

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE LOCALIZACIÓN DE
DAÑOS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS USANDO SISTEMAS ACTIVOS
PIEZOELÉCTRICOS

NIVIA MÉNDEZ JEFRY ALEXANDER

LAYA QUINTERO WILLIAM STIVEN



Universidad Santo Tomás
División de Ingenierías
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá D.C
2018

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE LOCALIZACIÓN DE
DAÑOS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS USANDO SISTEMAS ACTIVOS
PIEZOELÉCTRICOS

NIVIA MÉNDEZ JEFRY ALEXANDER

LAYA QUINTERO WILLIAM STIVEN

Proyecto de Grado

Director: ING. JAIME VITOLA OYAGA M.SC

Universidad Santo Tomás
División de Ingenierías
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá D.C
2018

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD

RECTOR GENERAL

R.P. FRAY JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O.P.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL

R.P. FRAY LUIS FRANCISCO SASTOQUE POVEDA, O.P.

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

R.P. FRAY MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.

SECRETARIO GENERAL

Dr. FABIO JARAMILLO SANTAMARIA

DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

FRAI LUIS ANTONIO ALFONSO VARGAS, O.P.

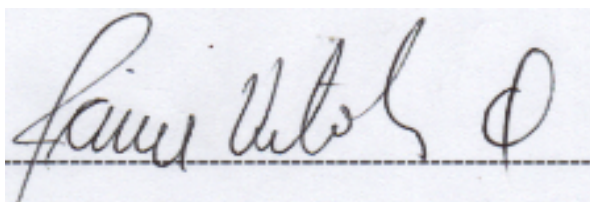
SECRETARIA DE DIVISIÓN

E.C. MYRIAM GÓMEZ COLMENARES

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ING. CARLOS ENRIQUE MONTENEGRO NARVÁEZ

NOTA DE ACEPTACIÓN

A handwritten signature in dark ink, written on a horizontal line. The signature is cursive and appears to read "Fanny Utrilla".

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

BOGOTÁ D.C. DICIEMBRE DE 2018

ADVERTENCIA

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por ser mi sustento en cada uno de los pasos que he dado en mi vida y ser el pilar de los valores que tengo, a mi familia por apoyarme en cada decisión que he tomado, a mis amigos por compartir momentos inolvidables, a mi novia por ser mi compañera de vida y una gran razón para seguir adelante, a todos y a cada uno de ellos muchas gracias y este paso que doy en este momento es para cada uno de ustedes.

Jefry Nivia

A todas las personas que aportaron en mi crecimiento académico y personal, especialmente a mi tía Rosa, que siempre ha sido mi apoyo incondicional en este camino que no fue fácil, a mi hija porque siempre será mi motivación y aliento. Agradezco a todos los que siempre confiaron en mí, pero, sobre todo, agradezco a los que no.

William Laya

Finalmente agradecemos a nuestro director Jaime Vitola por el tiempo, dedicación, conocimientos y apoyo que brindo a nuestro proyecto.

Índice General

Índice General	7
Índice de Figuras	9
Índice de Tablas.....	15
1. Introducción	16
1.1 Planteamiento del problema	17
1.2 Antecedentes	18
1.3 Justificación	20
1.4 Objetivos	21
1.4.1 General	21
1.4.2 Específicos	21
1.5 Marco Teórico	22
1.5.1 Monitoreo de Salud Estructural	22
1.5.2 Sensores Piezoeléctricos	23
1.5.3 Reconocimiento de Patrones	24
1.5.4 Correlación Cruzada	25
1.5.5 Normalización.....	26
1.5.6 Filtro Savitzky Golay	27
1.5.7 Ondas Lamb.....	28
1.6 Diseño Metodológico	29
1.6.1 Prototipo	29
1.6.2 Población.....	33
1.6.3 Muestra	33
1.6.4 Técnica de Recolección de Datos	33
1.7 Instrumentos.....	34

1.7.1	Matlab	34
1.7.2	(Procesamiento de datos)	34
1.7.3	Tarjeta Multiplexor.....	35
1.7.4	Handyscope HS4.....	36
1.7.5	Handyscope HS5.....	36
2.	Metodología	38
2.1	Caracterización para estudio base	39
2.1.1	Normalización.....	44
2.1.2	Filtro de Savitsky Golay	45
2.1.3	Correlación	46
2.1.4	Organización.....	48
2.1.5	Promedio	51
2.1.6	Desviación Estándar	52
2.2	Predicción Final	54
3.	Resultados	60
4.	Conclusiones.....	75
5.	Trabajo Futuro.....	77
6.	Anexos	78
6.1	Resultados 3 sensores Sin Filtro Golay.....	78
6.2	Resultados 3 sensores con Filtro Golay.....	90
6.3	Resultados 4 sensores sin Filtro Golay	101
6.4	Resultados 4 sensores con Filtro Golay.....	112
6.5	Resultados 6 sensores sin Filtro Golay	123
6.6	Resultados 6 sensores con Filtro Golay.....	133
7.	Modelo Matemático	58
8.	Referencias.....	144

Índice de Figuras

Figura 1. Sensor Piezoeléctrico	23
Figura 2. Modelo simplificado de un sensor piezoeléctrico.....	24
Figura 3. Esquema general de sistema de reconocimiento de patrones	25
Figura 4. Técnicas estadísticas de correlación	26
Figura 5. Filtro Savitsky Golay	27
Figura 6. Modelo simplificado de un sensor piezoeléctrico.....	28
Figura 7. Medidas para placas de aluminio.....	29
Figura 8. Placa de aluminio 3 Sensores	30
Figura 9. Placa de aluminio 4 Sensores	30
Figura 10. Placa de aluminio 6 Sensores	31
Figura 11. Esquema Diseño Metodológico.....	33
Figura 12. Tarjeta Multiplexor.....	35
Figura 13. Handyscope HS4.....	36
Figura 14. Handyscope HS5.....	37
Figura 15. Esquemático de conexiones, placa de aluminio con tres sensores piezoeléctricos	38
Figura 16. Esquemático de conexiones, placa de aluminio con cuatro sensores piezoeléctricos	39
Figura 17. Esquemático de conexiones, placa de aluminio con seis sensores piezoeléctricos	39
Figura 18. Ubicación Daños Placa 3 sensores	40
Figura 19. Ubicación Daños Placa 4 sensores	40
Figura 20. Ubicación Daños Placa 6 sensores	41
Figura 21. Esquema Adquisición para placa 3 sensores.....	42
Figura 22. Esquema Adquisición para placa 4 sensores.....	42
Figura 23. Esquema Adquisición para placa 6 sensores.....	43
Figura 24. Organización para normalización de los datos	44
Figura 25. Normalización para señal Sensor 1	45
Figura 26. Normalización para señal Sensor 1	46
Figura 27. Proceso Correlación para placa de 3 Sensores.....	47
Figura 28. Proceso Correlación para placa de 4 Sensores.....	47
Figura 29. Proceso Correlación para placa de 6 Sensores.....	48

Figura 30. Esquema para matriz 3x3 en placa de 3 sensores.....	49
Figura 31. Esquema para matriz 4x4 en placa de 4 sensores.....	49
Figura 32. Esquema para matriz 6x6 en placa de 6 sensores.....	50
Figura 33. Manejo de la Variable “Resultados. Mat” para cada placa.....	51
Figura 34. Manejo de la Variable “Promedio” para cada placa	52
Figura 35. Organización de datos para desviación estándar.....	53
Figura 36. Estructura del archivo “VecDesviación.mat”	54
Figura 37. Resta de Promedios según nueva muestra	55
Figura 38. Correlación entre estudios y Datos Nuevos.....	56
Figura 39. Archivos Generados por los estudios para prueba de 6 sensores	61
Figura 40. Escalas de colores utilizadas en Matlab	63
Figura 41. Representación gráfica en mapa de codificación de color de las placas	64
Figura 42.(MT) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 3 sensores.....	65
Figura 43.(MT) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 4 sensores.....	65
Figura 44.(MT) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 6 sensores.....	66
Figura 45. Interfaz de usuario GUI de Matlab	67
Figura 46. (Interfaz Gráfica) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 3 sensores	70
Figura 47. (Interfaz Gráfica) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 4 sensores	70
Figura 48.(Interfaz Gráfica) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 6 sensores	71
Figura 49.(MT) para predicción daño en la ubicación 1, placa de 3 sensores	78
Figura 50.(MT) para predicción daño en la ubicación 2, placa de 3 sensores	79
Figura 51.(MT) para predicción daño en la ubicación 3, placa de 3 sensores	79
Figura 52. (MT) para predicción daño en la ubicación 4, placa de 3 sensores	80
Figura 53. (MT) para predicción daño en la ubicación 5, placa de 3 sensores	80
Figura 54. (MT) para predicción daño en la ubicación 6, placa de 3 sensores	81
Figura 55. (MT) para predicción daño en la ubicación 7, placa de 3 sensores	81
Figura 56. (MT) para predicción daño en la ubicación 8, placa de 3 sensores	82
Figura 57. (MT) para predicción daño en la ubicación 9, placa de 3 sensores	82
Figura 58. (MT) para predicción daño en la ubicación 10, placa de 3 sensores	83
Figura 59. (MT) para predicción daño en la ubicación 11, placa de 3 sensores	83
Figura 60. (MT) para predicción daño en la ubicación 12, placa de 3 sensores	84
Figura 61. (MT) para predicción daño en la ubicación 13, placa de 3 sensores	84

Figura 62. (MT) para predicción daño en la ubicación 14, placa de 3 sensores	85
Figura 63. (MT) para predicción daño en la ubicación 15, placa de 3 sensores	85
Figura 64. (MT) para predicción daño en la ubicación 16, placa de 3 sensores	86
Figura 65. (MT) para predicción daño en la ubicación 17, placa de 3 sensores	86
Figura 66. (MT) para predicción daño en la ubicación 18, placa de 3 sensores	87
Figura 67. (MT) para predicción daño en la ubicación 19, placa de 3 sensores	87
Figura 68. (MT) para predicción daño en la ubicación 20, placa de 3 sensores	88
Figura 69. (MT) para predicción daño en la ubicación 21, placa de 3 sensores	88
Figura 70. (MT) para predicción daño en la ubicación 22, placa de 3 sensores	89
Figura 71. (MT) para predicción daño en la ubicación 23, placa de 3 sensores	89
Figura 72. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 1, placa de 3 sensores.....	90
Figura 73. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 2, placa de 3 sensores.....	90
Figura 74. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 3, placa de 3 sensores.....	91
Figura 75. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 4, placa de 3 sensores.....	91
Figura 76. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 5, placa de 3 sensores.....	92
Figura 77. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 6, placa de 3 sensores.....	92
Figura 78. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 7, placa de 3 sensores.....	93
Figura 79. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 8, placa de 3 sensores.....	93
Figura 80.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 9, placa de 3 sensores.....	94
Figura 81.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 10, placa de 3 sensores.....	94
Figura 82.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 11, placa de 3 sensores.....	95
Figura 83.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 12 , placa de 3 sensores.....	95
Figura 84.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 13, placa de 3 sensores.....	96
Figura 85.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 14, placa de 3 sensores.....	96
Figura 86.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 15, placa de 3 sensores.....	97
Figura 87.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 16, placa de 3 sensores.....	97
Figura 88.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 17, placa de 3 sensores.....	98
Figura 89.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 18, placa de 3 sensores.....	98
Figura 90.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 19, placa de 3 sensores.....	99
Figura 91.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 20, placa de 3 sensores.....	99
Figura 92.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 21, placa de 3 sensores....	100
Figura 93.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 22, placa de 3 sensores....	100

Figura 94.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 23, placa de 3 sensores....	101
Figura 95. (MT) para predicción daño en la ubicación 1, placa de 4 sensores	101
Figura 96.(MT) para predicción daño en la ubicación 2, placa de 4 sensores	102
Figura 97.(MT) para predicción daño en la ubicación 3, placa de 4 sensores	102
Figura 98.(MT) para predicción daño en la ubicación 4, placa de 4 sensores	103
Figura 99.(MT) para predicción daño en la ubicación 5, placa de 4 sensores	103
Figura 100.(MT) para predicción daño en la ubicación 6, placa de 4 sensores	104
Figura 101.(MT) para predicción daño en la ubicación 7, placa de 4 sensores	104
Figura 102.(MT) para predicción daño en la ubicación 8, placa de 4 sensores	105
Figura 103.(MT) para predicción daño en la ubicación 9, placa de 4 sensores	105
Figura 104.(MT) para predicción daño en la ubicación 10, placa de 4 sensores	106
Figura 105.(MT) para predicción daño en la ubicación 11, placa de 4 sensores	106
Figura 106.(MT) para predicción daño en la ubicación 12 , placa de 4 sensores	107
Figura 107.(MT) para predicción daño en la ubicación 13, placa de 4 sensores	107
Figura 108.(MT) para predicción daño en la ubicación 14, placa de 4 sensores	108
Figura 109.(MT) para predicción daño en la ubicación 15, placa de 4 sensores	108
Figura 110.(MT) para predicción daño en la ubicación 16, placa de 4 sensores	109
Figura 111.(MT) para predicción daño en la ubicación 17, placa de 4 sensores	109
Figura 112.(MT) para predicción daño en la ubicación 18, placa de 4 sensores	110
Figura 113.(MT) para predicción daño en la ubicación 19, placa de 4 sensores	110
Figura 114.(MT) para predicción daño en la ubicación 20, placa de 4 sensores	111
Figura 115.(MT) para predicción daño en la ubicación 21, placa de 4 sensores	111
Figura 116.(MT) para predicción daño en la ubicación 22, placa de 4 sensores	112
Figura 117.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 1, placa de 4 sensores....	112
Figura 118.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 2, placa de 4 sensores....	113
Figura 119.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 3, placa de 4 sensores....	113
Figura 120.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 4, placa de 4 sensores....	114
Figura 121.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 5, placa de 4 sensores....	114
Figura 122.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 6, placa de 4 sensores....	115
Figura 123.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 7, placa de 4 sensores....	115
Figura 124.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 8, placa de 4 sensores....	116
Figura 125.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 9, placa de 4 sensores....	116

