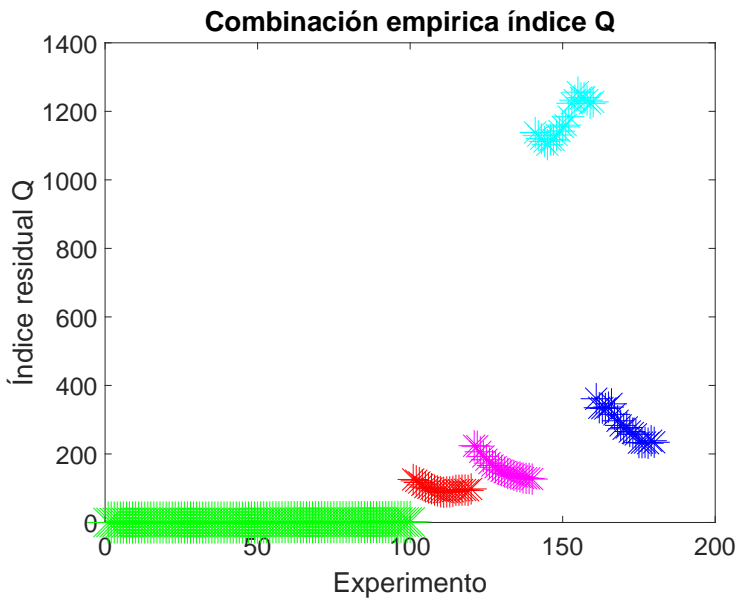
Anexo A2.4 : Implementación de índices residual Q para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación.



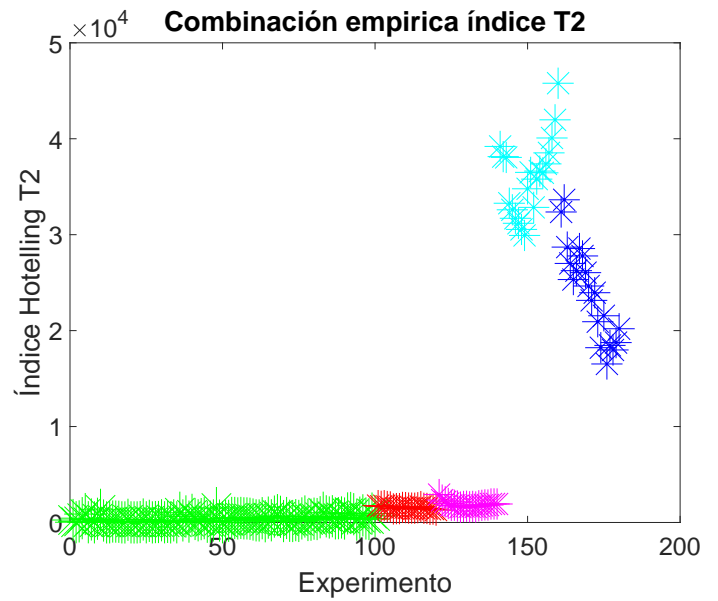
Anexo A2.5 : Implementación de índices Hotelling T^2 para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación.



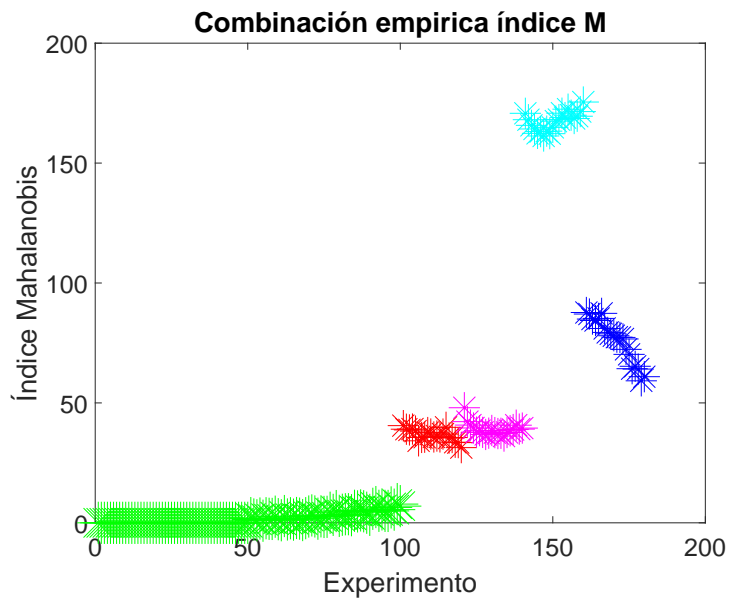
Anexo A2.6 : Implementación de índices de distancias de Mahalanobis para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación.



Anexo A2.7 : Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con combinación empírica

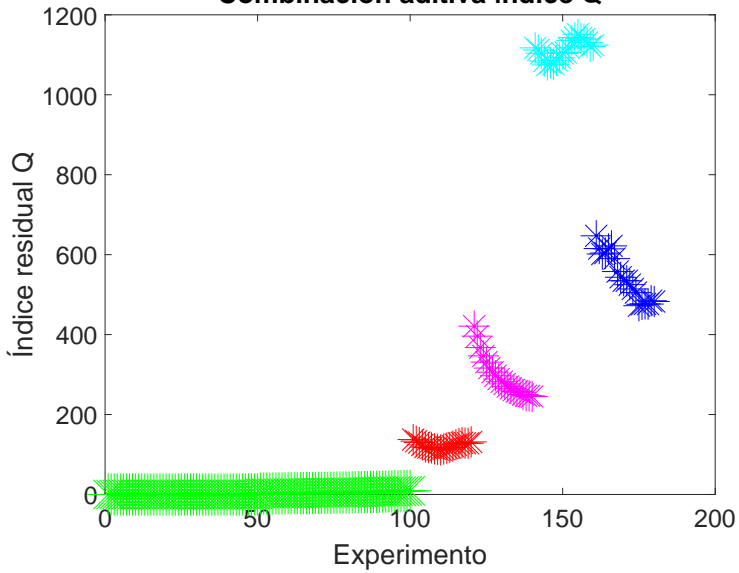


Anexo A2.8 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con combinación empírica



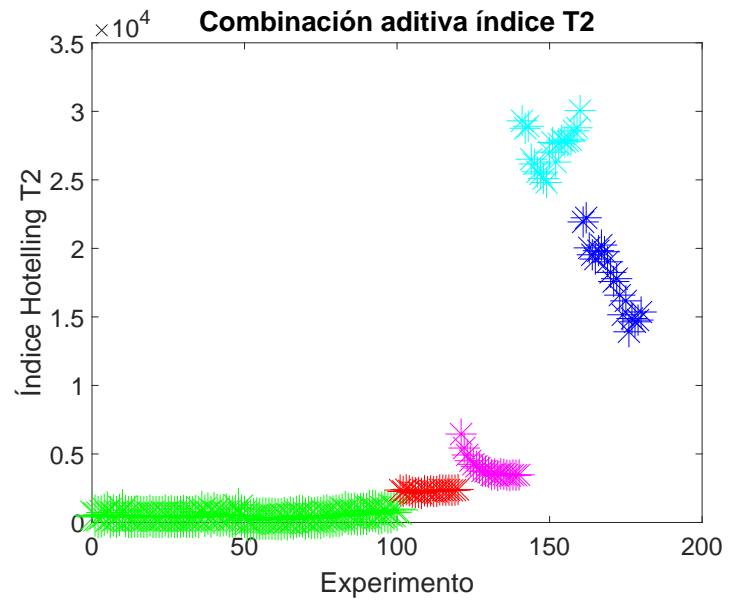
Anexo A2.9 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con combinación empírica

Combinación aditiva índice Q



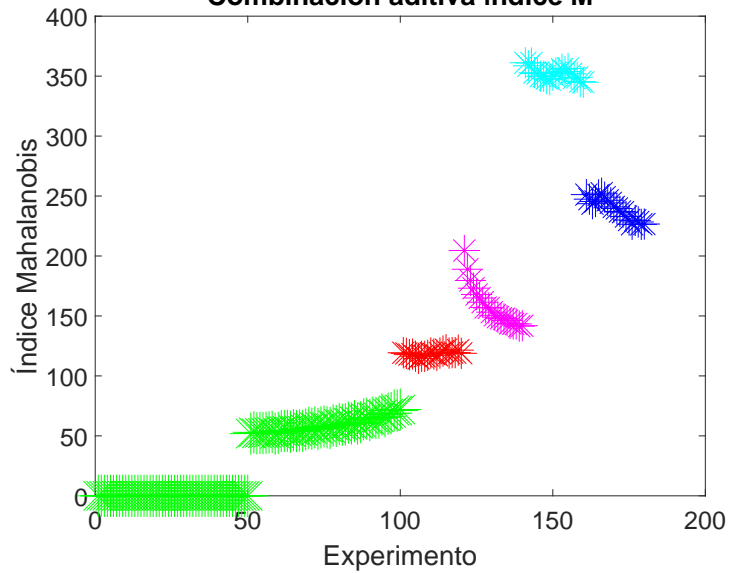
Anexo A2.10 : Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con combinación aditiva

Combinación aditiva índice T2



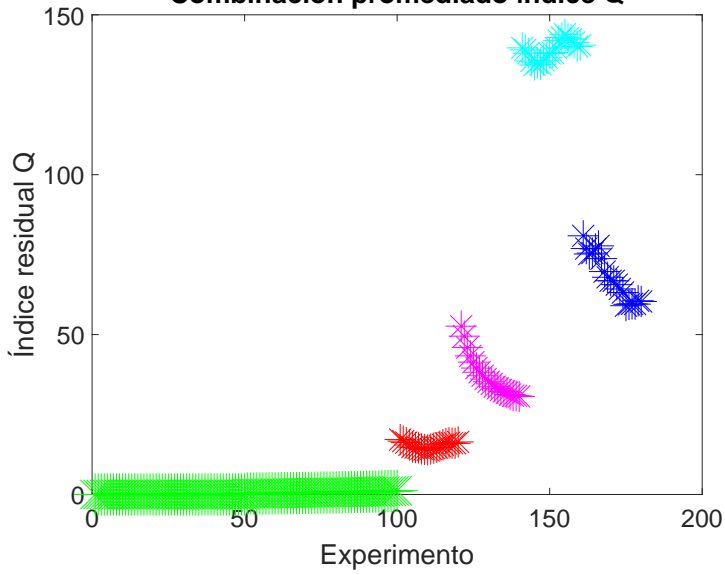
Anexo A2.11 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con combinación aditiva

Combinación aditiva índice M



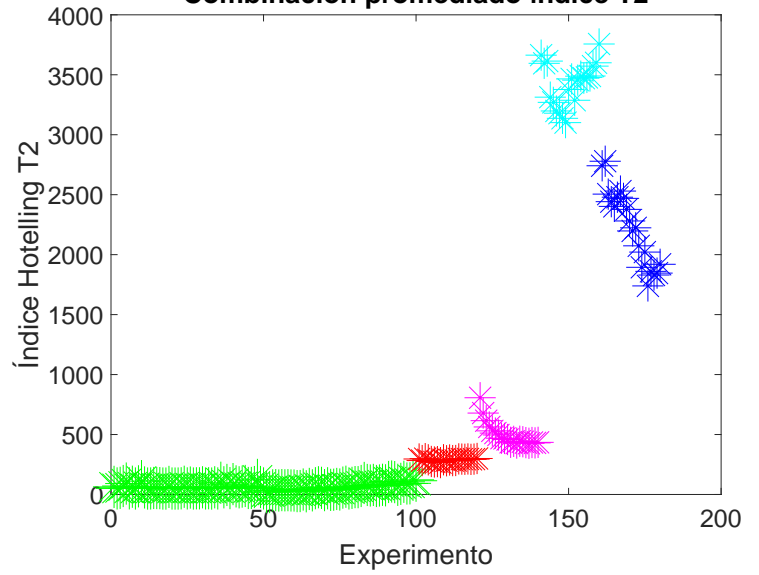
Anexo A2.12 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con combinación aditiva

Combinación promediado índice Q



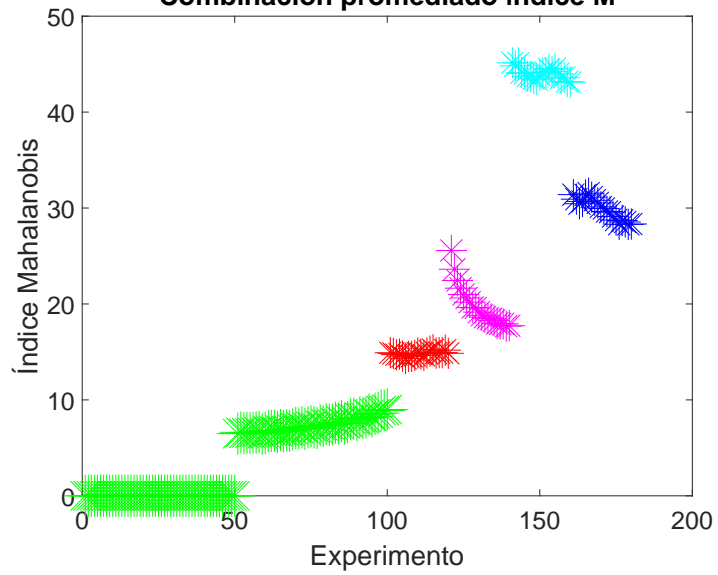
Anexo A2.13 : Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con combinación promedio

Combinación promediado índice T2

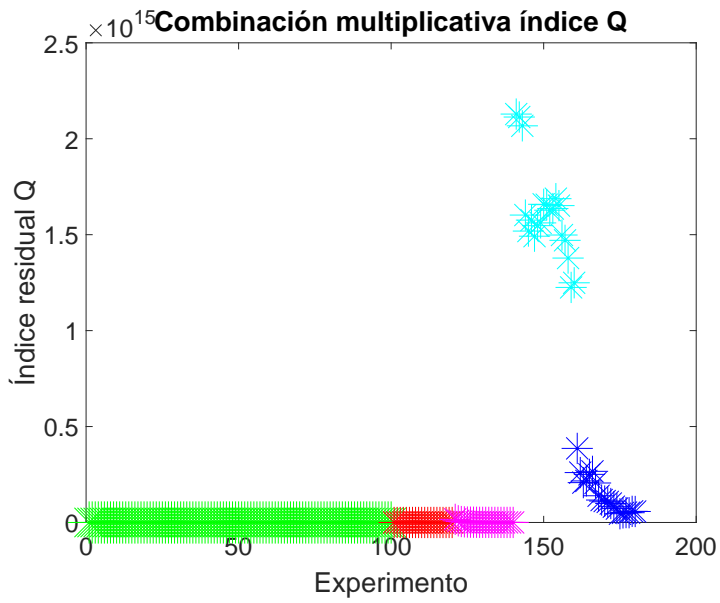


Anexo A2.14 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con combinación promedio