Figura 126.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 10, placa de 4 sensores..	117
Figura 127.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 11, placa de 4 sensores..	117
Figura 128.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 12 , placa de 4 sensores.	118
Figura 129.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 13, placa de 4 sensores..	118
Figura 130.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 14, placa de 4 sensores..	119
Figura 131.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 15, placa de 4 sensores..	119
Figura 132.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 16, placa de 4 sensores..	120
Figura 133.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 17, placa de 4 sensores..	120
Figura 134.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 18, placa de 4 sensores..	121
Figura 135.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 19, placa de 4 sensores..	121
Figura 136.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 20, placa de 4 sensores..	122
Figura 137.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 21, placa de 4 sensores..	122
Figura 138.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 22, placa de 4 sensores..	123
Figura 139.(MT) para predicción daño en la ubicación 1, placa de 6 sensores	123
Figura 140.(MT) para predicción daño en la ubicación 2, placa de 6 sensores	124
Figura 141.(MT) para predicción daño en la ubicación 3, placa de 6 sensores	124
Figura 142.(MT) para predicción daño en la ubicación 4, placa de 6 sensores	125
Figura 143.(MT) para predicción daño en la ubicación 5, placa de 6 sensores	125
Figura 144.(MT) para predicción daño en la ubicación 6, placa de 6 sensores	126
Figura 145.(MT) para predicción daño en la ubicación 7, placa de 6 sensores	126
Figura 146.(MT) para predicción daño en la ubicación 8, placa de 6 sensores	127
Figura 147.(MT) para predicción daño en la ubicación 9, placa de 6 sensores	127
Figura 148.(MT) para predicción daño en la ubicación 10, placa de 6 sensores	128
Figura 149.(MT) para predicción daño en la ubicación 11 , placa de 6 sensores	128
Figura 150.(MT) para predicción daño en la ubicación 12, placa de 6 sensores	129
Figura 151.(MT) para predicción daño en la ubicación 13, placa de 6 sensores	129
Figura 152.(MT) para predicción daño en la ubicación 14, placa de 6 sensores	130
Figura 153.(MT) para predicción daño en la ubicación 15, placa de 6 sensores	130
Figura 154.(MT) para predicción daño en la ubicación 16, placa de 6 sensores	131
Figura 155.(MT) para predicción daño en la ubicación 17, placa de 6 sensores	131
Figura 156.(MT) para predicción daño en la ubicación 18, placa de 6 sensores	132
Figura 157.(MT) para predicción daño en la ubicación 19, placa de 6 sensores	132

Figura 158.(MT) para predicción daño en la ubicación 20, placa de 6 sensores	133
Figura 159.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 1, placa de 6 sensores....	133
Figura 160.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 2, placa de 6 sensores....	134
Figura 161.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 3, placa de 6 sensores....	134
Figura 162.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 4, placa de 6 sensores....	135
Figura 163.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 5, placa de 6 sensores....	135
Figura 164.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 6, placa de 6 sensores....	136
Figura 165.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 7, placa de 6 sensores....	136
Figura 166.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 8, placa de 6 sensores....	137
Figura 167.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 9, placa de 6 sensores....	137
Figura 168.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 10, placa de 6 sensores..	138
Figura 169.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 11, placa de 6 sensores..	138
Figura 170.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 12, placa de 6 sensores..	139
Figura 171.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 13, placa de 6 sensores..	139
Figura 172.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 14, placa de 6 sensores..	140
Figura 173.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 15, placa de 6 sensores..	140
Figura 174.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 16, placa de 6 sensores..	141
Figura 175.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 17, placa de 6 sensores..	141
Figura 176.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 18, placa de 6 sensores..	142
Figura 177.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 19, placa de 6 sensores..	142
Figura 178.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 20, placa de 6 sensores..	143

Índice de Tablas

Tabla 1. Ejemplo de Roles para un sistema de 3 sensores piezoeléctricos.....	31
Tabla 2. Ejemplo de Resultados para una muestra de 6 sensores.....	57
Tabla 3. Tiempo estimado de procesamiento en Matlab	61
Tabla 4. placa de 3 sensores sin filtro Golay	72
Tabla 5. placa de 3 sensores con filtro Golay	72
Tabla 6.placa de 4 sensores sin filtro Golay	73
Tabla 7.placa de 4 sensores con filtro Golay.....	73
Tabla 8. placa de 6 sensores sin filtro Golay	74
Tabla 9. placa de 6 sensores con filtro Golay	74

1. Introducción

La utilización e implementación de estrategias o técnicas que tienen como objetivo principal la identificación, caracterización o localización de daños en estructuras, se conoce como Monitoreo de Salud Estructural (SHM), esta tecnología se desarrolla o se implementa en diferentes escenarios como por ejemplo el aeronáutico, mecánico y civil, donde es indispensable garantizar el correcto estado y funcionamiento de las estructuras, de esta manera evitando riesgos catastróficos y pérdidas económicas enormes.

En las últimas décadas el desarrollo SHM ha sido de vital importancia para la implementación de sistemas que se encargan de pronosticar, detectar y/o localizar daños sobre estructuras que con el tiempo se degradan, dado que están expuestas a factores que pueden afectar su funcionalidad. Los beneficios que derivan de la utilización de estas tecnologías son numerosos, entre los que se encuentran el ser capaz de conocer el estado actual de una estructura, el estado futuro de la misma, reducir costos y tiempos de mantenimiento entre otros.

En este proyecto se implementa un sistema de sensores activos piezoeléctricos adheridos a diferentes muestras de aluminio para el desarrollo de un algoritmo estadístico que permite la detección y localización de daños en este tipo de estructuras. Dicho sistema se excita mediante ondas vibratorias que se propagan por toda la estructura, facilitando la extracción de características dinámicas (tanto para la estructura sin daño como para la estructura con daño), que permiten el reconocimiento de patrones y la caracterización de los mismos. Estos patrones son analizados y comparados estadísticamente para determinar la zona donde se encuentra el daño (Localización).

1.1 Planteamiento del problema

En diferentes áreas de la ingeniería tales como mecánica, civil y aeronáutica, así como en ambientes industriales donde se presentan daños o degradación de sistemas estructurales, se destaca una metodología importante conocida como monitoreo de salud estructural (SHM: Structural health monitoring) [2], la cual se encarga de la detección y localización de anomalías que puedan afectar el óptimo funcionamiento de estructuras que cumplen con alguna tarea específica

Existen diversas técnicas que permiten determinar la presencia y/o ubicación de cambios estáticos y dinámicos en estructuras, dichas técnicas buscan reducir costos de inspección y tiempos de alerta. Una de estas técnicas es la utilización de sistemas activos piezoeléctricos que mediante la excitación de un conjunto de sensores piezoeléctricos distribuidos en la estructura y, aprovechando el efecto directo e inverso de los mismos, se pueden adquirir señales que permiten la caracterización de daños en la estructura.

En el presente proyecto de grado se busca desarrollar un algoritmo que procese aquellas señales, con el fin de localizar los daños que posee una pieza de metal (aluminio), de esta manera desarrollar una metodología confiable con la cual se puedan evaluar estructuras metálicas en tiempo real [3].

1.2 Antecedentes

En la actualidad, los métodos de detección de daños en estructuras a través de cambios en su comportamiento dinámico son objeto de estudio en la mayoría de los centros de investigación, el SHM se ha convertido en una forma destacada para crear un ensayo no destructivo, históricamente métodos ultrasónicos, acústicos, magnéticos y muchos más se empezaron a desarrollar a mediados de los 70's en el ámbito de la aeronáutica [4].

El estudio estructural aeronáutico siempre ha sido de gran importancia, ya que las condiciones que soporta la estructura son extremas y los daños que pueden afectarla podrían llevar el sistema a originar una catástrofe, en este contexto, las tecnologías de supervisión SHM pueden permitir la ubicación automática de defectos debido a los impactos.

Con el transcurrir del tiempo se han desarrollado diferentes metodologías como la utilizada por Han, Y, Misra, A. K., & Mateescu en 2005 donde se empleó la vibración junto con sensores piezoeléctricos y actuadores adheridos a la superficie de la estructura, resultando de esta manera en la detección más fácil de grietas. La forma y la amplitud de la diferencia de tensión de salida de pares de sensores piezoeléctricos, se usaron para determinar la ubicación de anomalías [5].

Teniendo en cuenta las perturbaciones dinámicas en las estructuras, en la universidad JINAN de China en el año 2010 diseñaron métodos algorítmicos basados en filtros Kalman, metodología utilizada para abordar problemas dinámicos generales en el procesamiento de señales [6]. Por otro lado, se consideró la función de respuesta de frecuencia medida (FRF) como patrón de daños en estructuras, apoyándose en el análisis de componentes principales (PCA), el algoritmo se basa en los datos de FRF e independiente del modelo de estructura, lo que lo hace aplicable para el monitoreo de salud estructural [7].

Entre el número de enfoques SHM, el basado en ondas guiadas (OW) es considerado como el más prometedor y versátil. Algunas de las ventajas principales de esta técnica incluyen capacidades de escaneado rápido, inspección a bajo costo, de largo alcance y pruebas de componentes inaccesibles o complejos.

Trabajos revisados, llevan a cabo estrategias de procesamiento de señales para localizar defectos en las alas de los aviones mediante el análisis de ondas ultrasónicas guiadas, que son generadas y recibidas por sensores piezoeléctricos. Usualmente las ondas propagadas son conocidas como ondas lamb que al hacer contacto con la estructura permiten la ubicación y evaluación de daños en la misma [8].

Recientemente se centran los esfuerzos en el control predecible de la salud de los componentes estructurales donde se requiere desarrollo de técnicas avanzadas de detección y localización, capaces de proporcionar información cuantitativa sobre el estado de daño de los materiales estructurales.

[Laurence J. Jacobs] en el 2016, comparó métodos ultrasonidos lineales convencionales que sólo pueden detectar grietas o características en el orden de la longitud de onda de la onda ultrasónica, los ultrasonidos no lineales fueron sensibles a las características micro estructurales que son muchos órdenes de magnitud más pequeños que la longitud de onda. En este estudio se concluyó que la segunda generación de armónicos (SHG) como método ultrasónico no lineal, es capaz de detectar cambios micro estructurales en metales [9].

1.3 Justificación

El SHM o Monitoreo de Salud Estructural abarca un grupo de técnicas amplio, que son implementadas en diferentes campos de la ingeniería, con el fin de prever o diagnosticar daños estructurales en determinado ámbito. La principal ventaja de esta metodología, es el permitir evaluación de riesgos de manera oportuna y en tiempo real, al igual que tener mayor precisión en los resultados que arroja, de esta manera se reducen costos de mantenimiento, esfuerzo, tiempo y lo más importante se evita la pérdida de vidas y dinero.

En virtud de lo señalado en el párrafo anterior, se hace necesario pensar en mejores metodologías que aporten al desarrollo del SHM. Es por esto que específicamente este proyecto de grado se centra en la creación de un algoritmo, que facilite la localización de daños en estructuras de aluminio de manera eficaz, precisa y en tiempo real.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Localizar daños en estructuras metálicas utilizando sistemas activos piezoeléctricos, mediante un algoritmo matemático implementado en el ambiente de desarrollo Matlab.

1.4.2 Específicos

- Diseñar e implementar un algoritmo que permita localizar daños en estructuras de aluminio.
- Conocer y determinar los patrones de señales deseadas y no deseadas en el algoritmo al momento de su implementación.
- Diseñar una interfaz gráfica para que el usuario pueda tener interacción con el algoritmo implementado.
- Estudiar técnicas de localización de daños en la estructura metálica escogida (aluminio).

1.5 Marco Teórico

Para el desarrollo del presente proyecto se requiere tener en cuenta ciertos conceptos teóricos los cuales son necesarios para la ejecución de los objetivos propuestos. Inicialmente se realiza la introducción a toda la temática que respecta a Monitoreo de Salud Estructural y sensores piezoeléctricos, posteriormente se aborda las técnicas que fueron necesarias para el desarrollo de la metodología como lo es el reconocimiento de patrones, normalización de datos, correlación de señales, ondas Lamb, filtro Savitzky-Golay.

1.5.1 Monitoreo de Salud Estructural

El proceso de implementación de diferentes tipos de estrategias para detectar, clasificar, localizar y caracterizar daños en estructuras complejas o no, implica profundizar en una disciplina conocida como Monitoreo de Salud Estructural (SHM por sus siglas en ingles). Una metodología SHM implica la observación y toma de muestras de la respuesta dinámica de la estructura bajo estudio, de donde se extraen características rigurosas que reciben posteriormente procesamiento digital y tratamiento estadístico, esto, con el fin de determinar el estado actual del material o estructura en mención.

Existen variedad de métodos que conllevan a la extracción de características, entre ellos cabe resaltar un método aplicado comúnmente en problemas de reconocimiento de patrones conocido como la correlación de cantidades, donde básicamente se determina la proporcionalidad o linealidad que hay en las mediciones o datos que se obtienen de un sistema u otro. De esta manera se pueden definir las características de una estructura sin daños y posteriormente evaluar las características cuando dicho sistema estructural presenta un cambio en su geometría, desde esa perspectiva se pretende abordar la detección y localización

de los daños de la estructura.

Algunos otros enfoques sobre cómo se realiza la extracción de características, involucran pruebas sobre el objeto de estudio, donde se somete la estructura a daños inducidos, pruebas de fatiga y corrosión, acumulando daños de manera acelerada para obtener características específicas sobre los cambios de la estructura.