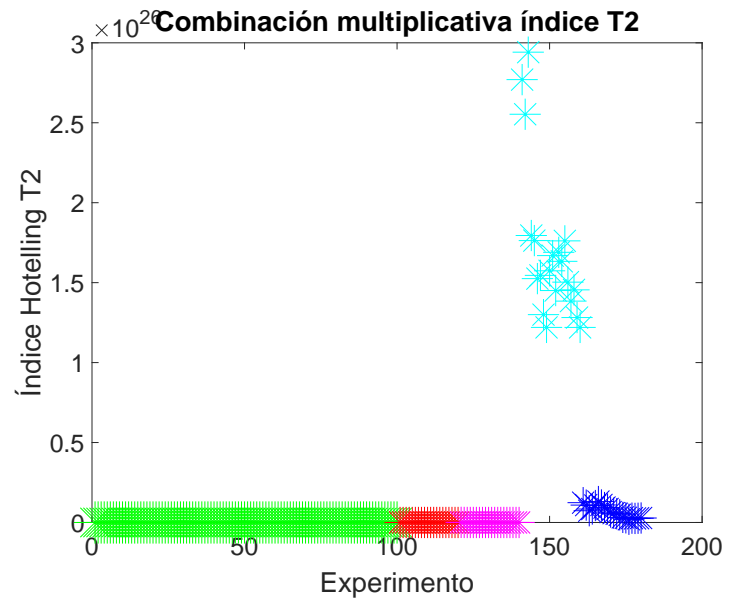
Combinación promediado índice M



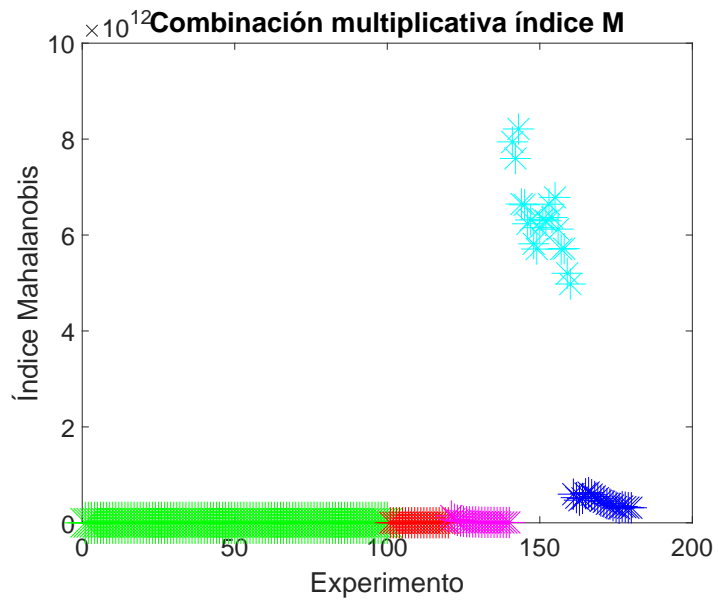
Anexo A2.15 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con combinación promedio



Anexo A2.16 : Índice residual Q implementado en configuración cuadrada con combinación multiplicativa

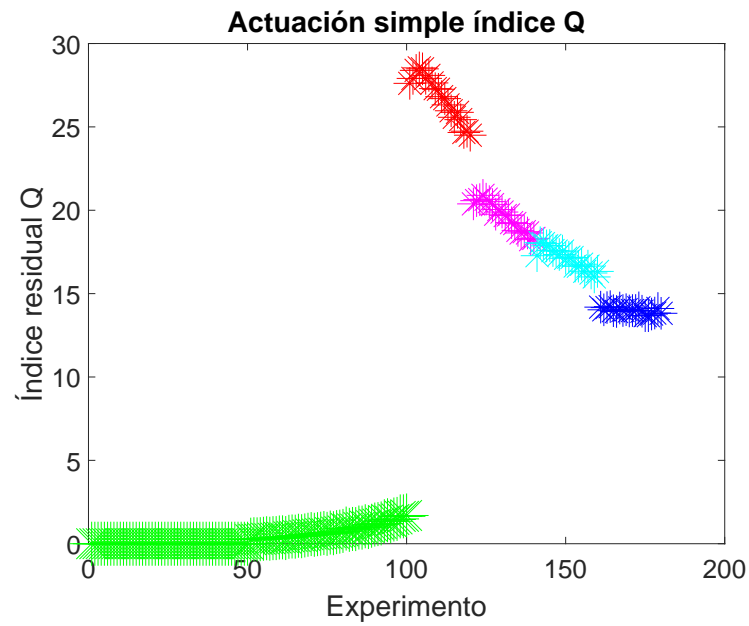


Anexo A2.17 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración cuadrada con combinación multiplicativa

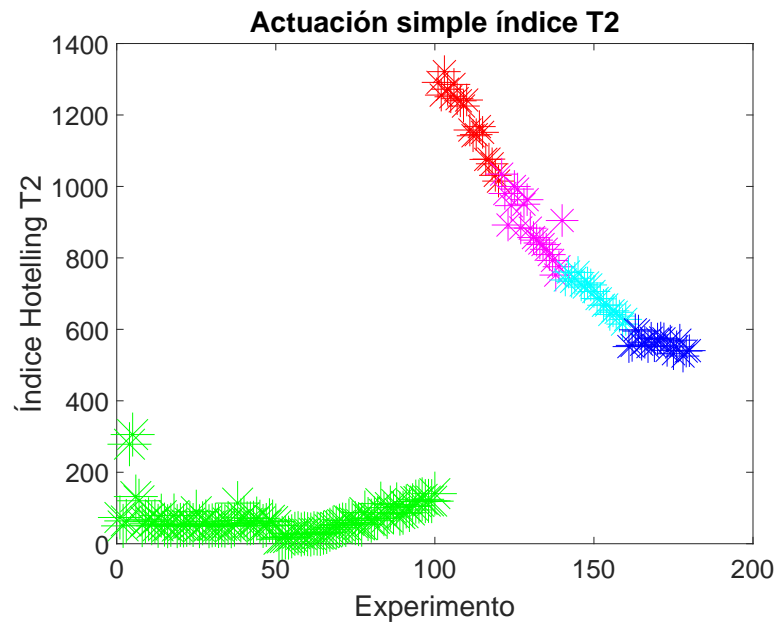


Anexo A2.18 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración cuadrada con combinación multiplicativa

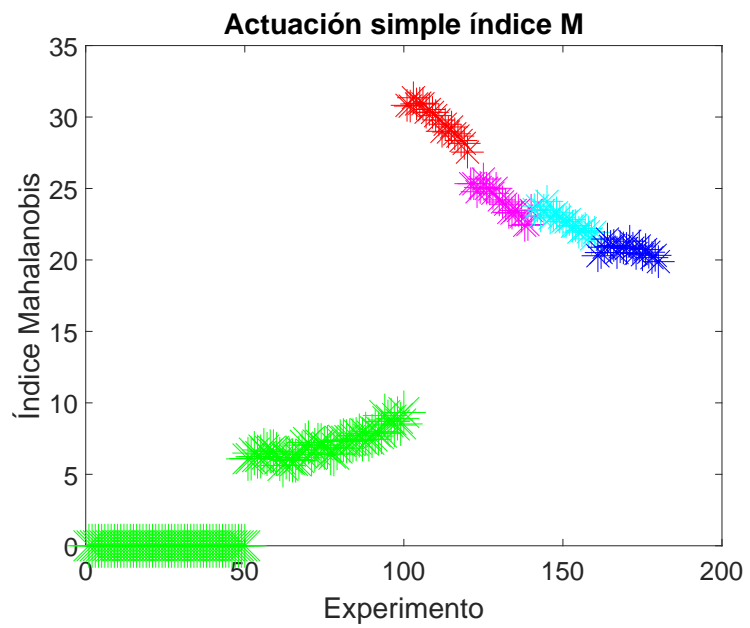
Anexo A3: Combinaciones en geometría triangular



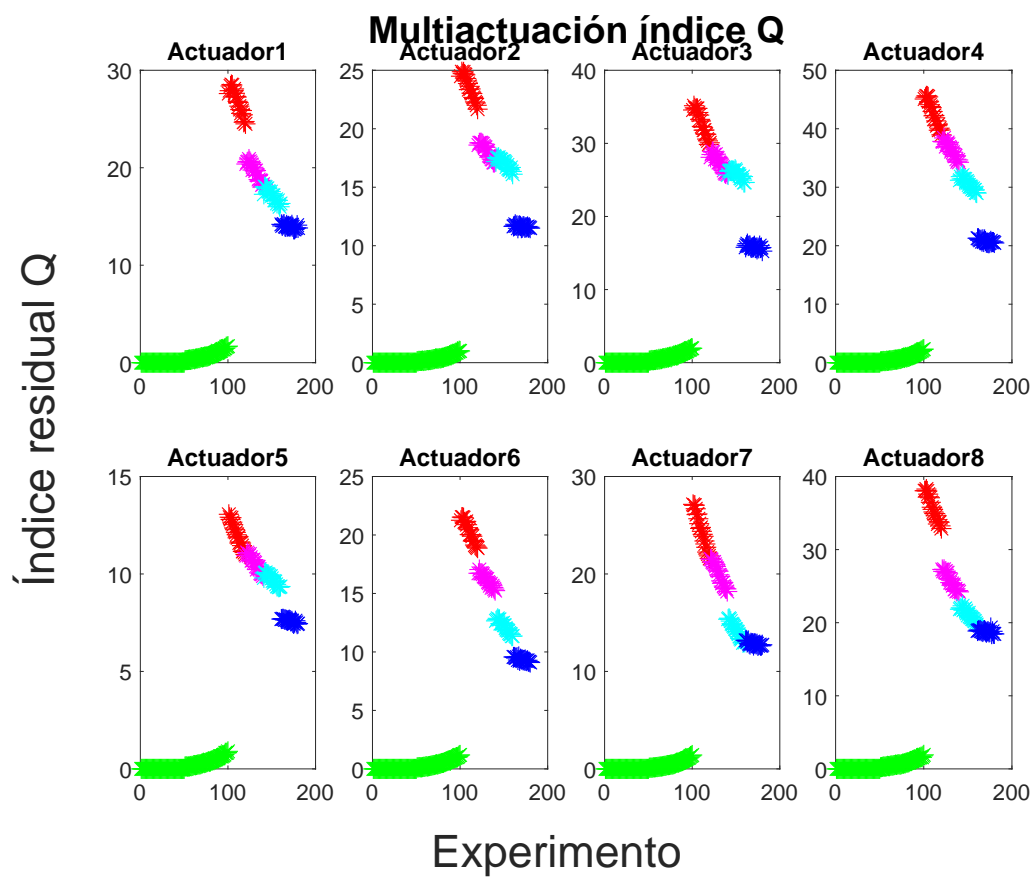
Anexo A3.1 : Índice residual Q implementado en configuración triangular con actuación simple



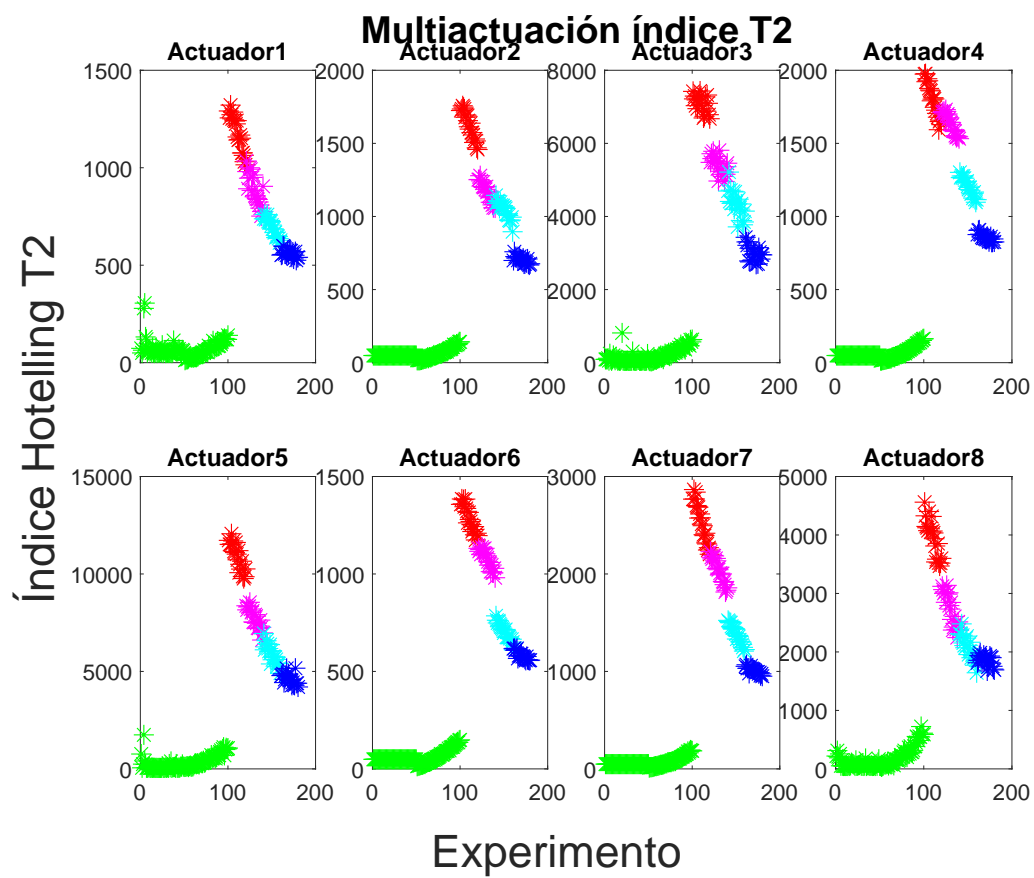
Anexo A3.2 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con actuación simple



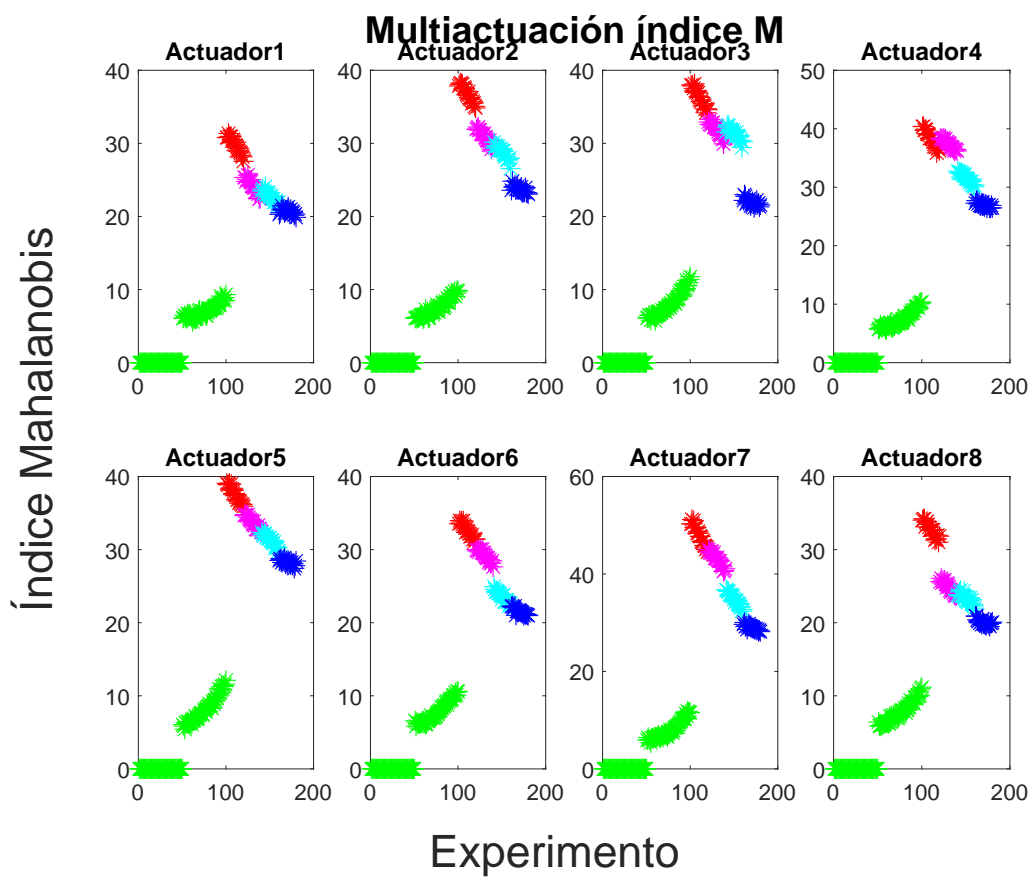
Anexo A3.3 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con actuación simple



Anexo A3.4 : Implementación de índices residual Q para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación.

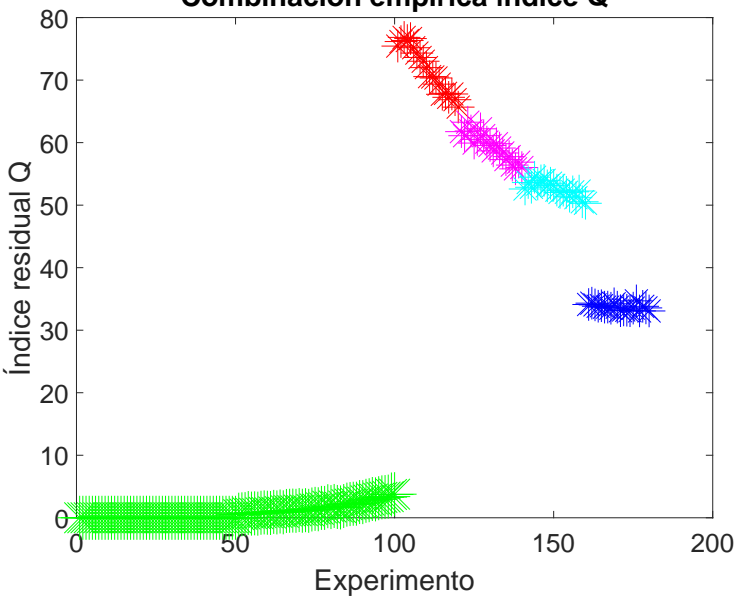


Anexo A3.5 : Implementación de índices Hotelling T^2 para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación.



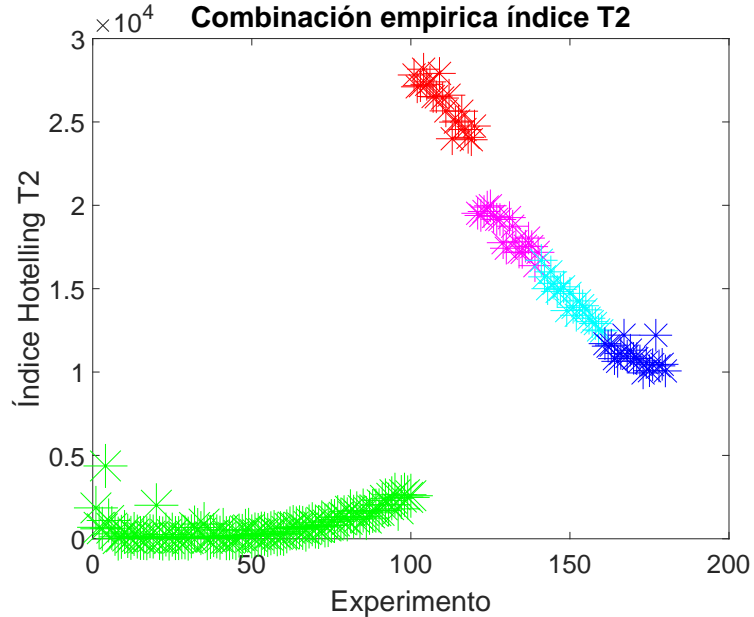
Anexo A3.6 : Implementación de índices de distancias de Mahalanobis para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación.

Combinación empírica índice Q



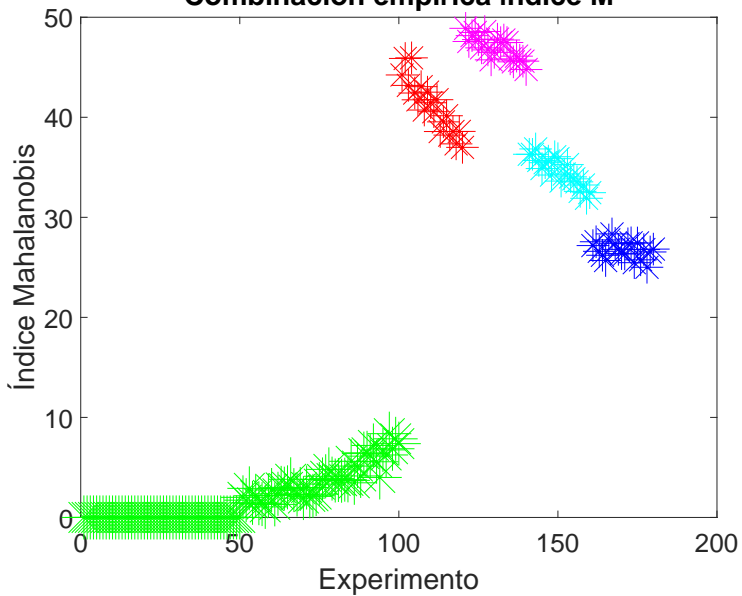
Anexo A3.7 : Índice residual Q implementado en configuración triangular con combinación empírica

Combinación empírica índice T2

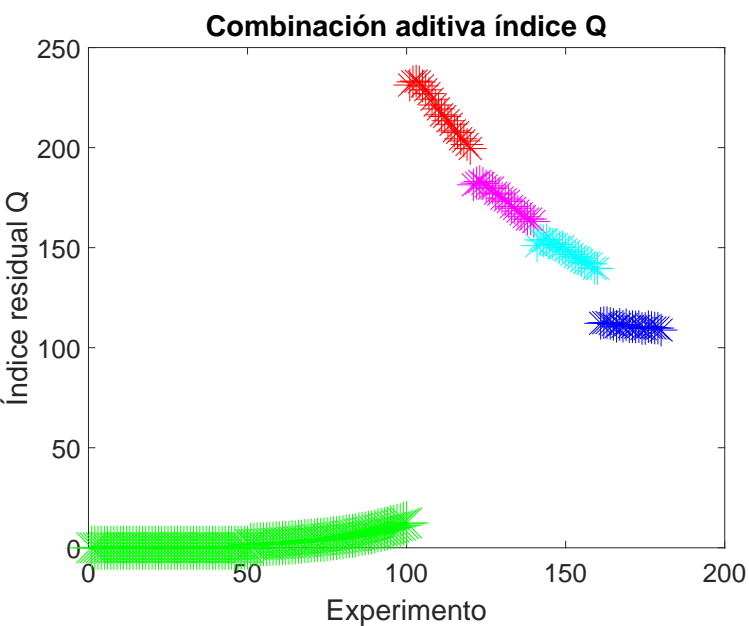


Anexo A3.8 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con combinación empírica

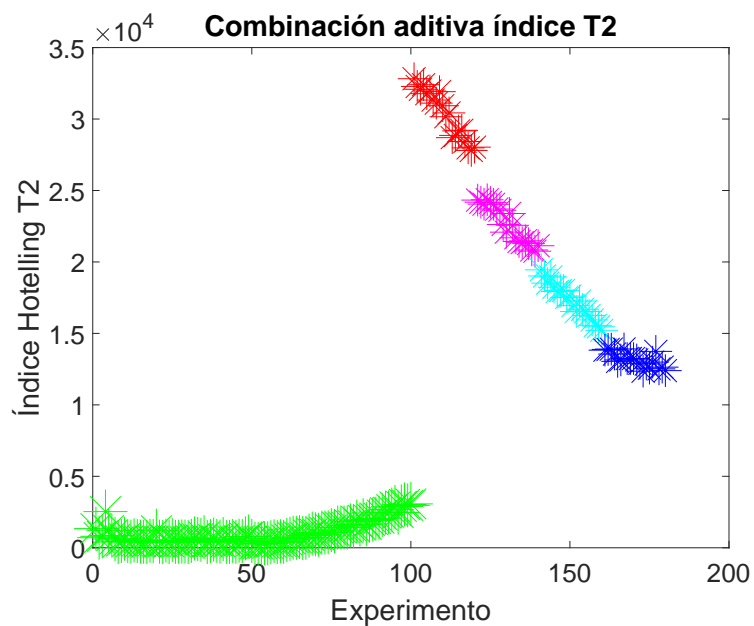
Combinación empírica índice M



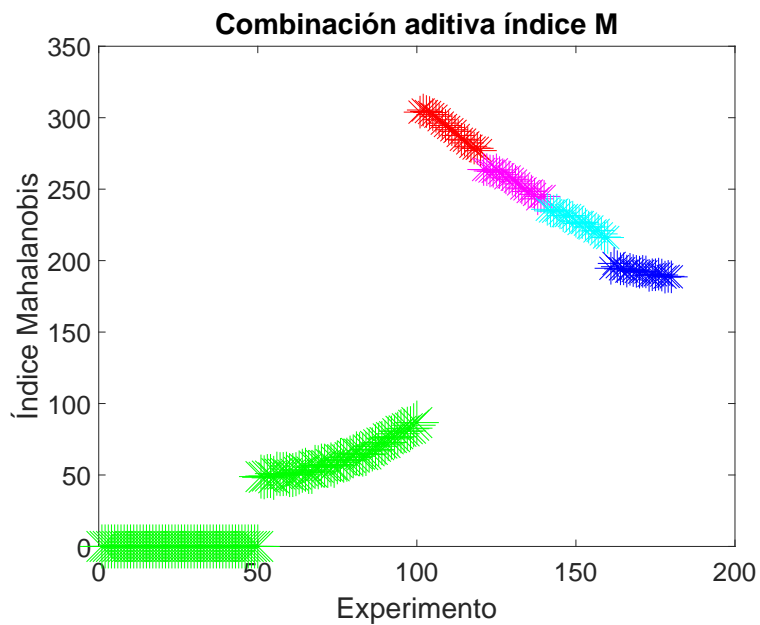
Anexo A3.9 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con combinación empírica



Anexo A3.10 : Índice residual Q implementado en configuración triangular con combinación aditiva

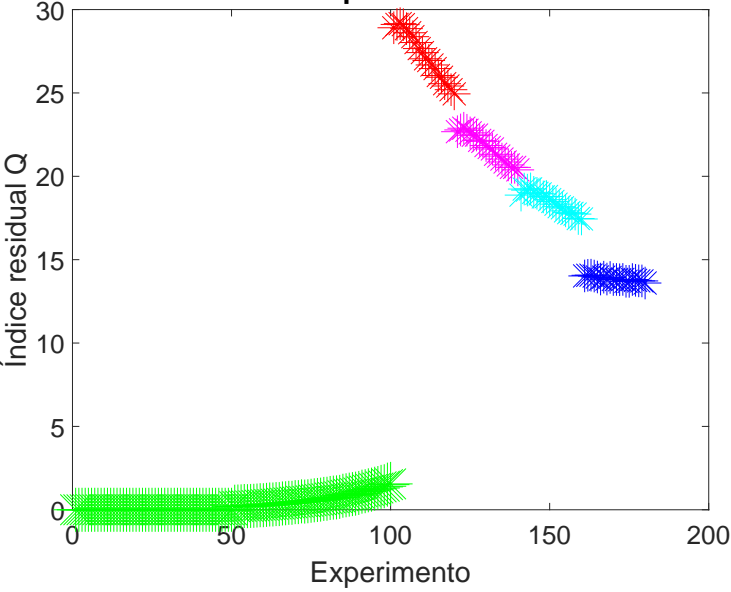


Anexo A3.11 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con combinación aditiva