El monitoreo de salud estructural, se realiza con el fin de controlar aspectos tales como la seguridad, la integridad y la durabilidad de las estructuras, buscando de esta manera distanciar los tiempos de mantenimiento de dicha estructura, reduciendo así la duración y mano de obra de inspecciones [12].

1.5.2 Sensores Piezoeléctricos

Es un dispositivo que funciona bajo el efecto piezoeléctrico descubierto en 1880 por los científicos Jacques y Pierre Curie que observaron la aparición de cierta polarización eléctrica que se forma en un material al deformarse cuando se le realiza un esfuerzo determinado, de igual manera, si al material se le aplica una diferencia de potencial entre sus dos caras, aparecerá una deformación, en la siguiente figura se observa un sensor piezoeléctrico en donde al electrodo que es donde se obtuvieron las señales está conectado al cable rojo mientras que el plato de metal que actúa como tierra está conectado al cable negro:

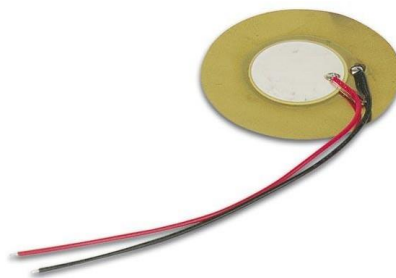
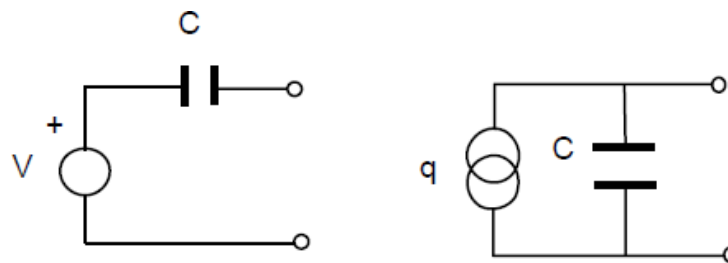


Figura 1. Sensor Piezoeléctrico

Tomada de: <http://idelectronica.com.mx/wp-content/uploads/2015/09/tv4.jpg>

Estos sensores tienen características que se observan en la siguiente figura que muestra el modelo simplificado de un sensor piezoeléctrico, siendo (v) la tensión de salida en vacío y (c) la capacidad física del sensor entre los terminales de salida del dispositivo, además este tipo de sensores utilizan medidas dinámicas debido a su respuesta en frecuencia, medidas donde la fuerza que se aplica al material ya sea de aceleración o presión sean variables, para poder leer la señal que arroja el sensor es necesario tener un amplificador de carga para convertir esta en una tensión que se pueda adquirir e interpretar en etapas posteriores de los procesos que se realicen con este tipo de sensores [13].



V = tensión a circuito abierto

C = capacidad del cristal

Figura 2. Modelo simplificado de un sensor piezoeléctrico

Tomada de: http://www.electroaula.cat/elec/pluginfile.php/5259/mod_folder/content/0/07piezoelectricos.pdf?forcedownload=1

1.5.3 Reconocimiento de Patrones

El reconocimiento de patrones es una ciencia que se encarga de la clasificación, descripción y reconocimiento de señales, en esta se trabaja para lograr identificar todos los posibles patrones individuales del objeto.

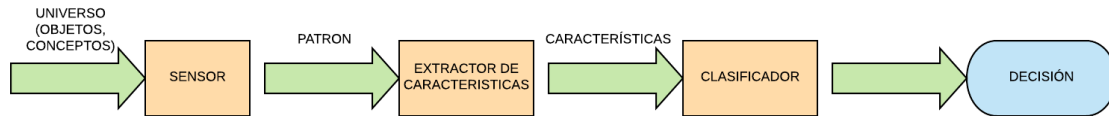


Figura 3. Esquema general de sistema de reconocimiento de patrones

Tomada de: <http://redyseguridad.fi-p.unam.mx/proyectos/biometria/basesteoricas/img/Untitled-1.gif>

La imagen anterior muestra un esquema general para un sistema de reconocimiento de patrones en el que los resultados de las etapas anteriores influyen en el procedimiento a realizar para la siguiente etapa, esto se hace con el fin de extraer la información más importante del comportamiento, así como discriminar lo irrelevante de este, en la etapa del clasificador se toman las decisiones del sistema con base a la extracción de los atributos que se hayan hecho del mismo y asigna los patrones de características a la categoría correcta.

El objetivo de las etapas mostradas anteriormente es lograr ajustar el sistema de tal manera que clasifique las señales que a este ingresen según las diferentes características del sistema, es útil en áreas de biometría para detección de rostros y en el caso de la detección de fallos en estructuras se realiza con el fin de clasificar las señales para determinar qué tipo de daño y la localización de este en la pieza [14].

1.5.4 Correlación Cruzada

En el procesamiento digital de señales conocidas también como covarianza cruzada, es una medida de paridad o similitud entre dos señales, utilizada comúnmente para caracterizar patrones de señales desconocidas mediante la comparación con patrones conocidos. La correlación cruzada a diferencia de la auto correlación compara patrones conocidos entre sí, por otro lado, posee características similares a la convolución de señales, diferenciándose de ella en el sentido que la correlación cruzada no implica la inversión de la señal como se

realiza en la convolución [18]. En la siguiente figura se detalla gráficamente la diferencia entre las tres técnicas estadísticas:

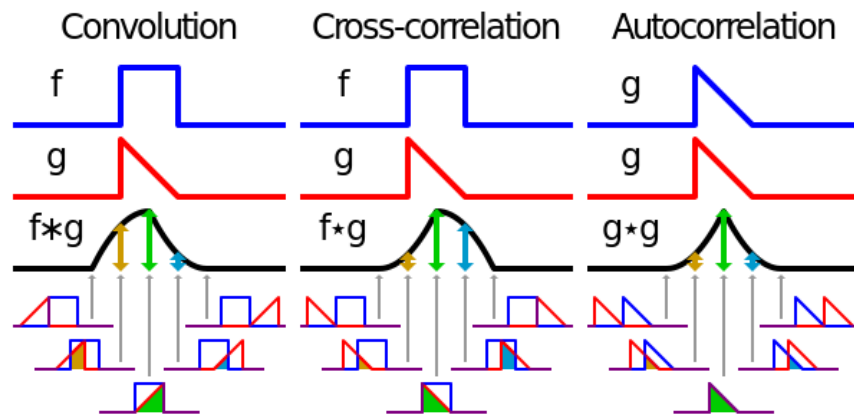


Figura 4. Técnicas estadísticas de correlación

La correlación cruzada se puede representar en matrices que están definidas por los coeficientes de correlación, que usualmente y en la mayoría de los casos son valores entre -1 y 1, estos representan que tan relacionadas se encuentran las muestras o datos en estudio. Uno de los factores desfavorables de este tipo de correlación son los valores atípicos de las señales que se comparan, dado que esto puede implicar relaciones de similitud erróneas.

1.5.5 Normalización

También conocida como distribución normal o Gaussiana, en el campo estadístico, lo que busca esta aplicación es realizar un ajuste en determinada distribución de datos con el fin de llevarlos a una escala común, usualmente a un valor promedio de la muestra en estudio. El objetivo principal de la normalización es la identificación de variaciones sistemáticas conservando los patrones característicos de la señal o muestra original, manteniéndola de esta manera en un rango definido.

1.5.6 Filtro Savitzky Golay

El filtro Golay es un filtro digital que es utilizado en determinados conjuntos de datos digitales con el fin de suavizarlos, aumentando de esta manera la relación entre la señal y el ruido sin distorsionar en gran medida las señales iniciales. Esto es posible debido a un proceso de convolución que se basa en la agrupación de puntos adyacentes de la señal mediante un método polinomial de mínimos cuadrados.

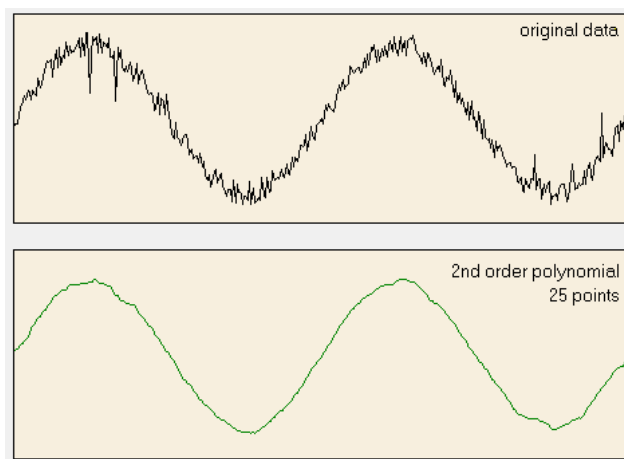


Figura 5. Filtro Savitsky Golay

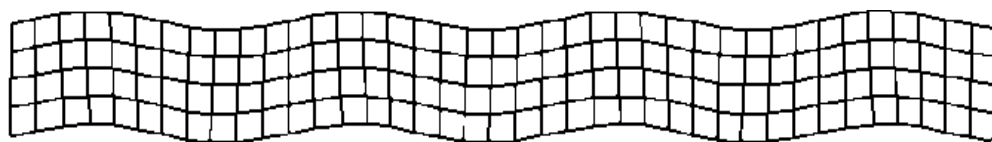
Este método fue popularizado por Abraham Savitzky y Marcel Golay, hoy en día tiene un gran campo de acción en el procesamiento de señales biomédicas, dado que la principal ventaja de implementación de este tipo de filtro es la no perturbación considerablemente la señal de entrada, preservando sus características más relevantes como los máximos y mínimos relativos

1.5.7 Ondas Lamb

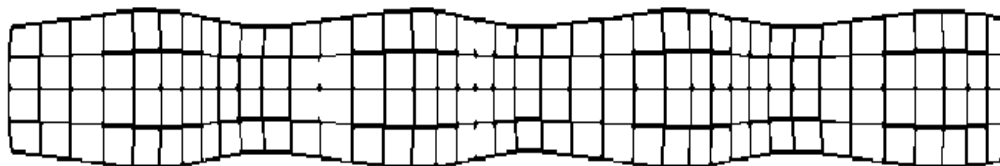
Son ondas características que se propagan en una placa con condición de frontera libre (La condición de frontera libre es aquella en donde teniendo una longitud finita, una onda incidente se refleja en una frontera denominándose así “eco”, al llegar a una frontera siendo esta un extremo libre, el pulso se verá reflejado en la dirección opuesta, pero con el mismo desplazamiento a la onda incidente), estas placas tienen probabilidades tanto de desplazamiento simétrico como asimétrico.

En la siguiente figura se muestran tanto el modelo simétrico como anti simétrico de desplazamiento de las ondas, siendo el modo de desplazamiento simétrico aquello en donde el desplazamiento por el espesor del elemento de estudio se hace de manera longitudinal, mientras que los modos asimétricos el desplazamiento se hace de modo transversal, la manera más común de describir estas características es mediante curvas de dispersión y están basados en la velocidad de fase (Es la tasa de propagación de una onda en el espacio, siendo también la velocidad a la que cualquier componente en frecuencia de esta se dispersa en el medio, para cada frecuencia se tendrá una velocidad de fase diferente).

Estas ondas son utilizadas para detectar grietas en placas y son útiles para establecer diferentes patrones y tener referencias que permitan identificar los defectos que estas tienen [15].



Movimiento Antisimetrico de una onda lamb



Movimiento Simetrico de una onda Lamb

Figura 6. Modelo simplificado de un sensor piezoeléctrico

Tomada de: <http://www.laser.uvigo.es/Investigacion/Metrologia/mcyt02/mcyt02.metrologia.es.html>

1.6 Diseño Metodológico

Se tuvieron en cuenta diferentes aspectos esenciales para el correcto desarrollo del proyecto, es decir, el material escogido para realizar las pruebas, la ubicación en las placas de los sensores piezoeléctricos según la cantidad (3,4 y 6), la cantidad de ubicaciones para los daños a evaluar en cada placa (23 ubicaciones para la placa con 3 sensores, 22 ubicaciones para la placa con 4 sensores y 20 ubicaciones para la placa con 6 sensores) incluyendo el patrón en cada una de estas, cada una de estas ubicaciones evidencian un daño en la placa y se simulan utilizando un imán, también se decide la cantidad de experimentos a tomar en cada placa para realizar la evaluación respectiva.

1.6.1 Prototipo

Debido a que en la industria aeronáutica el aluminio es uno de los materiales más utilizados en la construcción de todo tipo de aeronaves tripuladas y no tripuladas, además ofrece muchas ventajas como tener una baja densidad y ser altamente conductivo tanto eléctrica como térmicamente, se eligió el aluminio como material principal para realizar las pruebas necesarias, las placas de aluminio con las que se realizó esto tienen una dimensión de 38 cm de alto por 38 cm de ancho y se ubicaron un conjunto de transductores (sensores piezoeléctricos) en cada placa a cierta distancia uno del otro para las 3 placas como se observa a continuación de las figuras 5 a la 8:

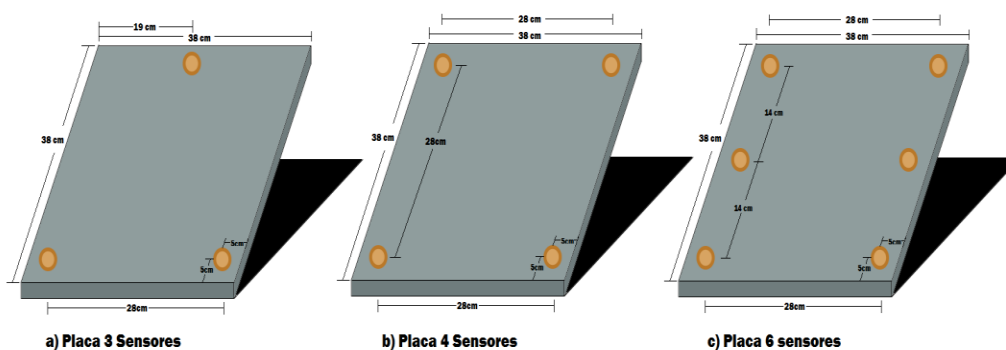


Figura 7. Medidas para placas de aluminio

Fuente: Autores



Figura 8. Placa de aluminio 3 Sensores



Figura 9. Placa de aluminio 4 Sensores

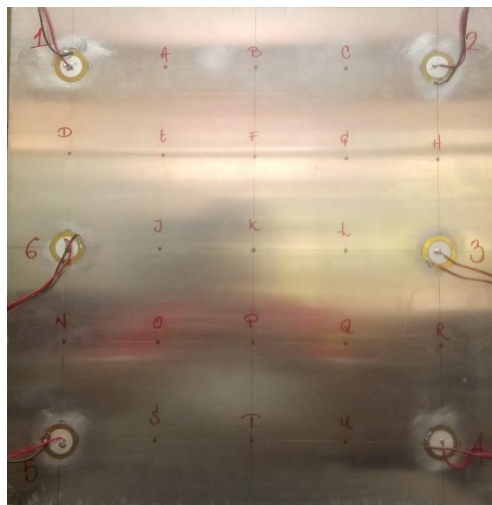


Figura 10. Placa de aluminio 6 Sensores

Las pruebas a estas placas se realizan mediante ondas Lamb a una frecuencia de 10 KHz excitando la placa de tal manera que hay tantas fases de actuación como sensores en la placa, en cada fase cada uno de los sensores posee un rol diferente ya sea de transmitir la onda o recibirla, por ejemplo, en un montaje de 3 sensores se tienen 3 fases y funciona de la siguiente manera:

	ROL PZT1		ROL PZT2		ROL PZT3	
	TRANSMISOR	RECEPTOR	TRANSMISOR	RECEPTOR	TRANSMISOR	RECEPTOR
FASE 1	X			X		X
FASE 2		X	X			X
FASE 3		X		X	X	

Tabla 1. Ejemplo de Roles para un sistema de 3 sensores piezoeléctricos

Primero se realizó la recolección de datos a cada placa para un total de 5 evaluaciones diferentes, cada evaluación tiene 100 experimentos con todas las

ubicaciones mencionadas anteriormente para las 3 placas existentes, estos resultados se almacenan, posteriormente se normalizan y se hacen dos tipos de estudios, el primero utilizando los datos normalizados directamente y haciendo el promedio de la correlación que arrojaba entre la señal del patrón y cada una de las ubicaciones en donde se tomaron datos para así lograr caracterizar cada una de estas y de esta manera crear una base o estudio para posteriormente comparar con nuevas muestras y con la metodología lograr identificar cada una de las localizaciones, en el segundo estudio se procesan los datos por un filtro Savitsky Golay y se procede con el mismo procedimiento mencionado anteriormente, por último se realizó la metodología que realiza la predicción según nuevas muestras para las placas y se hace la evaluación de cuál de los 2 tipos de estudio es más efectivo para el proyecto, de esta manera se realizó un esquema que simplifica el proceso de la metodología como se evidencia en la siguiente figura:

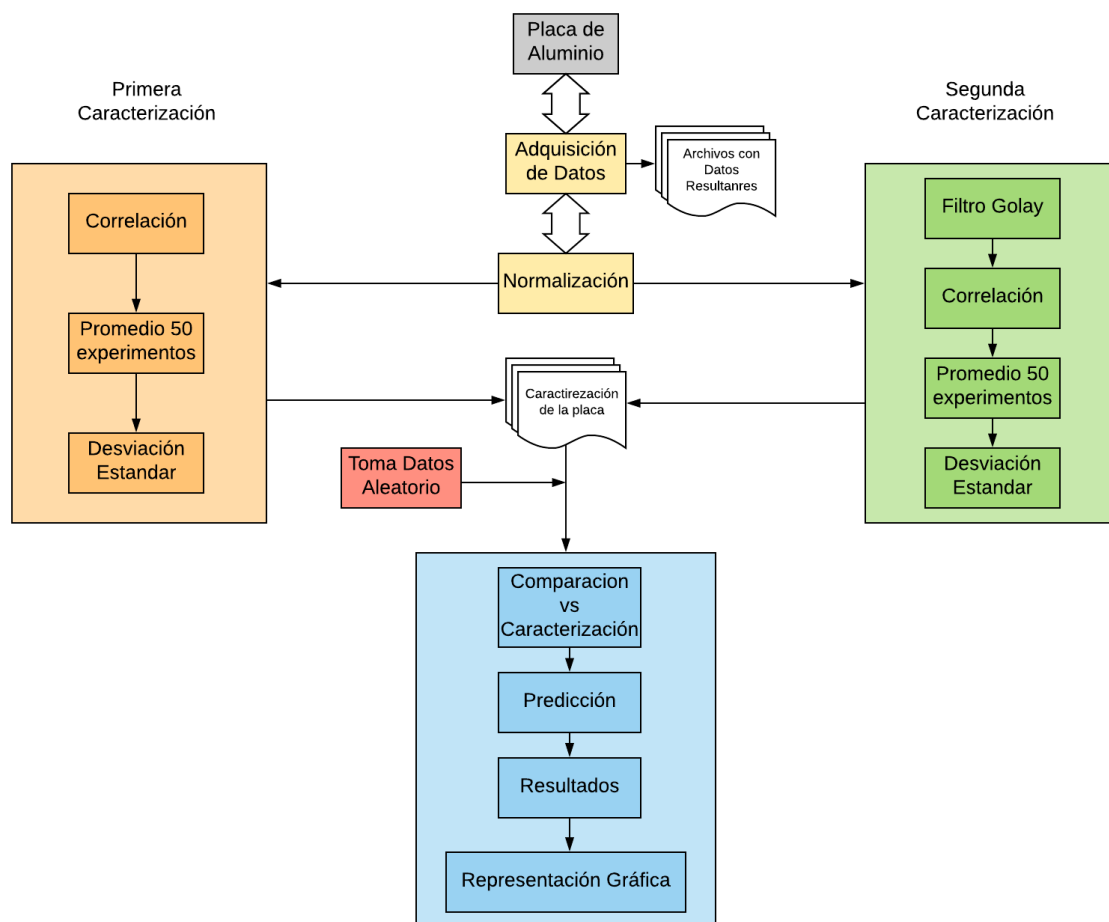


Figura 11. Esquema Diseño Metodológico

1.6.2 Población

La población del proyecto es la industria aeronáutica debido a que actualmente las aeronaves que están hechas de aluminio cuentan con mantenimiento preventivo y predictivo que tardan demasiado tiempo y en su mayoría son invasivos por lo tanto se requiere una metodología no invasiva capaz de evaluar en un corto tiempo la posible localización de un daño en estas estructuras haciendo más efectivo el proceso y disminuyendo los tiempos y costos para el mantenimiento.

1.6.3 Muestra

La muestra son las placas de aluminio de 38 cm x 38 cm con un grosor de 2.1 mm en las cuales se utilizaron sensores piezoeléctricos ubicados como se muestra de las figuras 5 a la 8, con las que posteriormente se realizó la predicción de la ubicación del daño con un imán adherido a la estructura generando la deformación geométrica simulada, la estructura de las placas de aluminio y su grosor son las mismas que las utilizadas en la industria aeronáutica con el fin de lograr escalar el proyecto para llevarlo a una fase práctica en los ambientes en los cuales las aeronaves desempeñan sus labores.

1.6.4 Técnica de Recolección de Datos

Se realizó la recolección de datos con base en diferentes pruebas que se hicieron a placas de aluminio con daños (Patrón) y sin daños en diferentes posiciones, se procesó las señales de salida del sistema activo piezoeléctrico y con ello se caracterizó y localizó daños con el algoritmo implementado que se planteó en el

ambiente de desarrollo MATLAB y representando de manera gráfica mediante un mapa de codificación de color los resultados obtenidos.

1.7 Instrumentos

El análisis de datos se centró específicamente en el reconocimiento de patrones de manera cuantitativa donde se tuvieron en cuenta señales deseadas y no deseadas caracterizando cada una de las ubicaciones en la placa, al ser procesadas y comparadas con una nueva toma de datos se determinó mediante el algoritmo, la localización del fallo correspondiente, para ello se utilizaron los siguientes componentes:

1.7.1 Matlab

Es la abreviatura de Matrix Laboratory y es una herramienta digital que permite tener un ambiente de desarrollo integrado donde se pueden trabajar vectores, matrices, representar datos y funciones además de tener la posibilidad de crear una interfaz gráfica para crear soluciones a problemas generados, maneja su propio lenguaje de programación (Lenguaje M) y fue la herramienta escogida para desarrollar la metodología de predicción de los daños.

1.7.2 (Procesamiento de datos)

El computador personal utilizado para realizar el procesamiento de datos tiene las siguientes características:

Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU - 3.60GHz – 64 Bits.

Xeon E3-1200 v3/4th Gen Core Processor PCI Express x16 Controller.

GM107 [GeForce GTX 750 Ti] - NVIDIA Corporation.

1.7.3 Tarjeta Multiplexor

Esta tarjeta fue utilizada debido a que lograba controlar cada iteración con cada uno de los transductores en su fase de actuación, la señal de excitación proviene del Handyscope HS5 que se conectaba a la entrada del multiplexor mientras que a sus salidas se conectaban los transductores junto con cada uno de los canales del Handyscope HS4, luego un programa diseñado por el ingeniero Darío Segura, identificaba la cantidad de sensores conectados configurando además la frecuencia de la señal de entrada, la cantidad de muestras necesarias y el nombre del experimento, finalmente todos los datos son digitalizados y almacenados en un archivo .mat, La tarjeta multiplexor está diseñada para un máximo de 8 canales como se muestra en la siguiente figura:



Figura 12. Tarjeta Multiplexor

1.7.4 Handyscope HS4

Es un osciloscopio USB de la empresa TiePie con 4 canales análogos simultáneos de alta resolución (12, 14, 16 bits), con una precisión vertical de 0,2% DC, también tiene un muestreo de hasta 50MS/s y un ancho de banda de 50MHz, tiene una memoria de muestreo de hasta 128K por canal, para el proyecto se requirió de 2 osciloscopios ya que el máximo de sensores utilizado en las placas es de 6, por lo tanto se necesitaban de hasta 6 canales en el experimento, para más información consulte la página “www.tiepie.com”, en la figura 11 se evidencia la utilización de estos 2 osciloscopios y sus respectivos 4 canales de referencias.



Figura 13. Handyscope HS4

1.7.5 Handyscope HS5

La figura 12 es un generador de onda arbitraria USB de la empresa TiePie con una frecuencia desde 1μHz hasta 40MHz para formas de onda sinusoidal, cuadrada, triangular, ondas de pulso y arbitrarias, su salida es desde -12v a 12v para 24Vpp, se pueden realizar formas de onda arbitrarias de 14 bits para el proyecto se requirió

un generador en una onda arbitraria con una frecuencia de 10KHz para todos los experimentos, para más información consulte la página “www.tiepie.com”.



Figura 14. Handyscope HS5

2. Metodología

Para darle solución al problema propuesto en el capítulo 2 (planteamiento del problema) se desarrolló una metodología basada en la predicción de la localización de un daño a partir de la previa caracterización de estos en diferentes ubicaciones para 3 placas de aluminio cada una con diferente cantidad de sensores, realizando las respectivas pruebas para comprobar la efectividad de la metodología, esta metodología cuenta con 2 fases principales las cuales son caracterización para estudio base y predicción final. Con esto se pretende elaborar un mecanismo confiable que simplifique la manera de identificar y localizar un daño en este tipo de estructuras facilitando el trabajo de mantenimiento.

Para realizar la adquisición de datos y su respectivo procesamiento se utilizaron los instrumentos mencionados en el capítulo 7.5, A continuación, se muestra cada uno de los esquemas de conexión de instrumentos para cada una de las placas de aluminio en estudio.