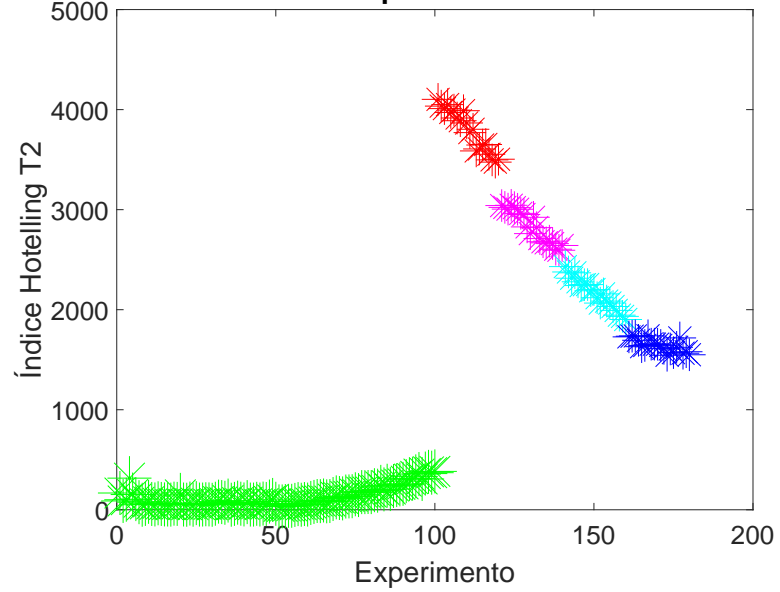
Anexo A3.12 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con combinación aditiva

Combinación promediado índice Q



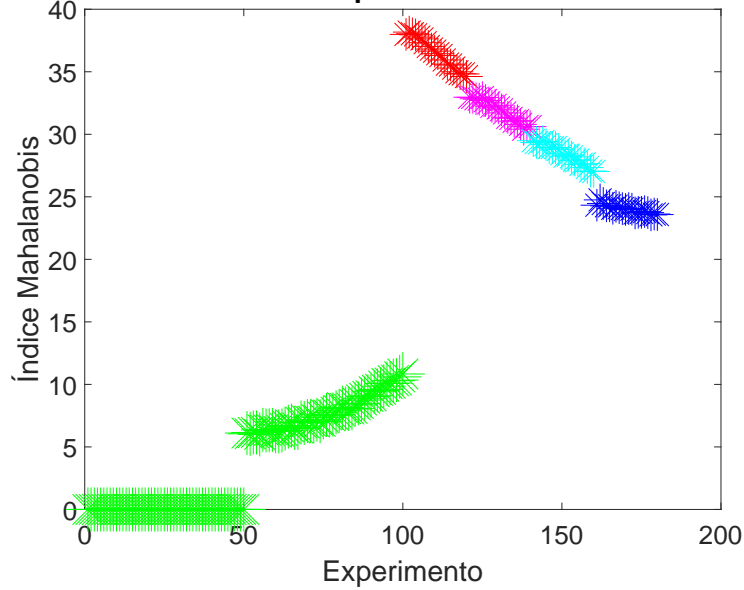
Anexo A3.13 : Índice residual Q implementado en configuración triangular con combinación promedio

Combinación promediado índice T2

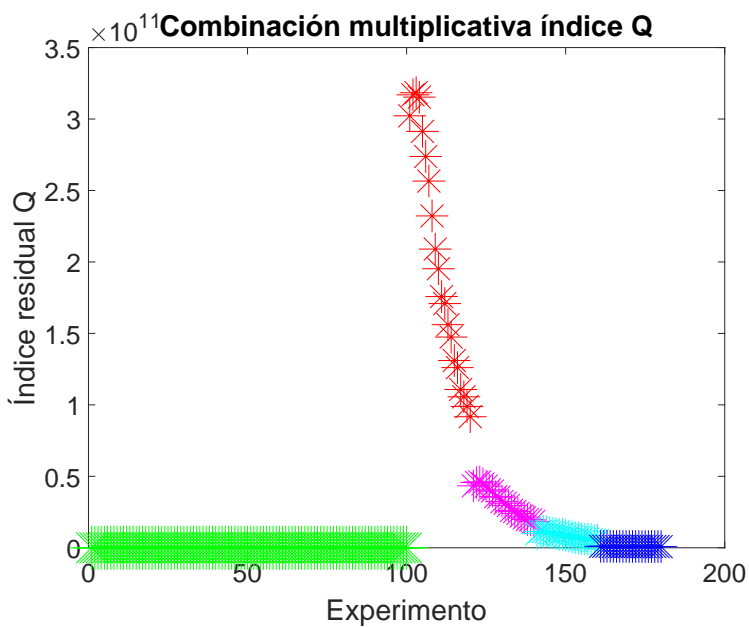


Anexo A3.14 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con combinación promedio

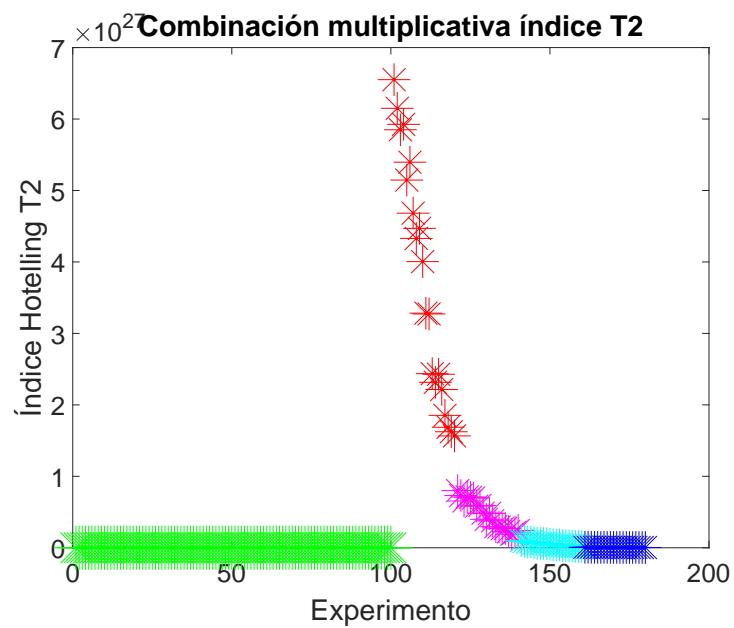
Combinación promediado índice M



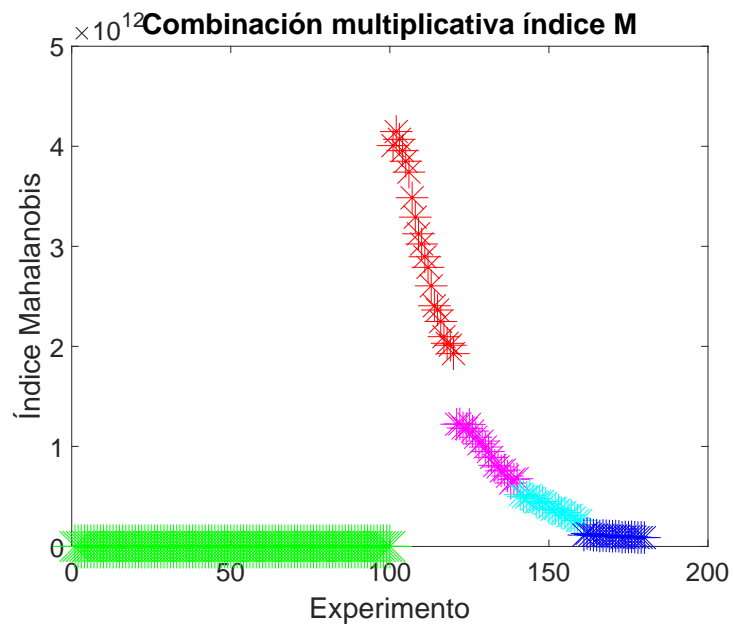
Anexo A3.15 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con combinación promedio



Anexo A3.16 : Índice residual Q implementado en configuración triangular con combinación multiplicativa



Anexo A3.17 : Índice Hotelling T^2 implementado en configuración triangular con combinación multiplicativa



Anexo A3.18 : Índice de distancias de Mahalanobis implementado en configuración triangular con combinación multiplicativa

Anexo B: Tablas de resultados extrapolados

Anexo B1: Tablas extrapoladas para geometría circular

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	26	12
Valor máximo de los datos	37,3565	109,2089	10,2581
Sensibilidad	100 %	68 %	85 %
Margen de Separación	4,9128	1,49	0,2
Separabilidad del margen de separación	13 %	1 %	2 %
Desviación Estandar	12,2794	27,9663	3,5919
Promedio de los datos	10,5697	42,7256	5,5396
Coefficiente de variación	116 %	65 %	65 %

Anexo B1.1 : Resultados para cada índice por actuación simple en geometría circular

	PZT Act-1	PZT Act-2	PZT Act-3	PZT Act-4	PZT Act-5	PZT Act-6	PZT Act-7	PZT Act-8
Número de datos sin daños	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80	80	80	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor máximo de los datos	37,3565	66,282	28,9866	21,0537	30,33	74,8725	17,9448	20,5547
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	4,9128	9,8490	6,501	5,862	5,363	16,623	7,029	6,002
Separabilidad del margen de separación	13 %	15 %	22 %	28 %	18 %	22 %	39 %	29 %
Desviación Estandar	12,2794	18,5255	9,8284	8,1319	10,1363	21,7341	6,7102	7,8325
Promedio de los datos	10,5697	12,76	8,6432	7,3646	8,5388	15,8568	6,2991	7,1132
Coefficiente de variación	116 %	145 %	114 %	110 %	119 %	137 %	107 %	110 %

Anexo B1.2 : Implementación del índice Residual Q para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores

	PZT Act-1	PZT Act-2	PZT Act-3	PZT Act-4	PZT Act-5	PZT Act-6	PZT Act-7	PZT Act-8
Número de datos sin daños	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80	80	80	80	80	80
Datos de falsos positivos	26	21	42	20	20	0	0	7
Valor máximo de los datos	109,2089	194,0091	131,8843	150,1262	144,5496	253,496	155,1516	173,0563
Sensibilidad	68 %	74 %	48 %	75 %	75 %	100 %	100 %	91 %
Margen de Separación	1,49	4,43	0,5	17,75	9,73	7,76	0,3	1,01
Separabilidad del margen de separación	1 %	2 %	0 %	12 %	7 %	3 %	0 %	1 %
Desviación Estandar	27,9663	47,3434	32,9422	40,6988	39,1146	67,268	37,3489	42,2019
Promedio de los datos	42,7256	55,1665	43,3542	55,3365	51,0496	76,6477	52,2065	55,5337
Coefficiente de variación	65 %	86 %	76 %	74 %	77 %	88 %	72 %	76 %

Anexo B1.3 : Implementación del índice Hotellings T^2 para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores

	PZT Act-1	PZT Act-2	PZT Act-3	PZT Act-4	PZT Act-5	PZT Act-6	PZT Act-7	PZT Act-8
Número de datos sin daños	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80	80	80	80	80	80
Datos de falsos positivos	12	20	0	0	1	0	0	0
Valor máximo de los datos	10,2581	13,171	11,3857	10,7296	11,6522	15,4805	12,078	12,6666
Sensibilidad	85 %	75 %	100 %	100 %	99 %	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	0,2	0,749	0,139	0,46	0,129	1,699	0,828	0,355
Separabilidad del margen de separación	2 %	6 %	1 %	4 %	1 %	11 %	7 %	3 %
Desviación Estandar	3,5919	4,1392	3,7406	3,8931	3,9173	4,9985	3,9411	4,1648
Promedio de los datos	5,5396	6,0163	5,6268	5,9156	5,8743	6,9911	5,9212	6,1739
Coficiente de variación	65 %	69 %	66 %	66 %	67 %	71 %	67 %	67 %

Anexo B1.4 : Implementación del índice Mahalanobis para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoelectricos (PZT) como actuadores

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	14	0
Valor máximo de los datos	181,1967	544440	20,5716
Sensibilidad	100 %	83 %	100 %
Margen de Separación	20,5140	15370	3,685
Separabilidad del margen de separación	11 %	3 %	18 %
Desviación Estandar	51,9563	135850	5,5718
Promedio de los datos	35,0475	96947	4,908
Coefficiente de variación	148 %	140 %	114 %

Anexo B1.5 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría circular por combinación de datos empírica

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	13	0
Valor máximo de los datos	255,3757	260230	89,7558
Sensibilidad	100 %	84 %	100 %
Margen de Separación	93,4700	2920	9,15
Separabilidad del margen de separación	37 %	1 %	10 %
Desviación Estandar	85,8349	64836	31,86
Promedio de los datos	77,1454	44734	48,0587
Coefficiente de variación	111 %	145 %	66 %

Anexo B1.6 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría circular por combinación de datos aditiva

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	15	0
Valor máximo de los datos	31,9220	32528	11,2195
Sensibilidad	100 %	81 %	100 %
Margen de Separación	11,6820	988	1,144
Separabilidad del margen de separación	37 %	3 %	10 %
Desviación Estandar	10,7294	8104,5	3,9825
Promedio de los datos	9,6432	5591,7	6,0073
Coficiente de variación	111 %	145 %	66 %

Anexo B1.7 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría circular por combinación de datos promediada

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	2,21E+11	2,8065E+25	2,43E+08
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	4,54E+08	1E+17	9097000
Separabilidad del margen de separación	0 %	0 %	4 %
Desviación Estandar	5,12E+10	2,9526E+24	5,30E+07
Promedio de los datos	2,125E+10	6,407E+23	3,486E+07
Coficiente de variación	241 %	461 %	152 %

Anexo B1.8 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría circular por combinación de datos multiplicativa

Anexo B2: Tablas extrapoladas para geometría cuadrada

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	444,0181	4100,4	61,7018
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	7,436	72,06	2,293
Separabilidad del margen de separación	2 %	2 %	4 %
Desviación Estandar	129,6099	1195,3	17,82
Promedio de los datos	66,2188	579,9517	14,3049
Coefficiente de variación	196 %	206 %	125 %

Anexo B2.1 : Resultados para cada índice por actuación simple en geometría cuadrada

	PZT Act-1	PZT Act-2	PZT Act-3	PZT Act-4	PZT Act-5	PZT Act-6	PZT Act-7	PZT Act-8
Número de datos sin daños	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80	80	80	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor máximo de los datos	444,0181	34,8982	167,9874	87,9866	374,5739	51,797	129,9482	95,1584
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	7,436	4,8945	2,195	0,6248	15,7	13,167	14,809	37,9544
Separabilidad del margen de separación	2 %	14 %	1 %	1 %	4 %	25 %	11 %	40 %
Desviación Estandar	129,6099	11,982	46,1947	23,7069	109,0377	15,4651	37,6737	30,5322
Promedio de los datos	66,2188	9,0367	26,5486	13,5088	54,4945	12,794	23,1008	26,2178
Coefficiente de variación	196 %	133 %	174 %	175 %	200 %	121 %	163 %	116 %