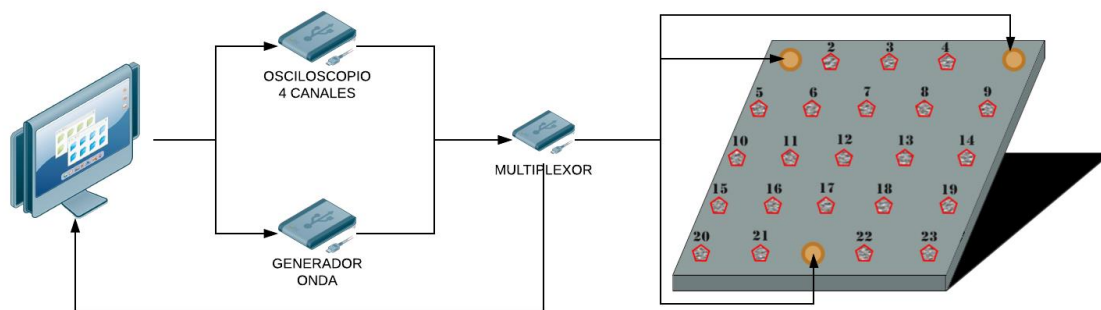


Figura 15. Esquemático de conexiones, placa de aluminio con tres sensores piezoeléctricos

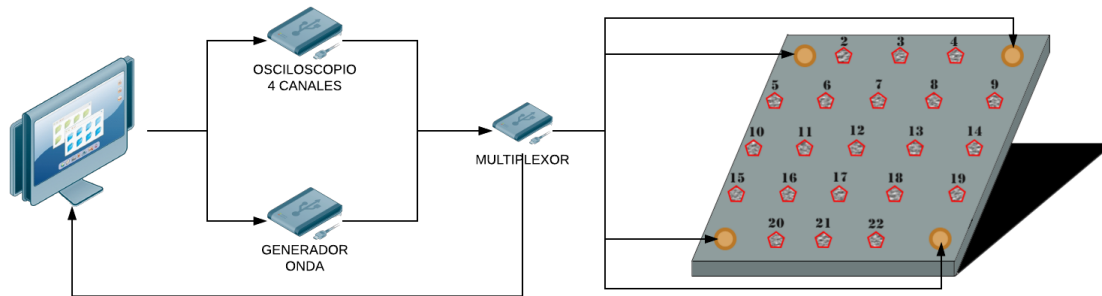


Figura 16. Esquemático de conexiones, placa de aluminio con cuatro sensores piezoeléctricos

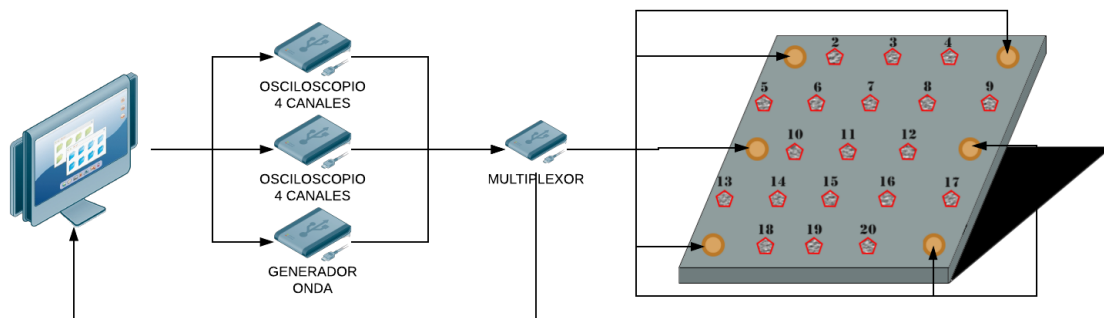


Figura 17. Esquemático de conexiones, placa de aluminio con seis sensores piezoeléctricos

2.1 Caracterización para estudio base

Según lo indicado en el diseño metodológico las muestras para el estudio son 3 placas de aluminio en las cuales para cada una se ubicaron sensores piezoeléctricos (PZT) como se observa en las figuras 6, 7 y 8, una a una estas placas se introdujeron en una incubadora para controlar el tema de ser bastante vulnerables al ruido ambiente que se presentaba en el lugar en el cual se adquirieron los datos, para la placa de 3 sensores se ubicó una cantidad de 22 daños, para la placa de 4 sensores se ubicó una cantidad de 21 daños y por ultimo para la placa de 6 sensores se ubicó una cantidad de 19 daños, cada uno de estos daños se

simulo mediante un imán ya que este afecta la forma como se propagan las Ondas Lamb en las placas, también se adquirió una medida de referencia que de ahora en adelante se conocerá como “patrón” para cada una de las estructuras, esta muestra se toma sin imán en la placa y refleja el comportamiento de la estructura “Sin Daño”, las siguientes figuras muestran la ubicación de los daños en su respectiva placa:

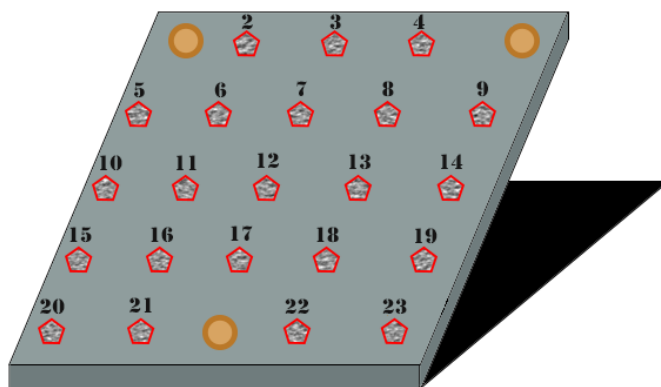


Figura 18. Ubicación Daños Placa 3 sensores

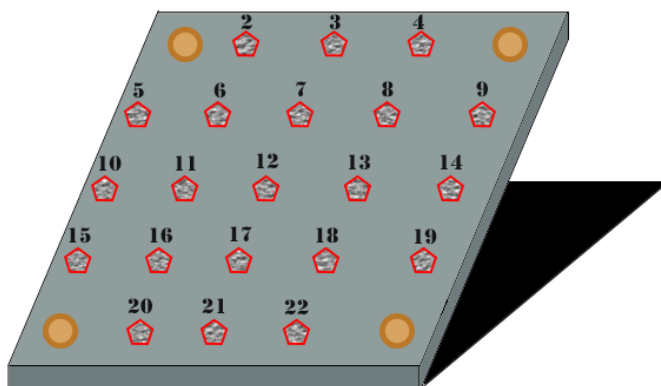


Figura 19. Ubicación Daños Placa 4 sensores

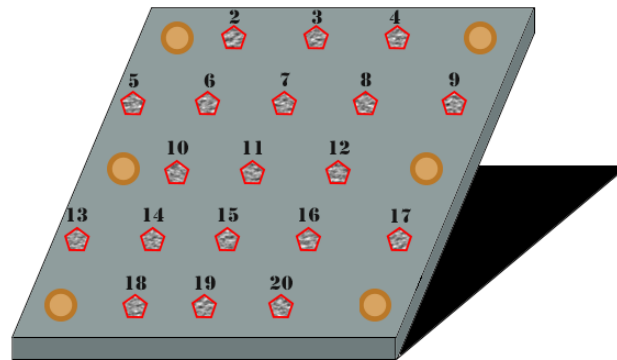


Figura 20. Ubicación Daños Placa 6 sensores

Para la adquisición de datos se decidió tener un conjunto de 100 experimentos por cada daño a evaluar con los cuales se empezó a trabajar identificando que no hubiera variaciones entre estos, es decir que cada uno de estos fuera homogéneo y no variara demasiado uno del otro, con esto se pudo corroborar 2 aspectos importantes para el proyecto, el primero y más importante es que se podría sacar una caracterización correcta en cada localización donde se fueran a tomar datos, para así tener un estudio correcto y que abarque todas las posibilidades de resultados ya que con la metodología diseñada se predeciría dónde estaría ubicado tomando una nueva muestra de daño. Y el segundo aspecto es verificar que todos los componentes estuvieran funcionando de manera correcta en el sistema, estos componentes tales como los sensores piezoeléctricos, la tarjeta multiplexor y las conexiones que estas conllevan, la adquisición para cada una de las placas se realizó de la siguiente manera:

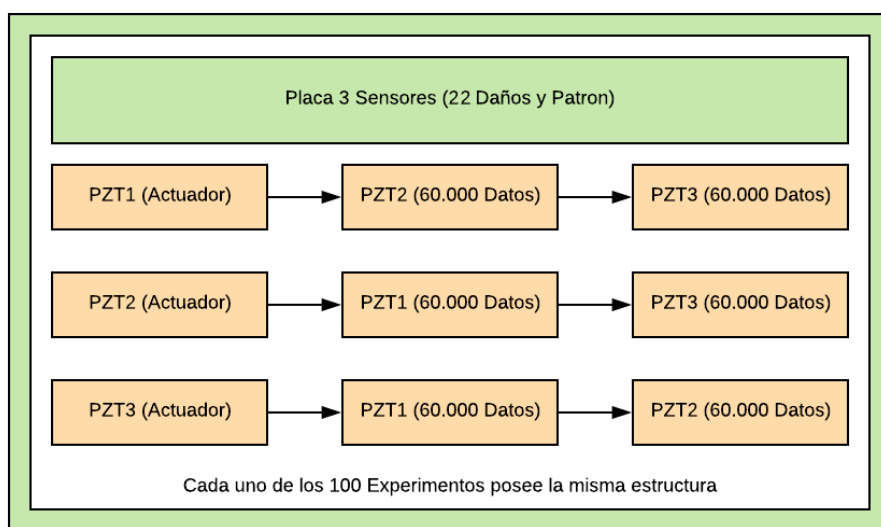


Figura 21. Esquema Adquisición para placa 3 sensores

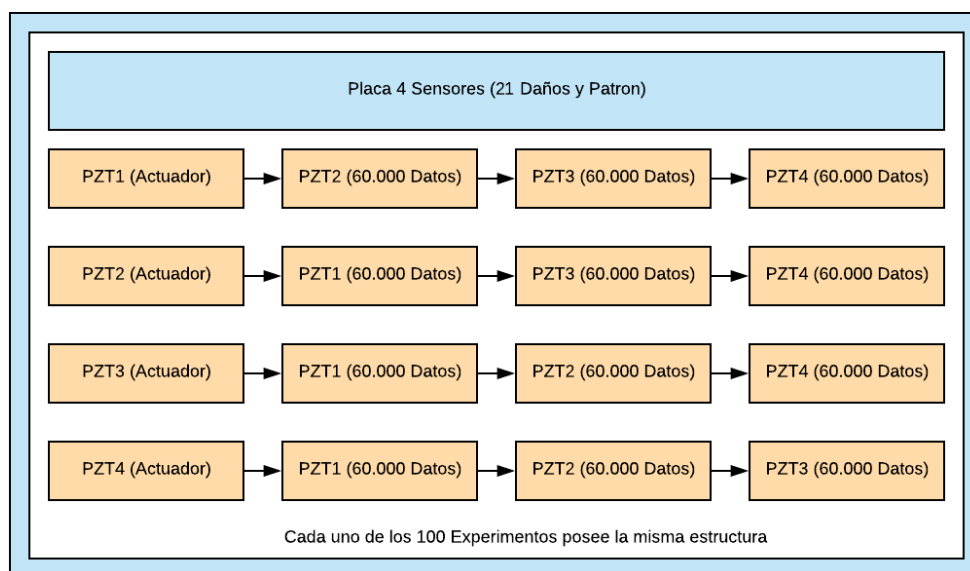


Figura 22. Esquema Adquisición para placa 4 sensores

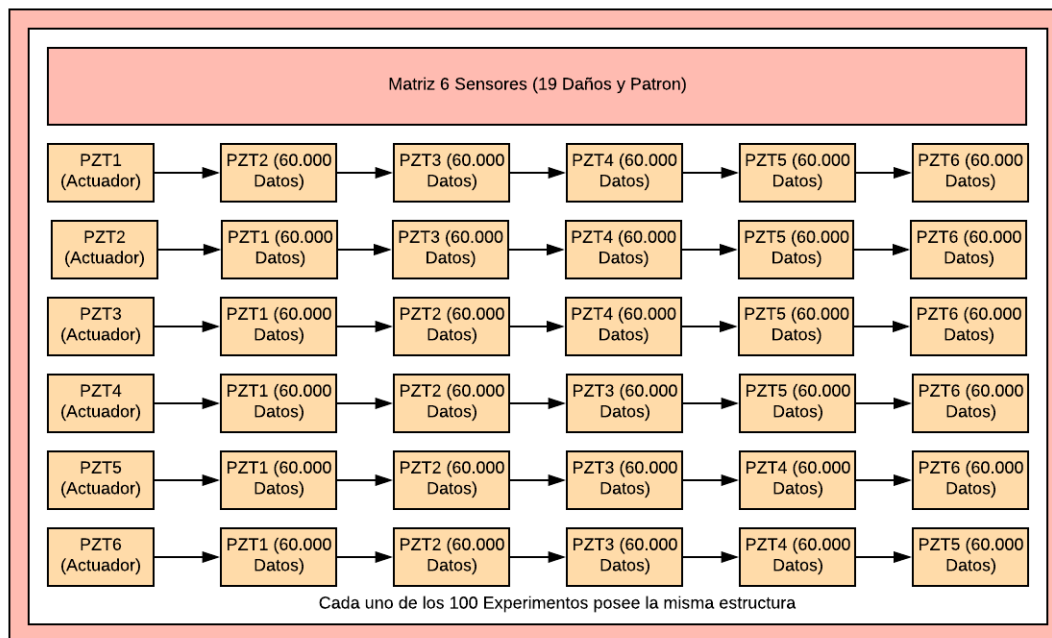


Figura 23. Esquema Adquisición para placa 6 sensores

Finalmente cabe resaltar que para cada daño tomado en una placa con X sensores se tiene una matriz $N \times M$ en donde N es el número de experimentos, en este caso 100 y M posee la siguiente ecuación " $M = (Cant\ Sensores - 1) * 60.000$ " por lo tanto los tamaños establecidos para los datos adquiridos de cada placa son:

3 Sensores: $[100 * 120.000]$

4 Sensores: $[100 * 180.000]$

6 Sensores: $[100 * 300.000]$

Cada uno de estos daños quedó guardado en una carpeta y en ella se puede encontrar un archivo (.mat) por cada sensor con los datos mencionados en la parte de arriba. Para tener suficientes muestras para comparar se tomaron 5 diferentes estudios completos a cada placa, con el primer estudio se procedió a realizar la caracterización de cada uno de los daños a evaluar y con los restantes 4 estudios se llevó a cabo una comparación y posterior predicción para identificar y localizar los daños, la idea de la metodología fue crear una base o como se menciona anteriormente una caracterización que consiste en encontrar unos patrones únicos

en cuanto a las señales que arroja el sistema al tomar datos con el imán simulando el daño en esa posición, este procedimiento se basa en una comparación del comportamiento de la estructura al momento de tomar los datos sin daño o Patrón y el comportamiento de esta con los diferentes daños, esto se llevó a cabo de la siguiente manera:

2.1.1 Normalización

El primer paso que se realizó para generar los archivos de estudio fue normalizar las señales que arrojo la adquisición de datos, esto se realizó con el fin de crear un estándar entre todas las medidas realizadas, también para poder hacer la comparación de estos datos con la nueva muestra para la predicción, para llevar este procedimiento a cabo, se tomó para cada sensor uno a uno los experimentos mencionados anteriormente y se organizaron los datos de la siguiente manera:

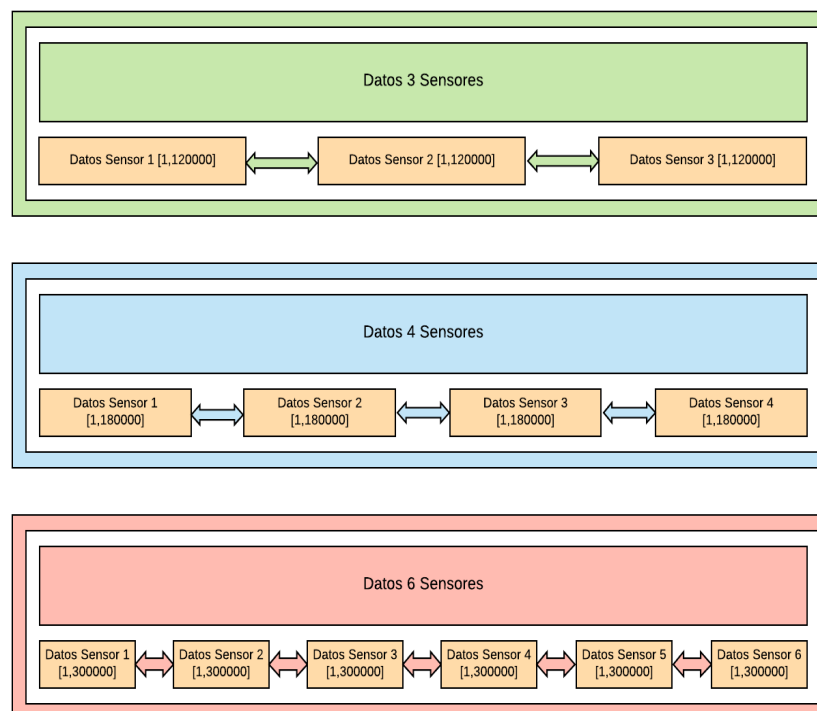


Figura 24. Organización para normalización de los datos

Se observa que al organizar los datos se genera para los datos una matriz de una fila por X columnas en donde $X = (N-1) * 60000$ siendo “N” el número de sensores, luego de eso se halló la norma de esa matriz, luego para normalizar se divide cada uno de los datos ubicados en la columna sobre esa norma, para finalizar se vuelven a posicionar los datos normalizados sensor por sensor, en la siguiente figura se observa el ejemplo de la señal de uno de los sensores antes y después de su normalización:

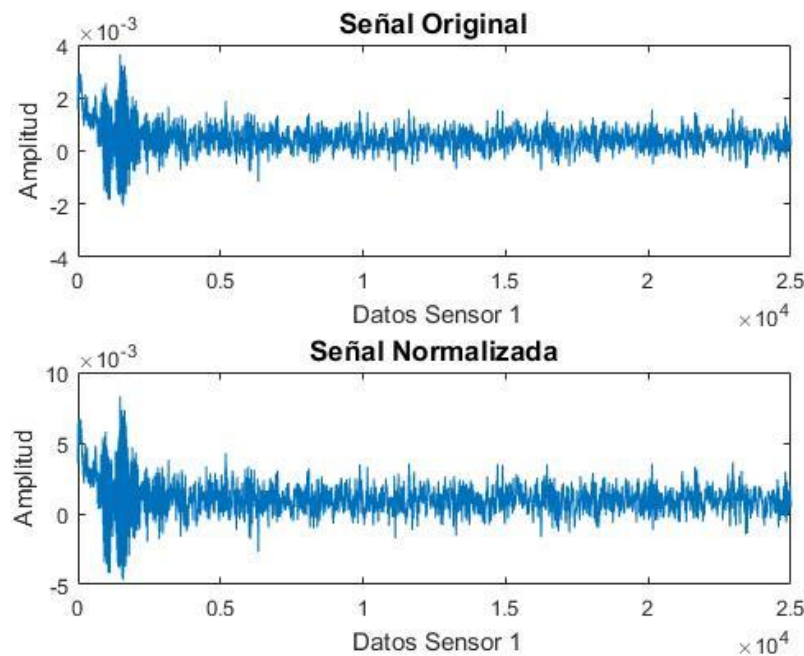


Figura 25. Normalización para señal Sensor 1

2.1.2 Filtro de Savitsky Golay

Debido a que se quería realizar una comparación de resultados entre una muestra sin filtro y una filtrada se recurrió al filtro de Savitsky Golay para crear el segundo estudio con el que también se llegaría a una predicción, este estudio tendría el mismo procedimiento de creación y los mismos datos base con la única diferencia que los datos luego de ser normalizados pasarían por este filtro, esto se realizó debido a que este tipo de procesamiento que se le hace a las señales cuenta con la ventaja de eliminar esas variaciones aleatorias que se presentan en estas y que son

más conocidas como ruido, esta técnica para el procesamiento de señales digitales tiene como objetivo aumentar la relación existente entre la señal y el ruido, además de mantener la longitud de onda inicial de la señal junto a sus máximos y mínimos correspondientes, para los filtros se realizó un filtro de suavizado a 51 puntos debido a que con este factor se observó un mejoramiento en la calidad de la señal inicial, a continuación se observa un ejemplo de una señal obtenida por uno de los sensores antes y después de pasar por el filtro Savitsky Golay:

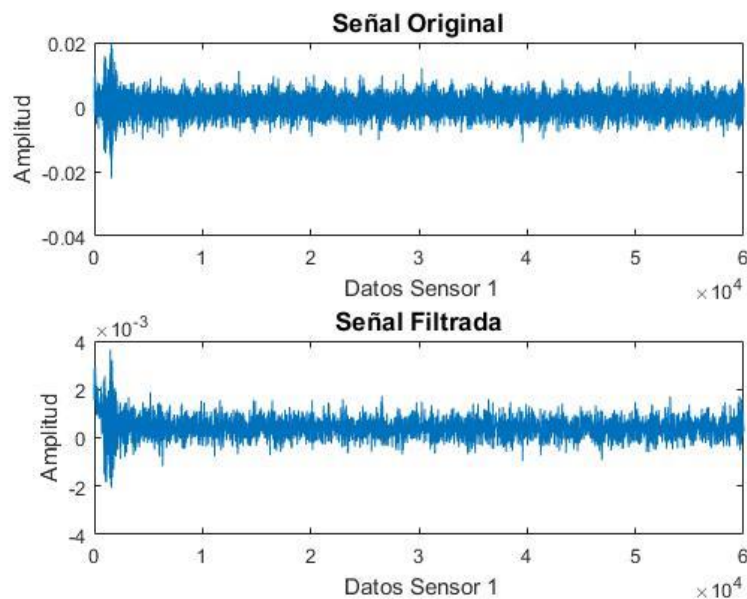


Figura 26. Normalización para señal Sensor 1

2.1.3 Correlación

Para el proyecto se utilizó la correlación cruzada de tal manera que mediante la comparación punto a punto de la señal patrón con la señal obtenida de los daños simulados con el imán, esto significa que se tiene en cuenta cada una de las señales de los sensores de la placa en las distintas fases de actuación que este presentara, se obtuviera una medida de similitud entre las 2 señales, esto a su vez permitió caracterizar cada una de las ubicaciones en la placa, este proceso se realizó de la siguiente manera:

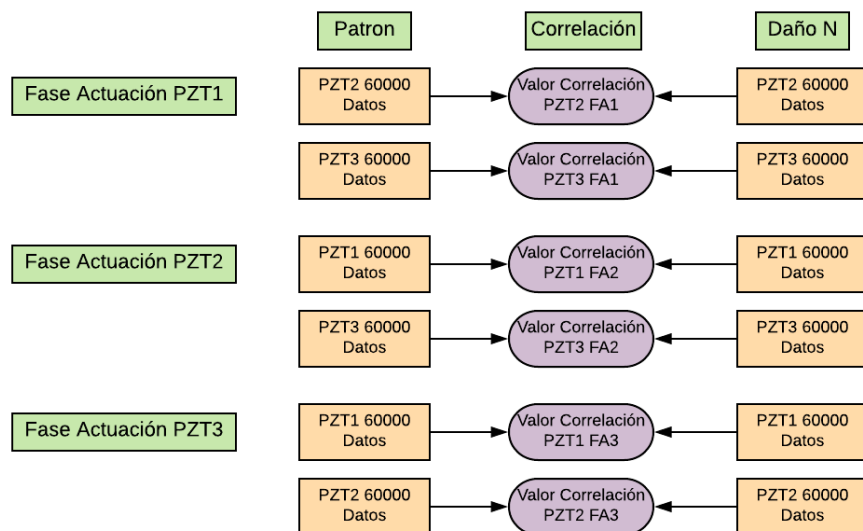


Figura 27. Proceso Correlación para placa de 3 Sensores

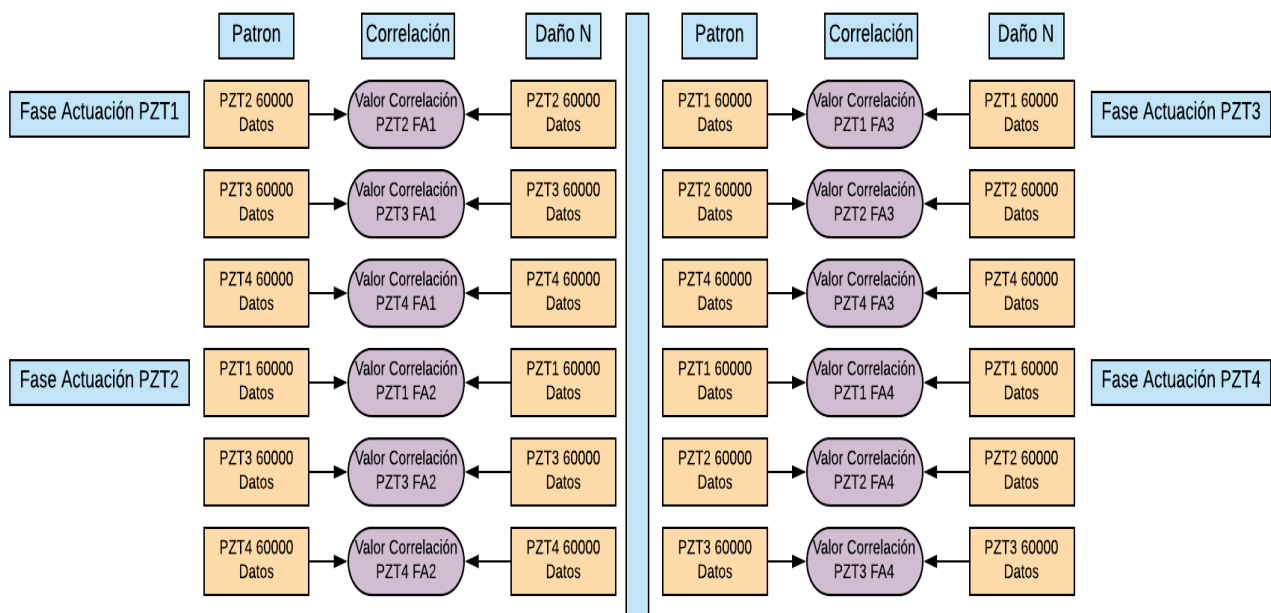


Figura 28. Proceso Correlación para placa de 4 Sensores

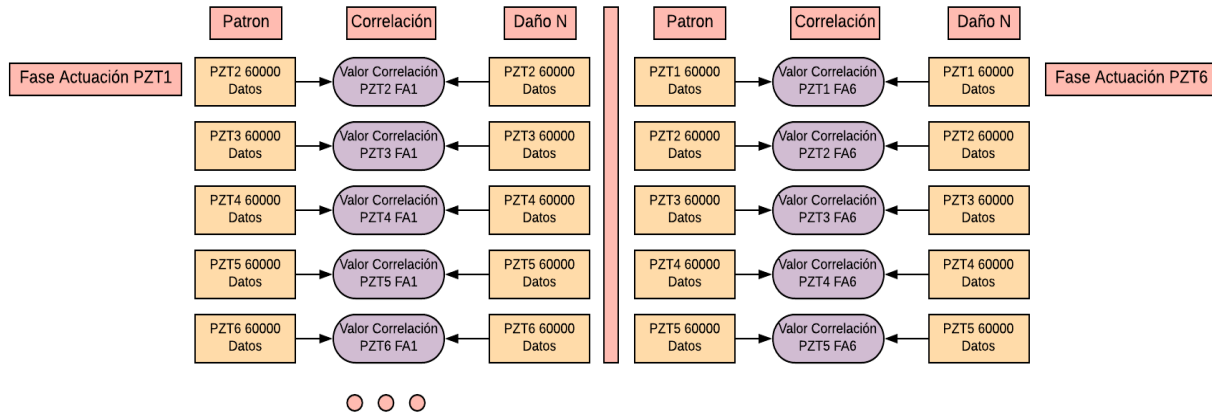


Figura 29. Proceso Correlación para placa de 6 Sensores

Luego de generar cada una de las correlaciones necesarias en cada placa estos resultados se guardan en una matriz $N \times N$ siendo N el número de sensores, su ubicación en esta matriz está dada por la fase de actuación correspondiente para la fila y el sensor que recibió la información para la columna, por ejemplo, para una placa de 3 sensores en la fase de actuación del PZT2, la correlación del sensor 3 con el patrón está ubicada en la posición [2,3].