Anexo B2.2 : Implementación del índice Residual Q para la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores

	PZT Act-1	PZT Act-2	PZT Act-3	PZT Act-4	PZT Act-5	PZT Act-6	PZT Act-7	PZT Act-8
Número de datos sin daños	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80	80	80	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor máximo de los datos	4100,4	752,4	2430,8	2790,4	9277,5	1082,7	3620	2147,5
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	72,06	66,89	37,87	53,9	135,95	144,88	141,69	619
Separabilidad del margen de separación	2 %	9 %	2 %	2 %	1 %	13 %	4 %	29 %
Desviación Estandar	1195,3	215,1	678,3	725,1	2646,7	288,2	917,6	647,6
Promedio de los datos	579,9517	196,4	397,8	480,7	1175,2	258,1	506,7	541,6
Coefficiente de variación	206 %	110 %	171 %	151 %	225 %	112 %	181 %	120 %

Anexo B2.3 : Implementación del índice Hotellings T^2 para la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores

	PZT Act-1	PZT Act-2	PZT Act-3	PZT Act-4	PZT Act-5	PZT Act-6	PZT Act-7	PZT Act-8
Número de datos sin daños	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80	80	80	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor máximo de los datos	61,7018	26,4079	47,4296	50,6333	92,5886	31,3067	57,7616	44,0286
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	2,293	2,126	1,252	1,79	4,531	5,395	5,252	13,23
Separabilidad del margen de separación	4 %	8 %	3 %	4 %	5 %	17 %	9 %	30 %
Desviación Estandar	17,82	8,3253	13,9563	14,7086	26,5239	9,519	15,816	14,7445
Promedio de los datos	14,3049	10,1777	12,7558	14,532	19,1381	11,3134	14,3998	16,1635
Coefficiente de variación	125 %	82 %	109 %	101 %	139 %	84 %	110 %	91 %

Anexo B2.4 : Implementación del índice Mahalanobis para la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	1256,1	45787	175,4559
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	86,384	274	23,536
Separabilidad del margen de separación	7 %	1 %	13 %
Desviación Estandar	361,8546	12727	52,7669
Promedio de los datos	190,988	7247,8	36,3659
Coefficiente de variación	189 %	176 %	145 %

Anexo B2.5 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría cuadrada por combinación de datos empírica

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	1151,5	30053	361,1465
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	102,453	1284,5	42,6
Separabilidad del margen de separación	3 %	4 %	12 %
Desviación Estandar	359,6375	9319,7	113,317
Promedio de los datos	231,92	5994,8	112,7851
Coefficiente de variación	155 %	155 %	100 %

Anexo B2.6 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría cuadrada por combinación de datos aditiva

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	143,9347	3756,6	45,1433
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	12,804	160,6	5,331
Separabilidad del margen de separación	9 %	4 %	12 %
Desviación Estandar	44,9547	1165	14,1646
Promedio de los datos	28,99	749,3467	14,0981
Coficiente de variación	155 %	155 %	100 %

Anexo B2.7 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría cuadrada por combinación de datos promediada

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	2,1286E+15	2,9415E+26	8,2113E+12
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separación	70189997,2	6,30206E+18	1,28E+09
Separabilidad del margen de separación	0 %	0 %	0 %
Desviación Estandar	5,1316E+14	5,5758E+25	2,0118E+12
Promedio de los datos	1,957E+14	1,9647E+25	7,607E+11
Coficiente de variación	262 %	284 %	264 %

Anexo B2.8 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría cuadrada por combinación de datos multiplicativa

Anexo B3: Tablas extrapoladas para geometría triangular

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	28,5388	1239,6	31,3504
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separabilidad	11,9829	392,1866	10,556
Separabilidad del margen de separación	42 %	32 %	34 %
Desviación Estandar	10,0017	394,3219	10,9485
Promedio de los datos	8,8251	380,5945	12,7892
Coefficiente de variación	113 %	104 %	86 %

Anexo B3.1 : Resultados para cada índice por actuación simple en geometría triangular

	PZT Act-1	PZT Act-2	PZT Act-3	PZT Act-4	PZT Act-5	PZT Act-6	PZT Act-7	PZT Act-8
Número de datos sin daños	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80	80	80	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor máximo de los datos	28,5388	24,8769	35,1535	45,6283	13,0612	21,5299	27,1419	38,2828
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Margen de Separabilidad	11,9829	10,489	13,298	18,106	6,5261	7,902	11,193	16,537
Separabilidad del margen de separación	42 %	42 %	38 %	40 %	50 %	37 %	41 %	43 %
Desviación Estandar	10,0017	9,1009	13,124	16,928	4,9918	7,6292	9,3425	13,1699
Promedio de los datos	8,8251	7,922	11,5584	14,7411	4,5329	6,5779	8,0923	11,487
Coefficiente de variación	113 %	115 %	114 %	115 %	110 %	116 %	115 %	115 %

Anexo B3.2 : Implementación del índice Residual Q para la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores

	PZT Act-1	PZT Act-2	PZT Act-3	PZT Act-4	PZT Act-5	PZT Act-6	PZT Act-7	PZT Act-8
Número de datos sin daños	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80	80	80	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor máximo de los datos	1239,6	1757,3	1702,5	1976,9	1771,6	1384,7	2866,1	1391,6
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Margen de Separabilidad	392,1866	525,6	376,1	660	693,7	407,2	766,2	289,1
Separabilidad del margen de separación	32 %	30 %	22 %	33 %	39 %	29 %	27 %	21 %
Desviación Estandar	394,3219	582,1794	577,7843	701,3559	622,682	466,698	925,895	418,8315
Promedio de los datos	380,5945	535,6336	534,3545	643,8068	595,4493	438,5123	809,5649	384,6852
Coefficiente de variación	104 %	109 %	108 %	109 %	105 %	106 %	114 %	109 %

Anexo B3.3 : Implementación del índice Hotellings T^2 para la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores

	PZT Act-1	PZT Act-2	PZT Act-3	PZT Act-4	PZT Act-5	PZT Act-6	PZT Act-7	PZT Act-8
Número de datos sin daños	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80	80	80	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor máximo de los datos	31,3504	38,2759	38,1515	40,411	39,1035	33,9753	51,1881	34,2163
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Margen de Separabilidad	10,556	13,28	9,44	16,05	15,31	10,4	16,61	8,32
Separabilidad del margen de separación	34 %	35 %	25 %	40 %	39 %	31 %	32 %	24 %
Desviación Estandar	10,9485	13,7693	13,9353	15,4606	14,7867	12,1271	18,2482	11,477
Promedio de los datos	12,7892	15,4401	15,7147	16,9769	16,8211	14,0488	19,4168	13,3915
Coefficiente de variación	86 %	89 %	89 %	91 %	88 %	86 %	94 %	86 %

Anexo B3.4 : Implementación del índice Mahalanobis para la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	76,8289	28164	48,8927
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separabilidad	29,338	7366	16,636
Separabilidad del margen de separación	38 %	26 %	34 %
Desviación Estandar	28,2378	9162,1	18,476
Promedio de los datos	24,6119	8175,8	17,6594
Coficiente de variación	115 %	112 %	105 %

Anexo B3.5 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría triangular por combinación de datos empírica

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	233,2557	32821	305,3752
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separabilidad	96,38	9330	101,94
Separabilidad del margen de separación	41 %	28 %	33 %
Desviación Estandar	84,0597	10847	110,4394
Promedio de los datos	73,7367	9820,1	124,5997
Coefficiente de variación	114 %	110 %	89 %

Anexo B3.6 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría triangular por combinación de datos aditiva

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	29,157	4102,6	38,1719
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separabilidad	12,048	1161,3	12,75
Separabilidad del margen de separación	41 %	28 %	33 %
Desviación Estándar	10,5075	1355,9	13,8049
Promedio de los datos	9,2171	1227,5	15,5749
Coefficiente de variación	114 %	110 %	89 %

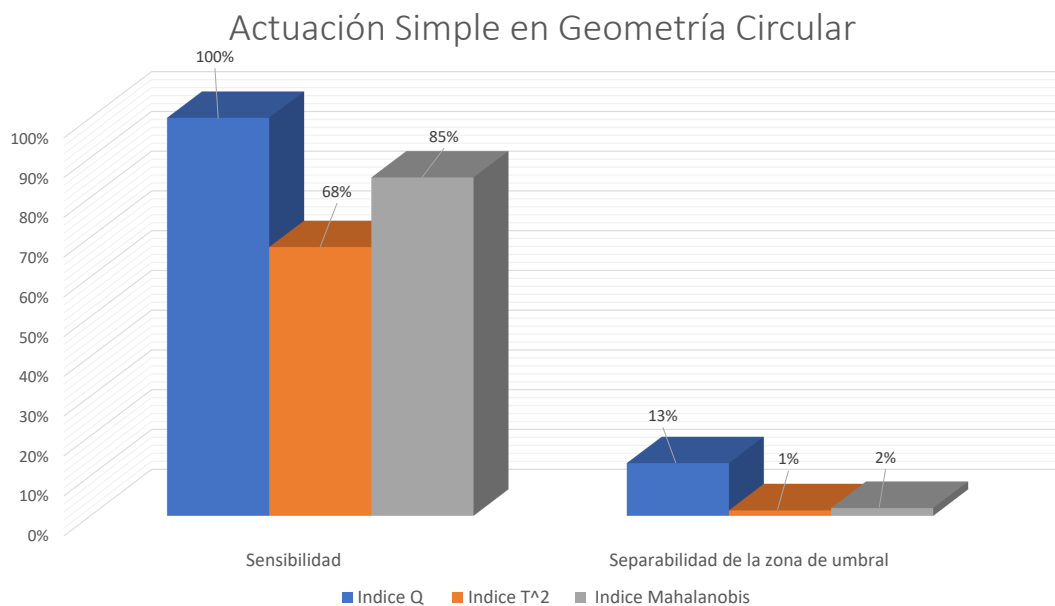
Anexo B3.7 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría triangular por combinación de datos promediada

	Índice Residual Q	Índice Hotelling T ²	Índice Mahalanobis
Número de datos sin daños	100	100	100
Número de datos Con daños	80	80	80
Datos de falsos positivos	0	0	0
Valor máximo de los datos	3,184E+11	6,5507E+27	4,1469E+12
Sensibilidad	100 %	100 %	100 %
Margen de Separabilidad	7,92E+08	3,361E+24	8,813+E07
Separabilidad del margen de separación	0 %	0 %	2 %
Desviación Estandar	9,7507E+11	1,2985E+27	9,75E+11
Promedio de los datos	4,944E+11	4,7497E+26	4,94E+11
Coficiente de variación	197 %	273 %	197 %

Anexo B3.8 : Resultados para cada índice por multiactuación en geometría tringular por combinación de datos multiplicativa

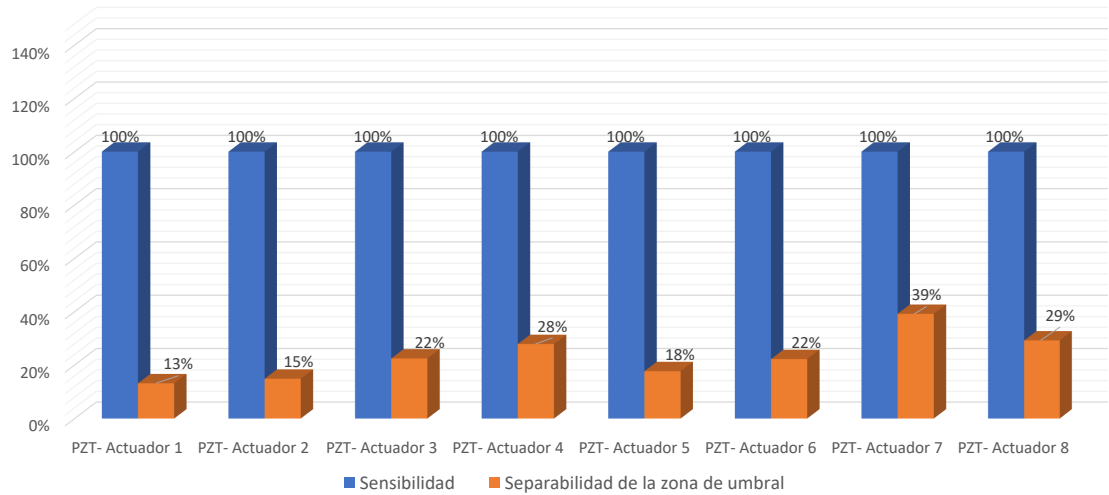
Anexo C: Gráficos de barras comparativos

Anexo C1: Comparaciones geometría circular



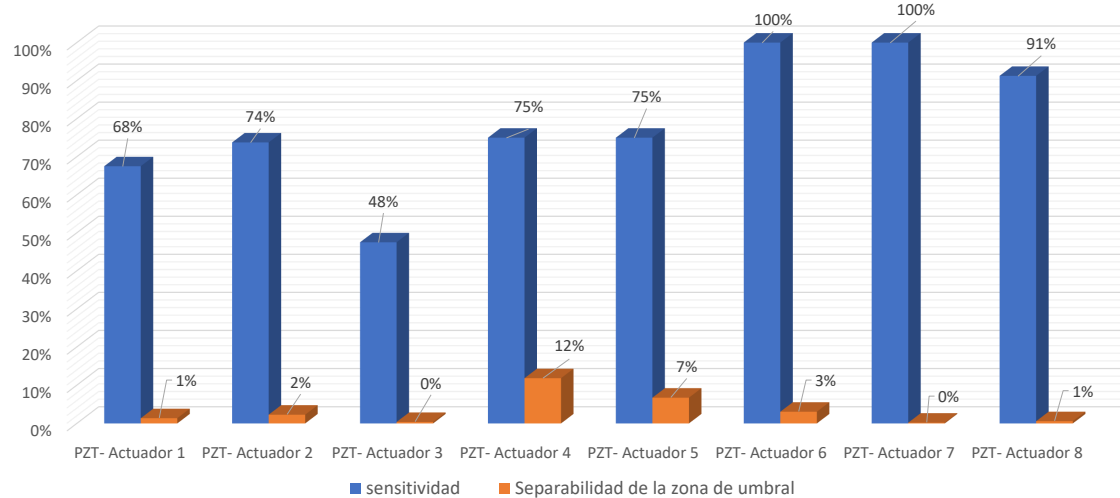
Anexo C1.1 : Comparación de parámetros porcentuales de los índices en geometría circular

Multiactuación para índice Q en Geometría Circular



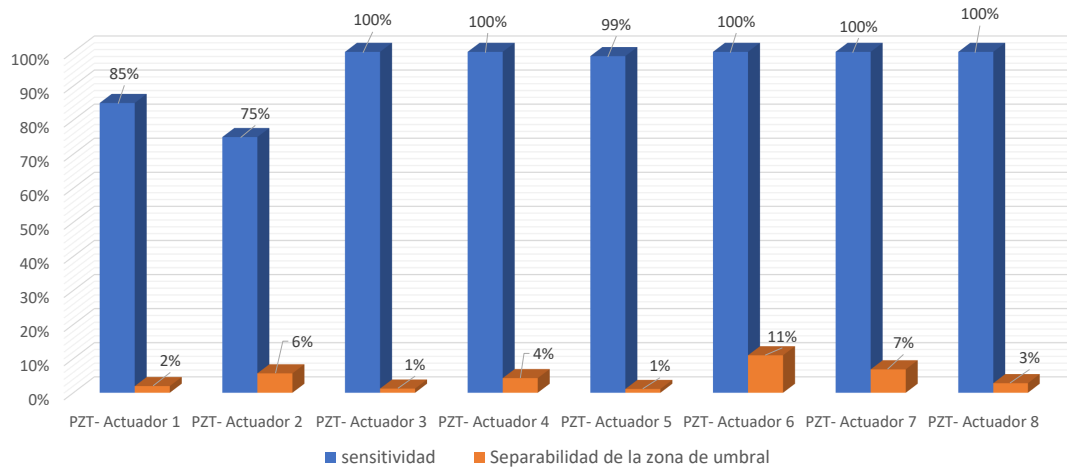
Anexo C1.2 : Comparación de parámetros porcentuales para índice Residual Q para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.

Multiactuación para índice T^2 en Geometría Circular



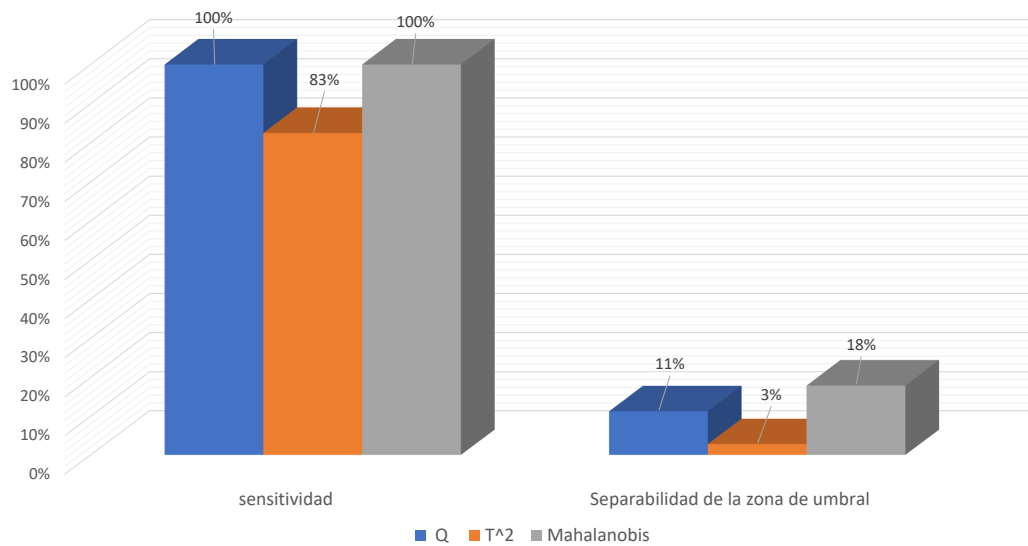
Anexo C1.3 : Comparación de parámetros porcentuales para índice Residual T^2 para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.

Multiactuación para índice Mahalanobis en Geometría Circular



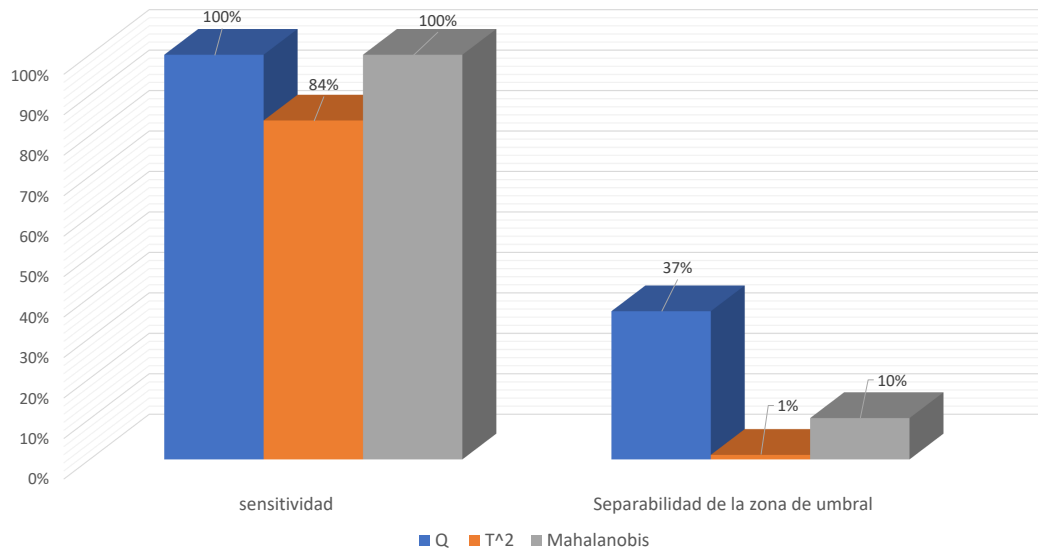
Anexo C1.4 : Comparación de parámetros porcentuales para índice de distancias de mahalanobis para la configuración circular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.

Combinación Empírica en Geometría Circular



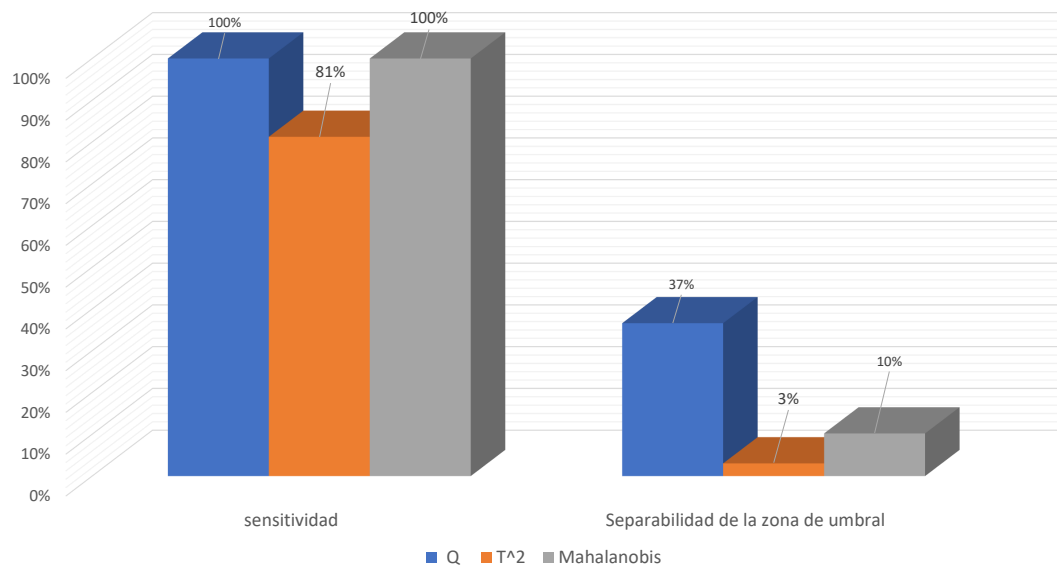
Anexo C1.5 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración circular implementando métodos de multiactuación con combinación empírica.

Combinación Aditiva en Geometría Circular

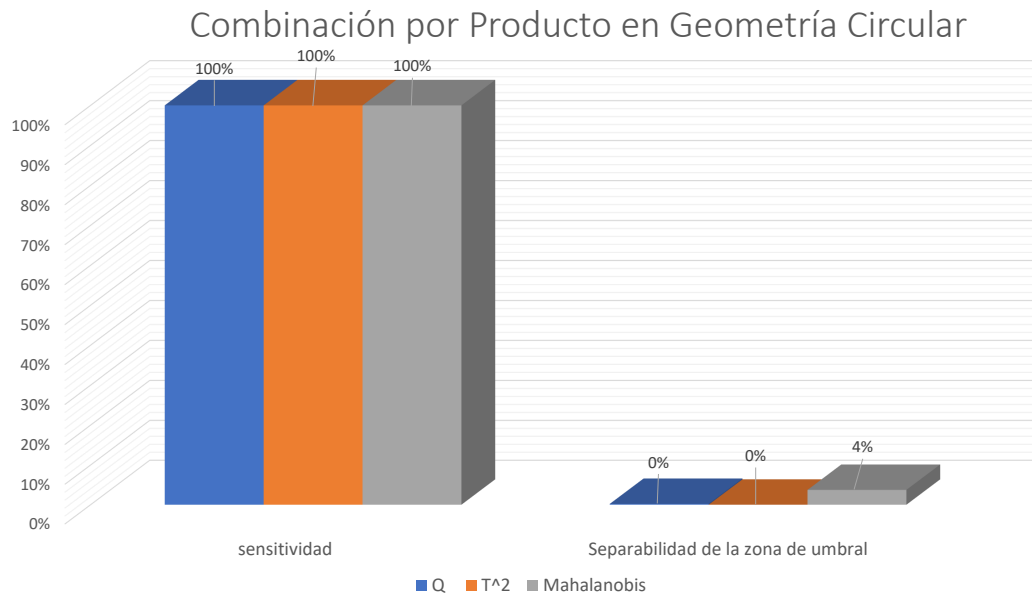


Anexo C1.6 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración circular implementando métodos de multiactuación con combinación aditiva.

Combinación Promediada en Geometría Circular



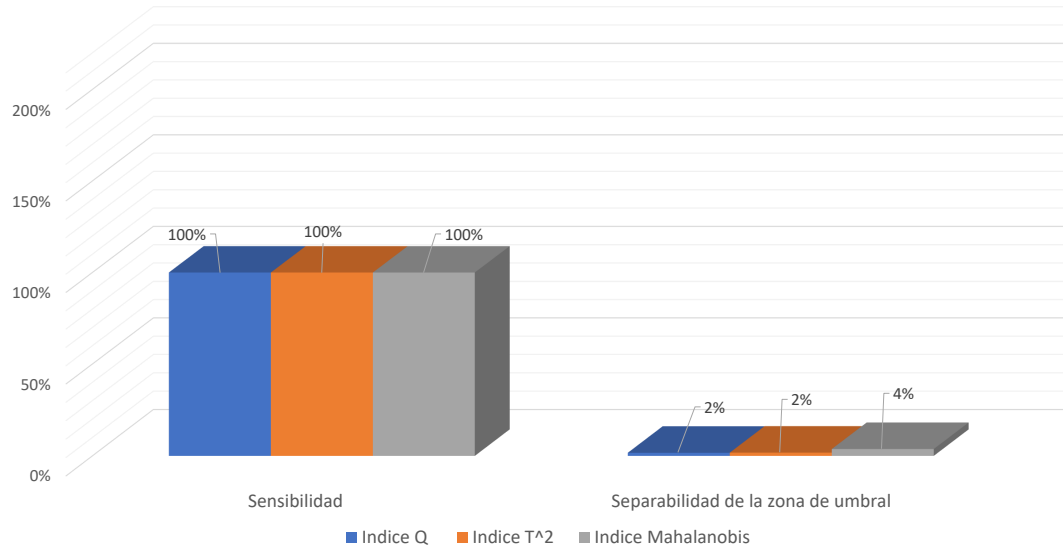
Anexo C1.7 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración circular implementando métodos de multiactuación con combinación promedio.



Anexo C1.8 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración circular implementando métodos de multiactuación con combinación producto.