2.1.4 Organización

Luego de Realizar todo el proceso de normalización y correlación de cada uno de las señales del patrón con las señales del daño que se va a evaluar punto a punto, se procede a organizar los datos de la siguiente manera teniendo en cuenta que el Sensor que tiene la función de actuador en cada una de las etapas no va a tener datos, entonces por defecto a esa ubicación se le dio el valor de 1; generando así, una matriz $N \times N$ siendo N el número de sensores como se observa en las siguientes figuras:

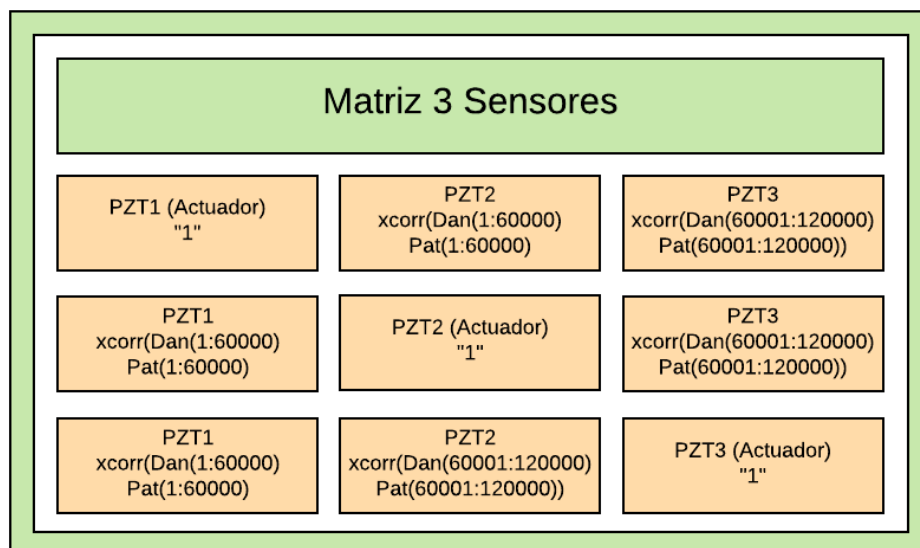


Figura 30. Esquema para matriz 3x3 en placa de 3 sensores

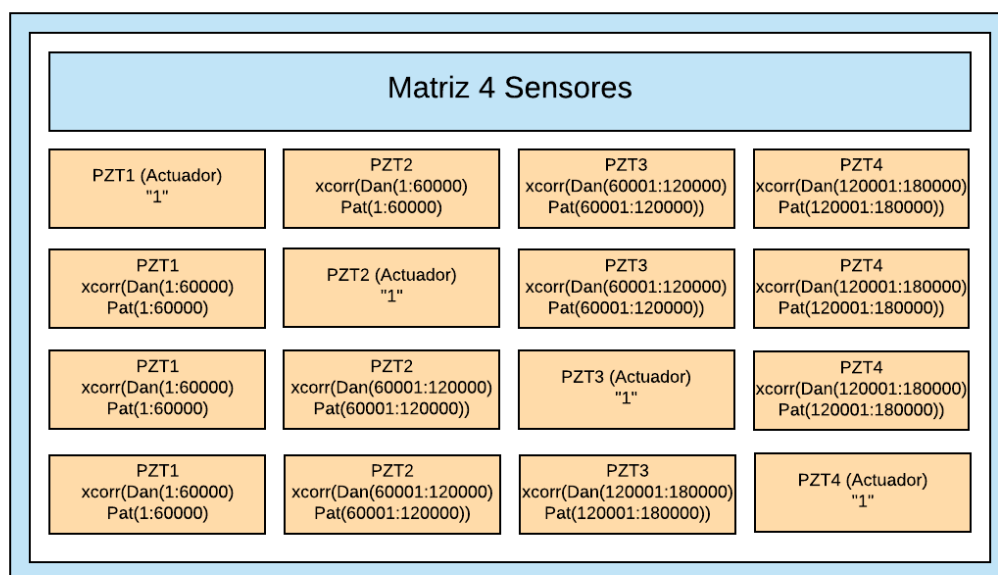


Figura 31. Esquema para matriz 4x4 en placa de 4 sensores

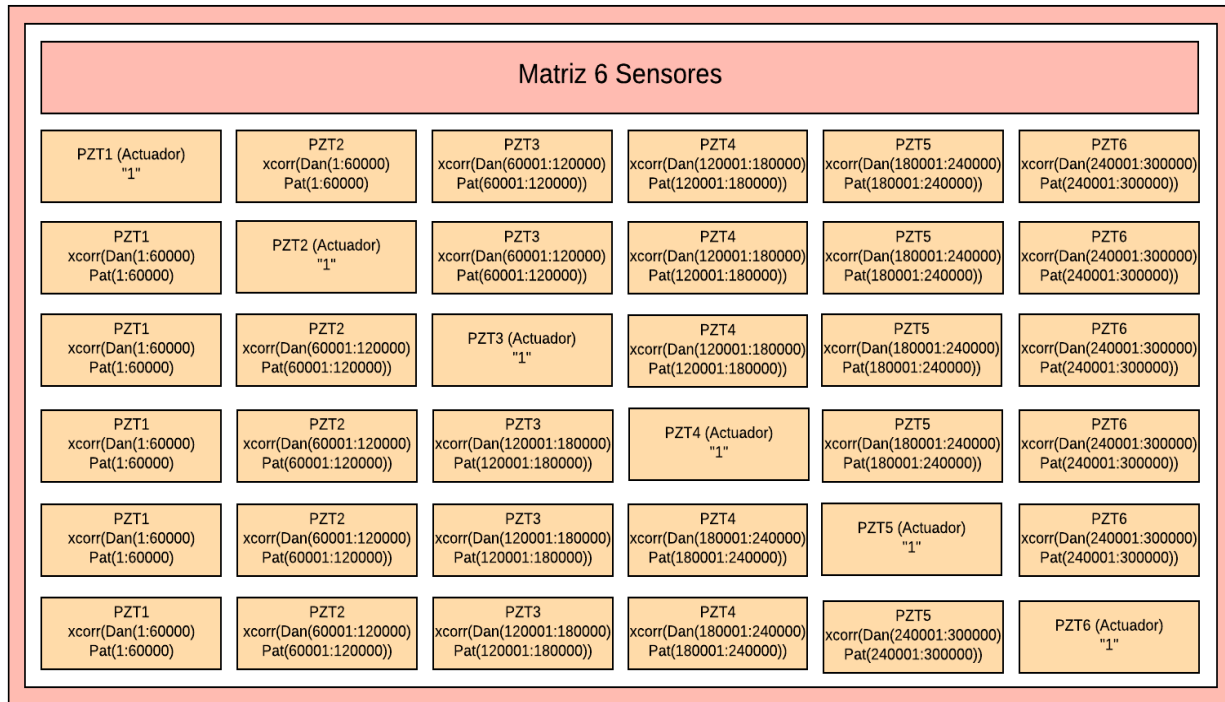


Figura 32. Esquema para matriz 6x6 en placa de 6 sensores

Estas 3 diferentes matrices contienen el resumen que se realizó mediante la correlación respecto al patrón de su respectiva prueba para todos los datos que se adquirieron en cada fase de actuación en las diferentes localizaciones que se observan de las figuras 13 a 15, lo siguiente que se realizó fue generar la variable que guarda cada una de estas matrices, debido a que para efectos del estudio se va a realizar el promedio de 50 de los 100 experimentos que se tomaron para tener una desviación estándar adecuada y que abarcara bastantes experimentos, a esta variable se le llamo "Resultados" y esta almacenada de la siguiente manera:

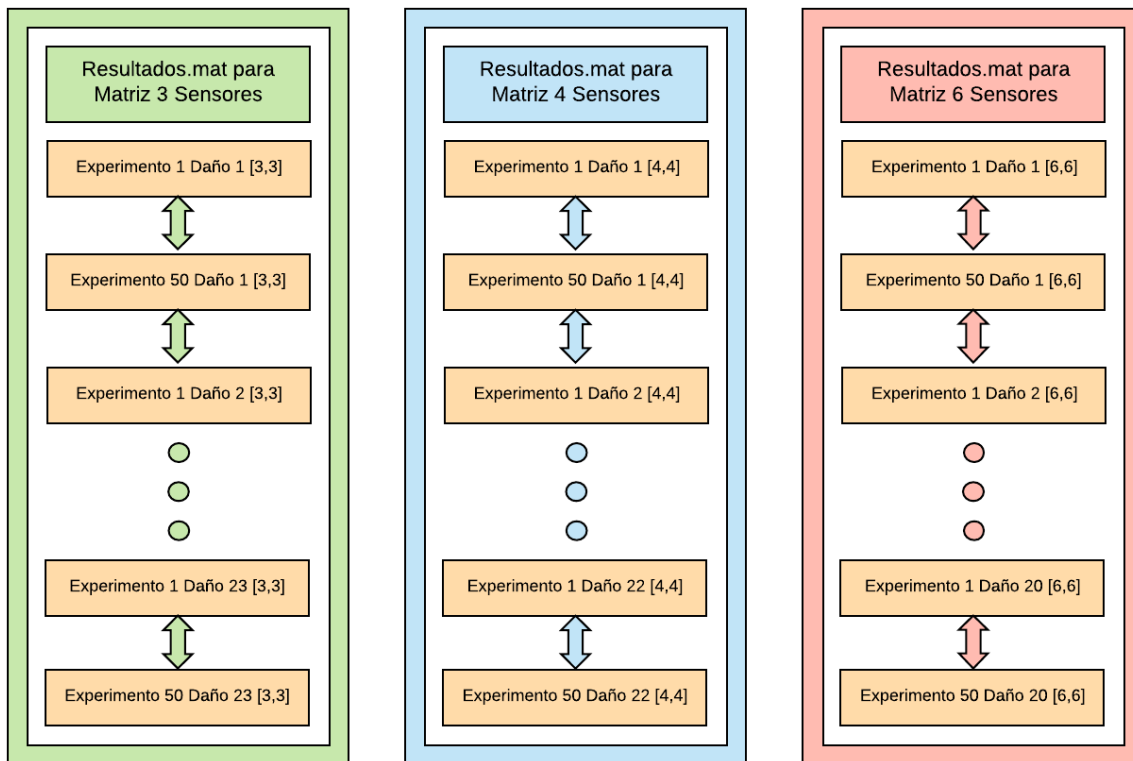


Figura 33. Manejo de la Variable "Resultados. Mat" para cada placa

Cada uno de estos archivos se conoce como un arreglo multidimensional que son extensiones que permite realizar MATLAB a un arreglo en 2 dimensiones (En MATLAB las dimensiones están representadas por filas y columnas) en el cual se usan subíndices adicionales para su respectiva indexación, finalmente, para el archivo generado por los daños con 3 sensores se tiene un total de 1150 matrices de dimensión [3,3] mientras que para el archivo generado por los daños con 4 sensores son 1100 matrices y para el archivo generado por los daños de 6 sensores se tienen 1100 matrices.

2.1.5 Promedio

Luego de tener los 3 archivos previamente mencionados se procedió a realizar el promedio de cada uno de los 50 experimentos que se tomaron por daño, con esto

se buscaba obtener la caracterización específica de cada uno de los daños a evaluar, estos resultados se guardaron en una variable llamada “Promedio” que sigue manejando el mismo tipo de variable mencionada anteriormente como arreglo multidimensional para ubicar las matrices características de todos los daños en una misma variable de Matlab y hacer más fácil su uso, esta variable esta almacenada de la siguiente manera:

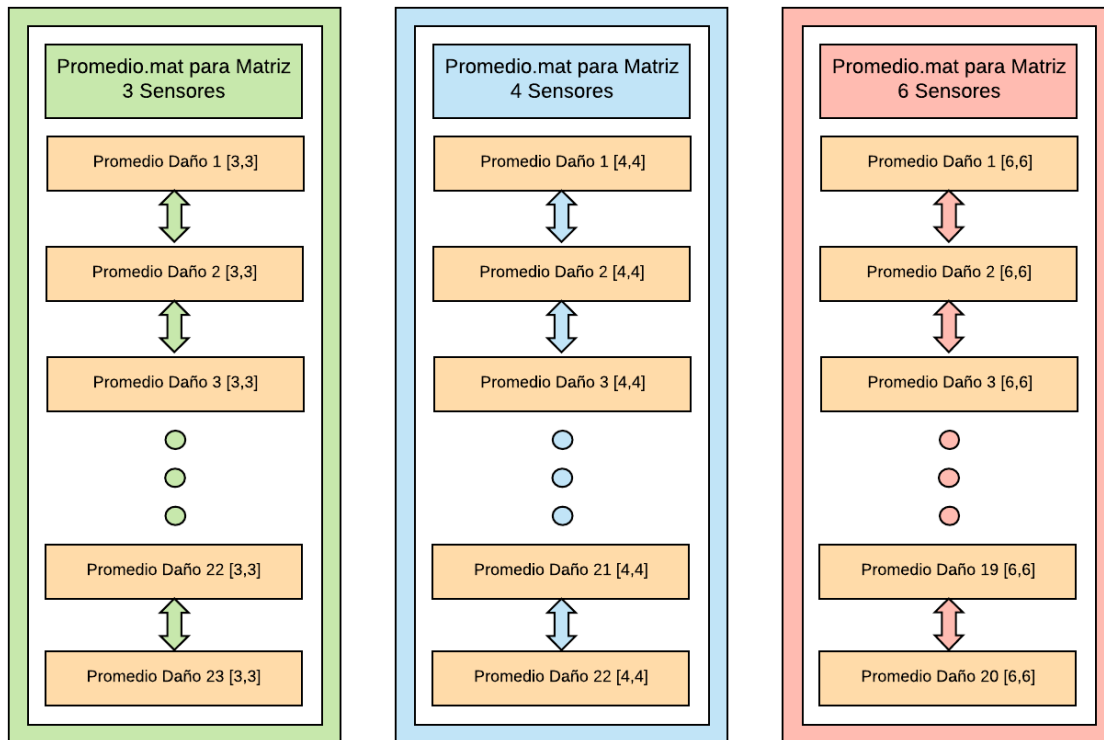


Figura 34. Manejo de la Variable “Promedio” para cada placa

2.1.6 Desviación Estándar

Finalmente, el ultimo archivo necesario para el estudio base se desarrolló utilizando la desviación estándar el cual fue utilizado para medir la dispersión que había entre cada uno de los experimentos con los que se realizó el promedio (50 experimentos) este procedimiento se realizó hallando la desviación estándar de cada uno de los puntos que se generaron en las matrices del archivo “Resultados.mat” como se observa en las figuras 25 a 27, el proceso se llevó a cabo de la siguiente manera:

Se realizó un código que, mediante un bucle, convertía una matriz $N \times N$ en un vector de tamaño $[1, N \times N]$ para cada uno de los 50 experimentos con los que se realizó el promedio de cada daño, esto a su vez generó una matriz de tamaño $[50, 9]$ para los daños de la placa de 3 sensores, $[50, 16]$ para los daños de la placa de 4 sensores y $[50, 36]$ para los daños de la placa de 6 sensores como se observa en la figura 30.