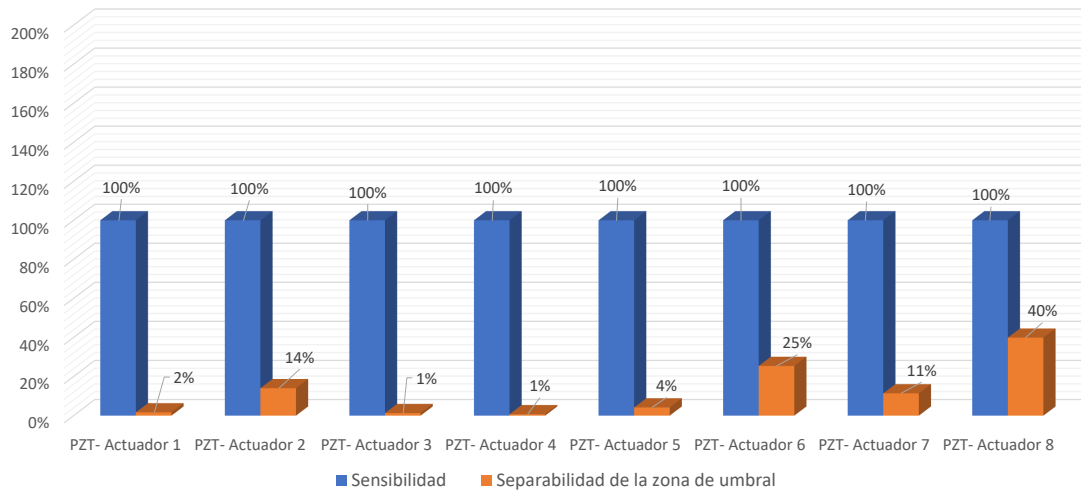
Anexo C2: Comparaciones geometría cuadrada

Actuación Simple en Geometría Cuadrada



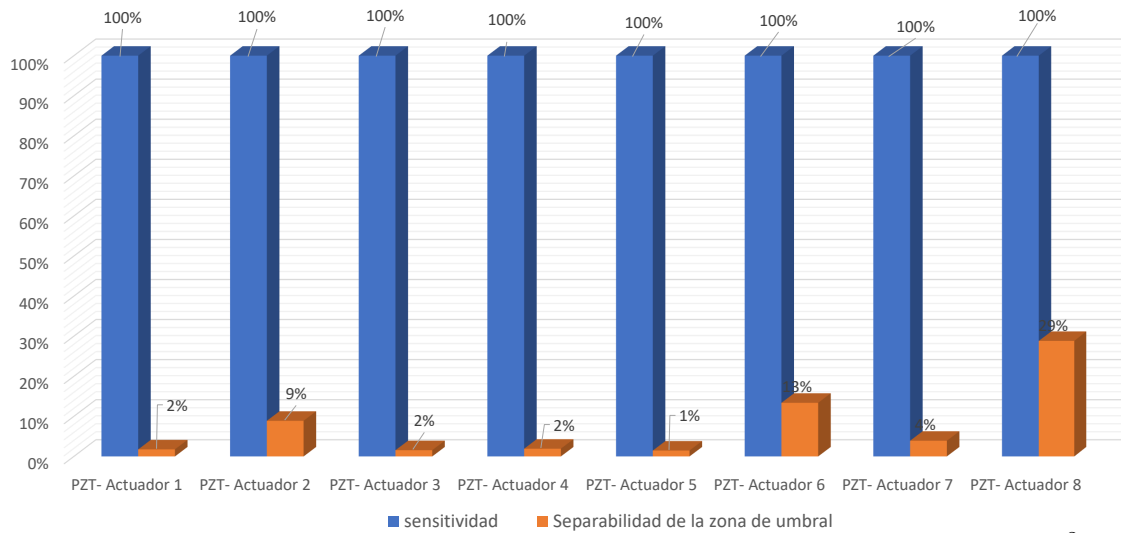
Anexo C2.1 : Comparación de parámetros porcentuales de los índices en geometría cuadrada

Multiactuación para índice Q en Geometría Cuadrada



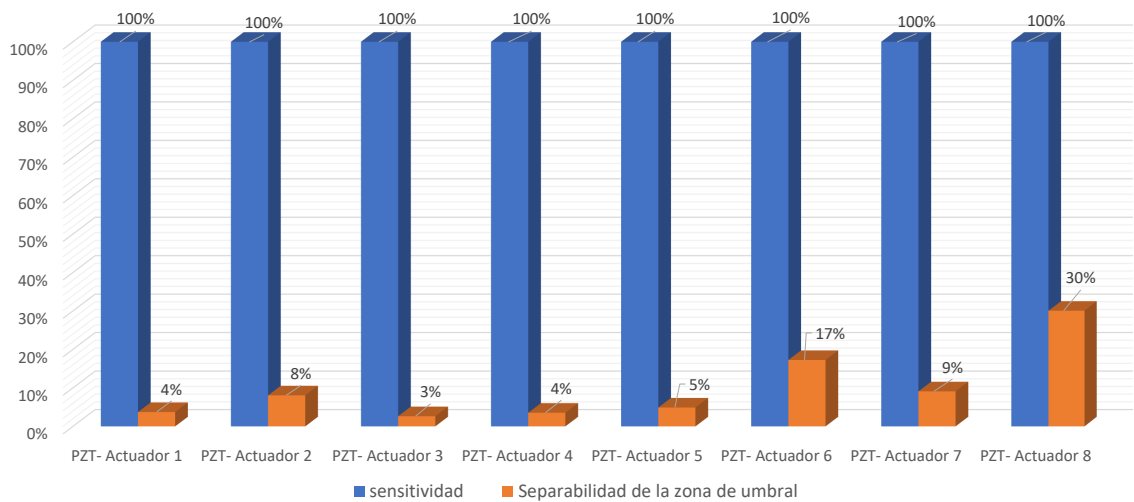
Anexo C2.2 : Comparación de parámetros porcentuales para índice residual Q en la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.

Multiactuación para índice T^2 en Geometría Cuadrada



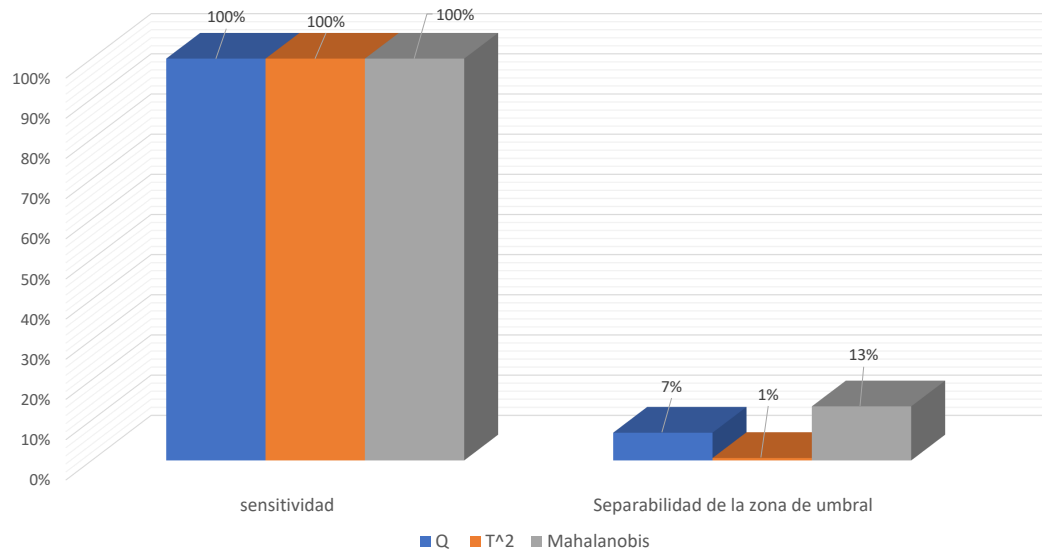
Anexo C2.3 : Comparación de parámetros porcentuales para índice Hotelling T^2 en la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.

Multiactuación para índice Mahalanobis en Geometría Cuadrada



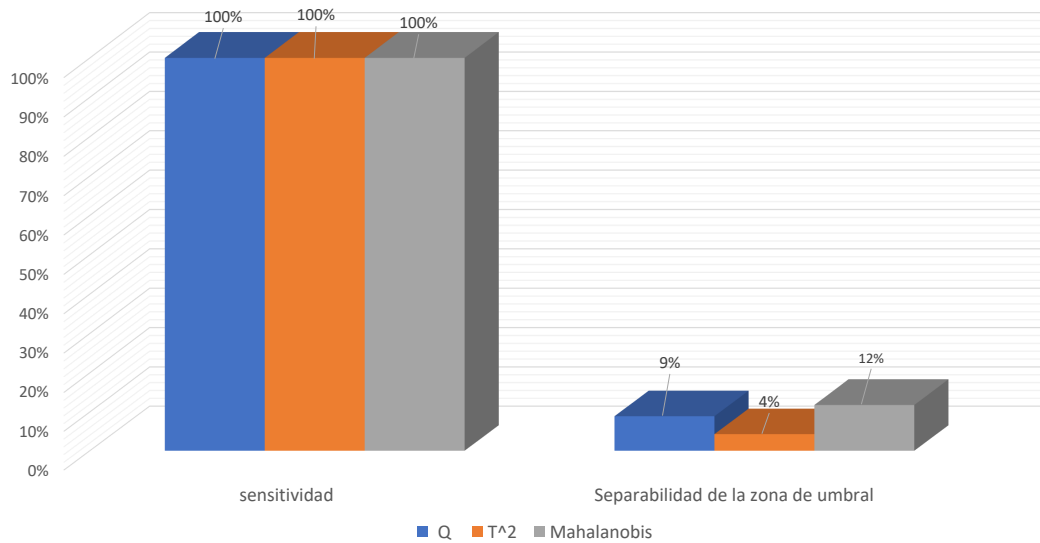
Anexo C2.4 : Comparación de parámetros porcentuales para índice de distancias de Mahalanobis en la configuración cuadrada en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.

Combinación Empírica en Geometría Cuadrada



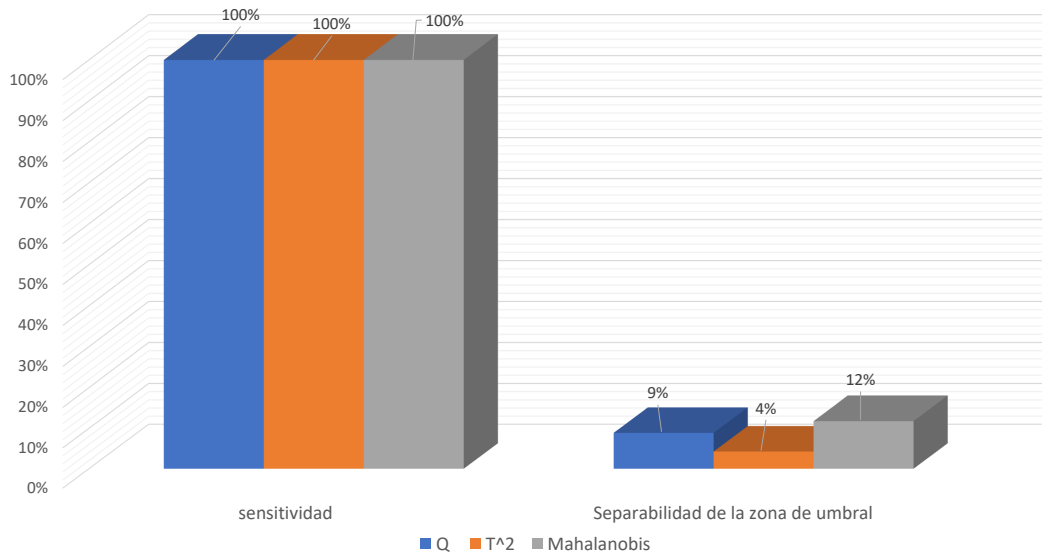
Anexo C2.5 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación con combinación empírica.

Combinación Aditiva en Geometría Cuadrada



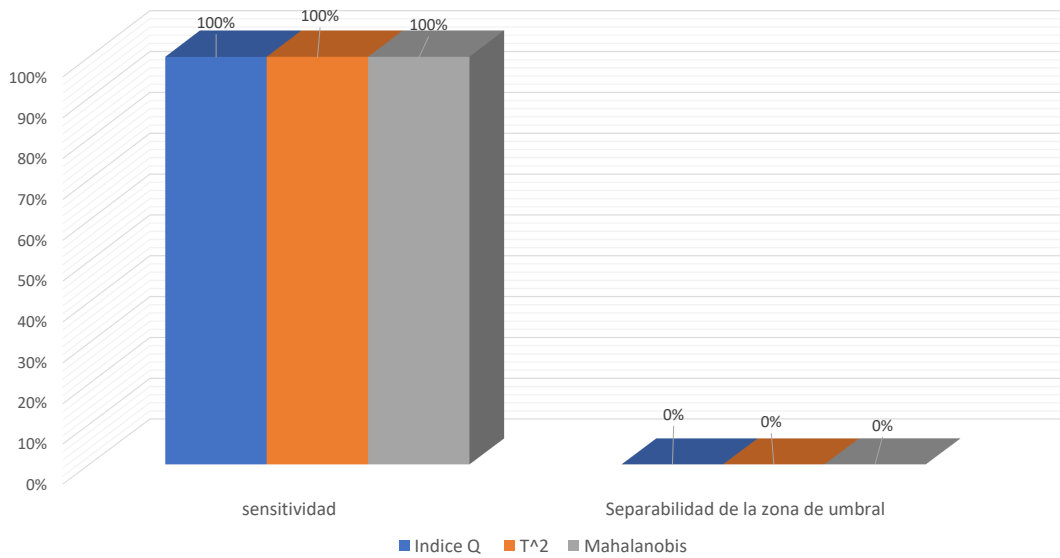
Anexo C2.6 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación con combinación aditiva.

Combinación Promediada en Geometría Cuadrada



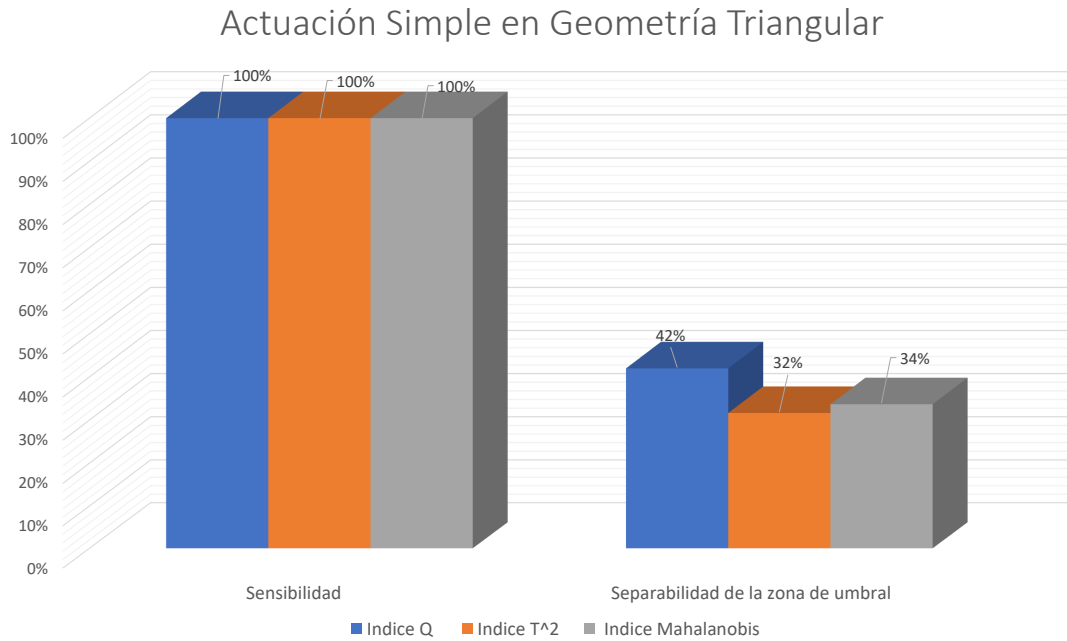
Anexo C2.7 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración cuadrada implementando métodos de multiactuación con combinación promedio.

Combinación por Producto en Geometría Cuadrada

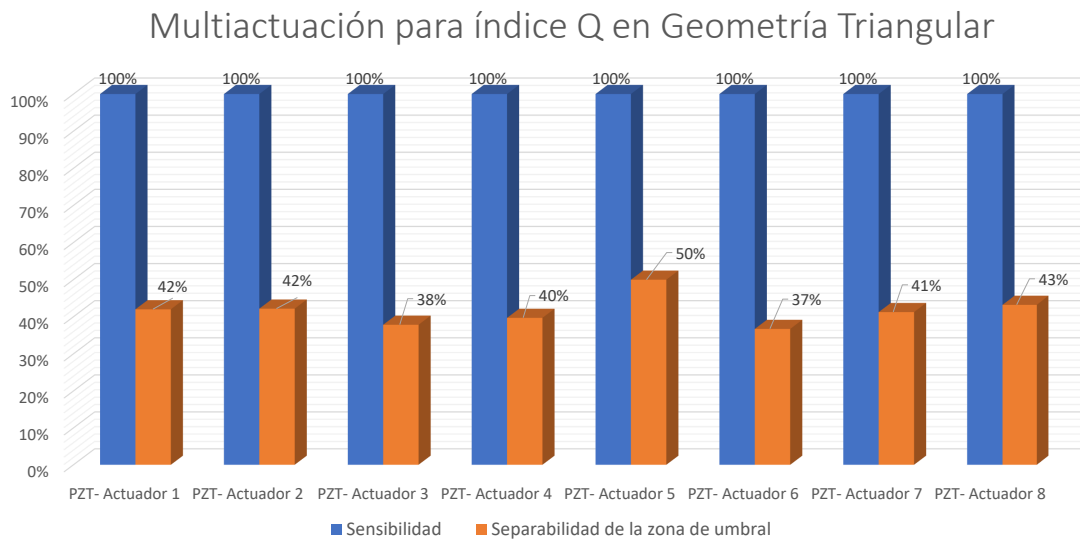


Anexo C2.8 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración Cuadrada implementando métodos de multiactuación con combinación por producto.

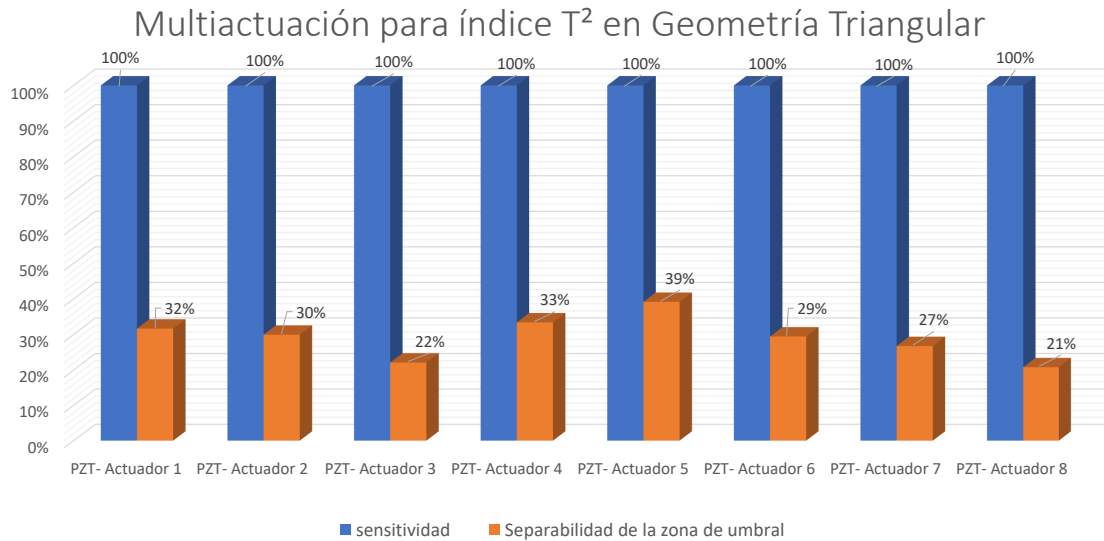
Anexo C3: Comparaciones geometría triangular



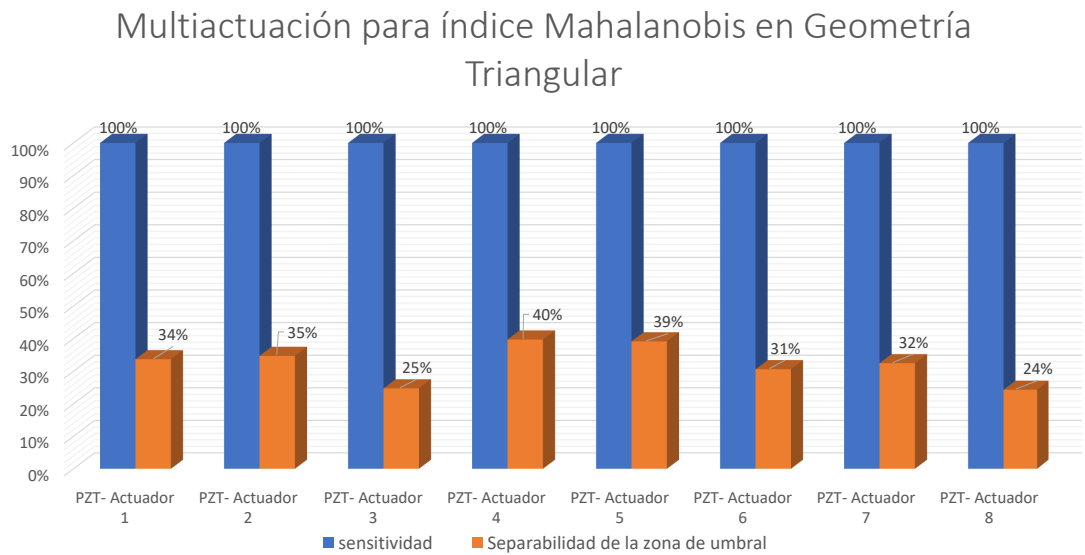
Anexo C3.1 : Comparación de parámetros porcentuales de los índices



Anexo C3.2 : Comparación de parámetros porcentuales para índice residual Q en la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.

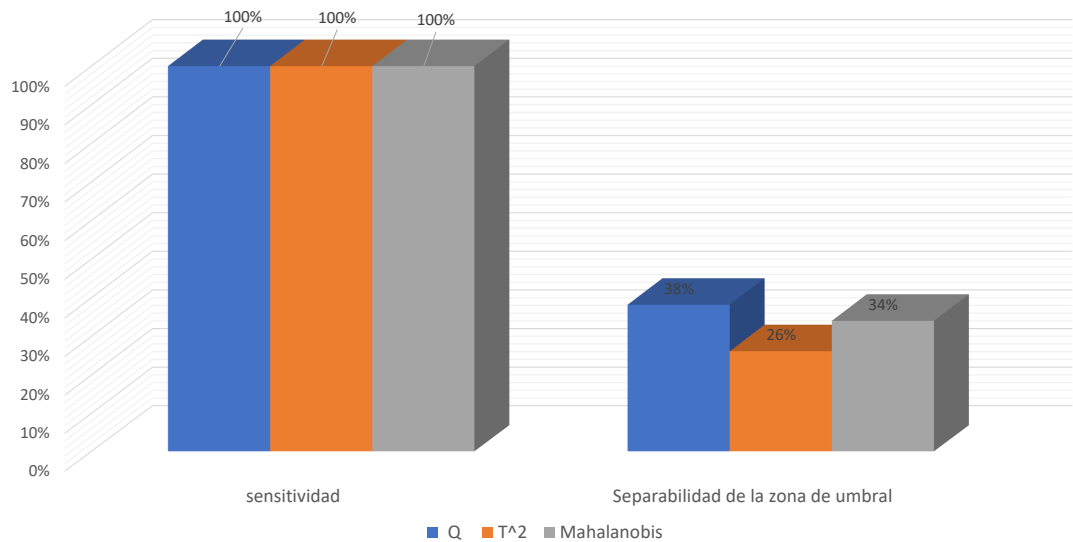


Anexo C3.3 : Comparación de parámetros porcentuales para índice Hotelling T^2 en la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.



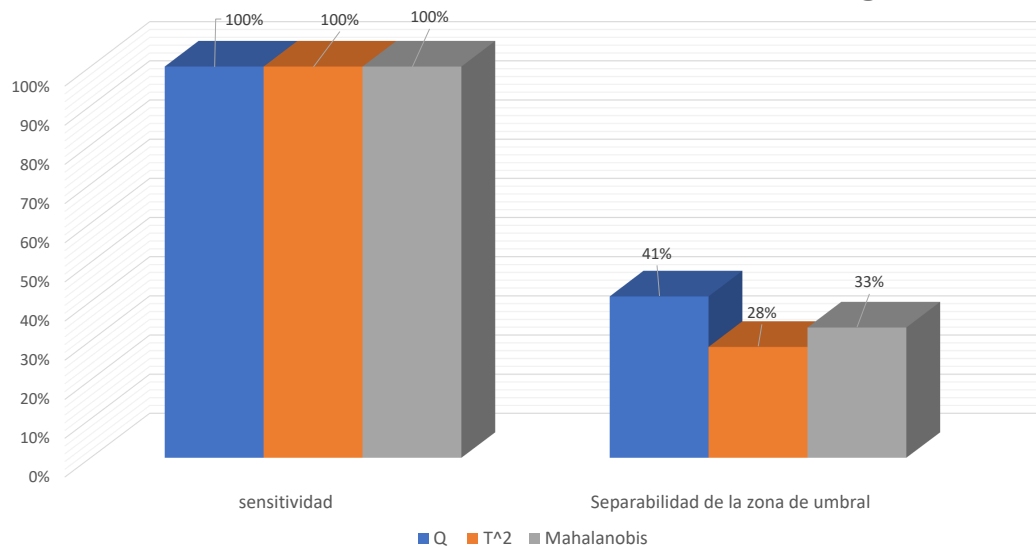
Anexo C3.4 : Comparación de datos para índice de distancias de mahalanobis para la configuración triangular en modo de multiactuación para cada uno de los piezoeléctricos (PZT) como actuadores.

Combinación Empírica en Geometría Triangular



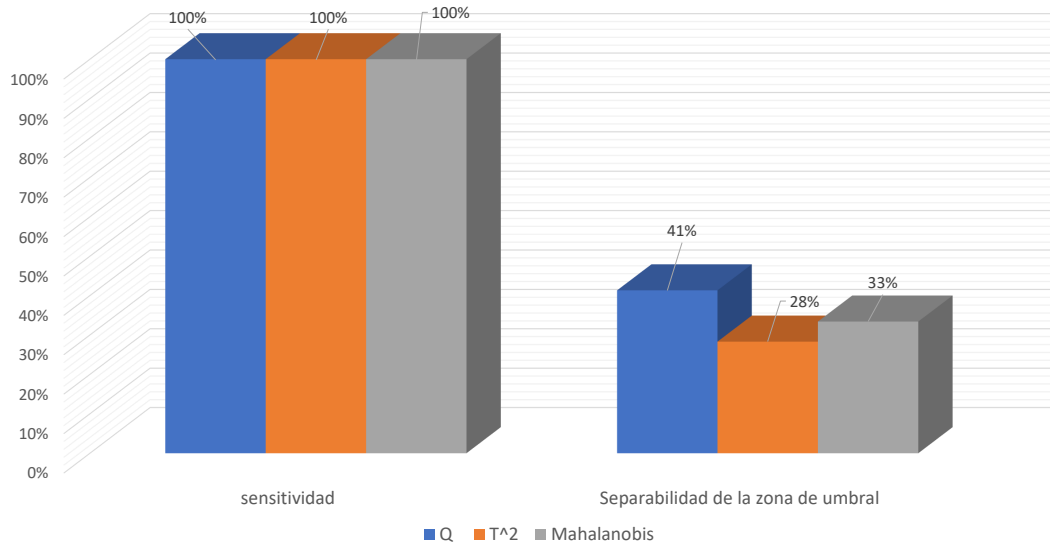
Anexo C3.5 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación con combinación empírica.

Combinación Aditiva en Geometría Triangular



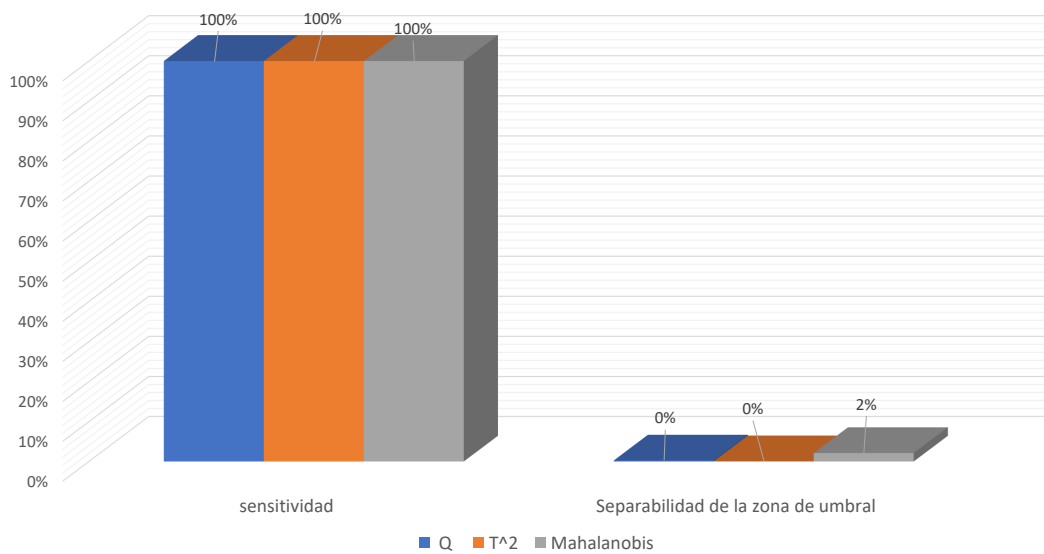
Anexo C3.6 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración triangular implementando métodos de multiactuación con combinación aditiva.

Combinación Promediada en Geometría Triangular



Anexo C3.7 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración Triangular implementando métodos de multiactuación con combinación promedio.

Combinación por Producto en Geometría Triangular



Anexo C3.8 : Comparación de parámetros porcentuales de índices estadísticos para una configuración Triangular implementando métodos de multiactuación con combinación por producto.