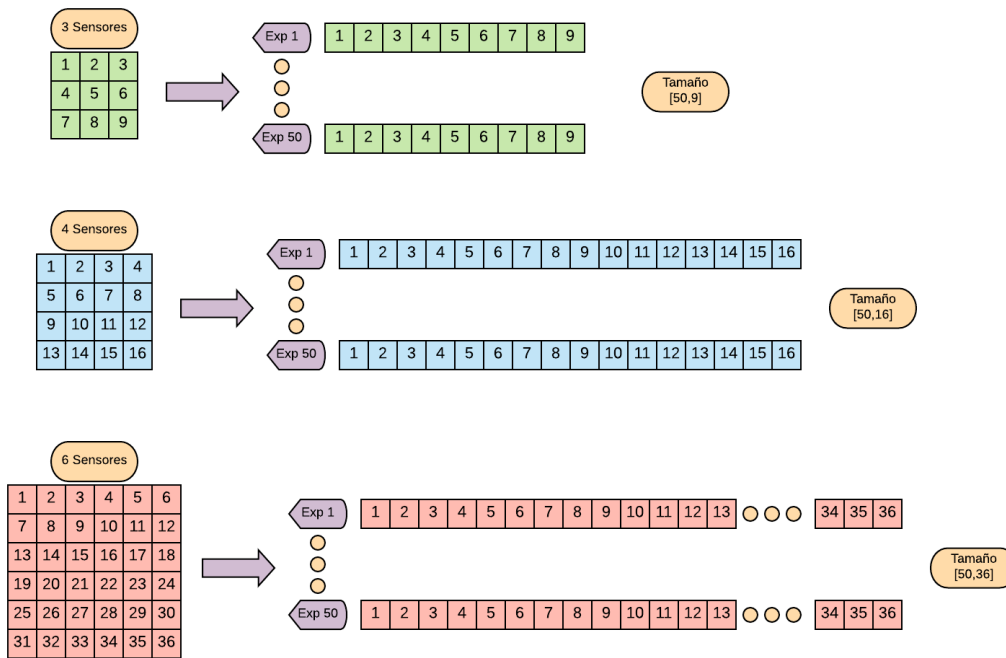


Figura 35. Organización de datos para desviación estándar

Luego de tener los datos organizados se utilizó el comando que ofrece Matlab para generar la desviación estándar de cada columna (std), esto significa que se tiene la dispersión de cada uno de los puntos de la matriz y más adelante a la hora de realizar la predicción ayudara a indicar si la nueva muestra a tomar tiene relación con cualquiera de las ubicaciones de las placas, estos resultados se almacenaron en una variable llamada VecDesvDat de tamaño $[x, N \times N]$ donde "x" es la cantidad de daños que se tomaron según la placa y "N" es la cantidad de sensores de la placa, La Figura 31 representa la organización y la manera como se almacenaron los datos en la variable anteriormente mencionada.

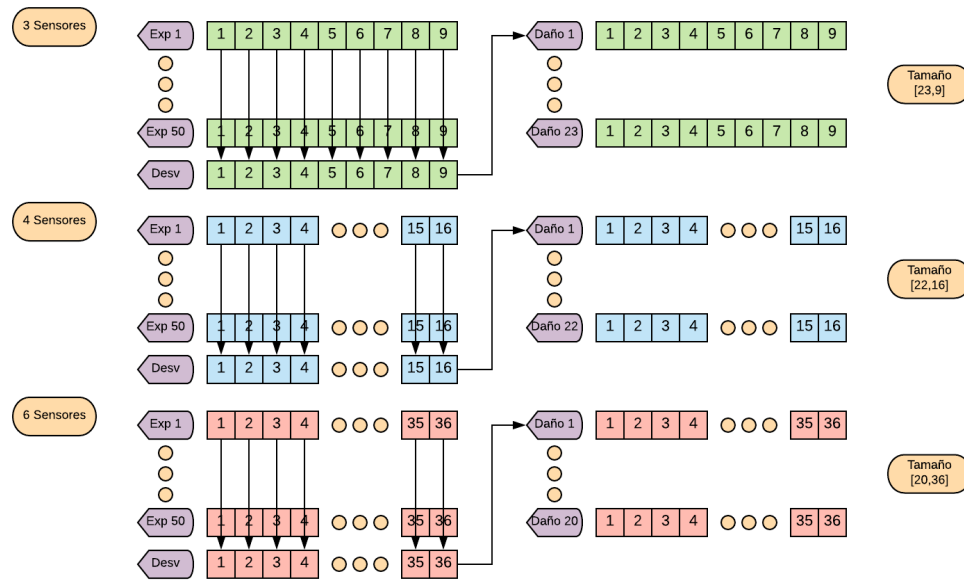


Figura 36. Estructura del archivo "VecDesviación.mat"

2.2 Predicción Final

Una vez se tienen todas las caracterizaciones y archivos necesarios (resultados, promedio y desviación estándar) tanto para los datos que se les aplicó el filtro Savitsky Golay como para los que no, se realizó la metodología que realizaría la predicción de la ubicación del daño según una nueva muestra de datos, esta metodología se basa en el mismo procedimiento que se realizó para hacer la caracterización de las señales, también posee la misma diferencia en sus procedimientos para el filtro ya que una señal procesada con filtro Savitsky Golay no se puede comparar con una señal que no haya sido filtrada debido a que los resultados no van a coincidir.

Para la metodología se tuvo en cuenta la cantidad de experimentos con los cuales se trabajaría para realizar el promedio de estos, por lo tanto, este es libre de elegir un valor de 1 a 100 siendo este el máximo debido a que la toma de datos se realizó con 100 experimentos. Utilizando este valor de referencia se procede a elaborar las matrices características para cada uno de estos y hallar el promedio respectivo, este

procedimiento es exactamente igual al realizado en la caracterización del estudio base, luego se procede a realizar la resta entre cada uno de los promedios que caracterizan los daños en la placa y el nuevo promedio generado con la nueva toma de datos como se observa en la siguiente figura.

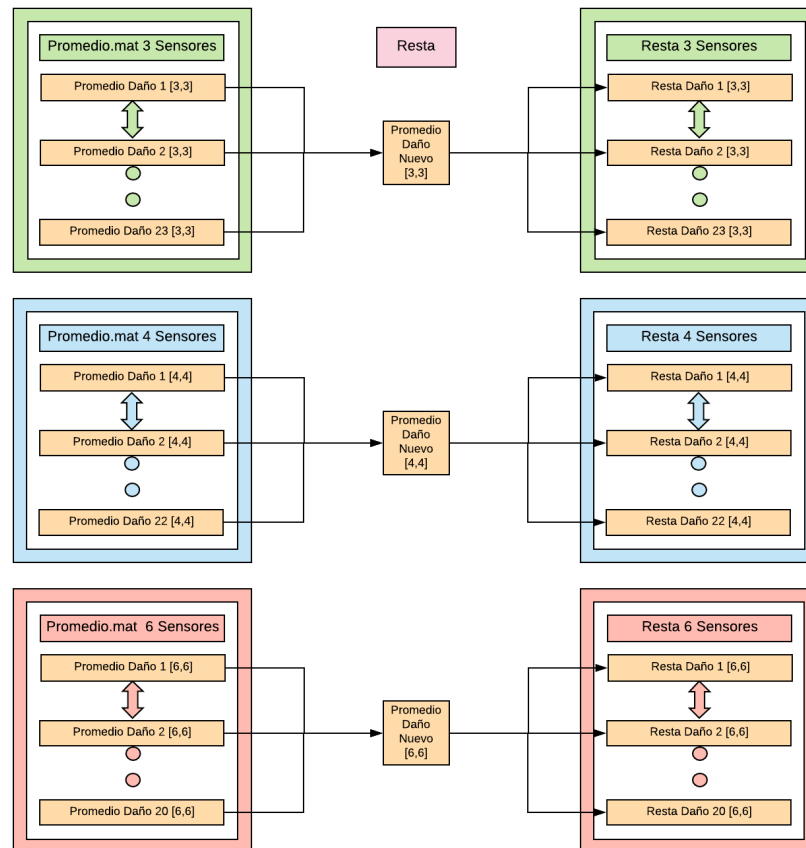


Figura 37. Resta de Promedios según nueva muestra

Una vez obtenida la variable resta se debe organizar para hacer la comparación punto a punto mediante la desviación estándar de cada uno de las filas de este archivo con su respectiva del archivo de estudio “Desviación estándar” con el fin de identificar la similitud que hay entre estas señales en cada uno de los escenarios posibles ya sea desde que sea un Patrón a cualquiera de las ubicaciones posibles en la placa, el procedimiento de organización para la variable resta se realizó de la misma manera como se observa en la figura 30 convirtiendo las matrices resultantes

en filas de un vector y almacenándolas, para el procedimiento de comparación se realizó lo siguiente:

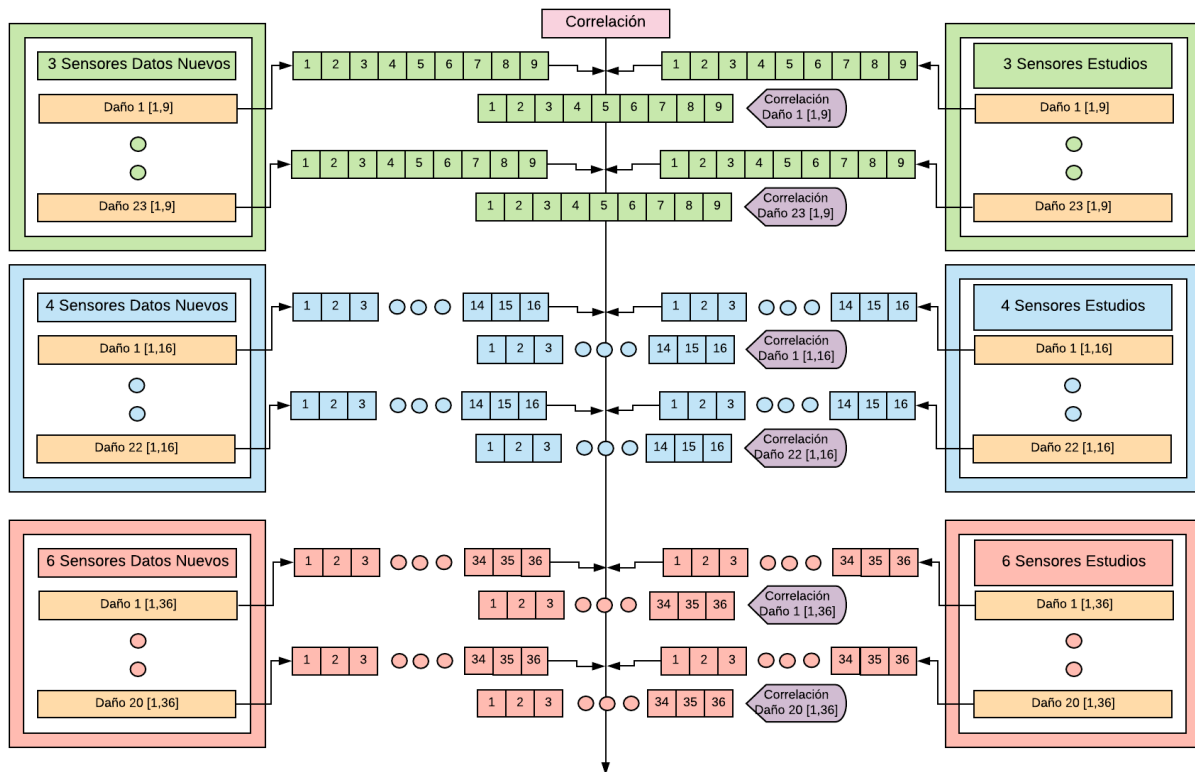


Figura 38. Correlación entre estudios y Datos Nuevos

De esta manera cada uno de los 9 valores en caso de una matriz 3*3, 16 valores en caso de una matriz 4*4 y 36 valores en caso de una matriz 6*6 y su información contenida va a ser procesada y comparada con los estudios generados anteriormente para conocer con cuál de las ubicaciones tiene más similitudes, esto se realizó teniendo en cuenta el criterio por el cual a menos desviación indica que los datos fueron más similares al estudio, de esta manera se realizó la suma de todas las desviaciones que generaron los puntos de las matrices, generando un valor único para cada daño y/o ubicación, este valor significaría la diferencia que hubo entre los datos de estudio y los datos nuevos y con este valor finalmente se obtiene la predicción de la ubicación siendo el menor valor de estos la ubicación que indicaría el algoritmo creado, adicional a esto se indicó el segundo menor valor

como una segunda aproximación dándole al usuario una segunda posibilidad de ubicar el daño en caso que la primera predicción no fuera la correcta, un ejemplo de esto es la tabla 2 en donde se observa los resultados de la correlación arrojados entre los datos de estudio y la nueva muestra para un daño localizado en la ubicación 3 de las placas que se observan en las figuras 13 a 15.

CORRELACIÓN	DAÑO	CORRELACIÓN	DAÑO
0,0248	1	0,0529	11
0,0038	2	0,0545	12
0,0026	3	0,0529	13
0,0140	4	0,0717	14
0,0152	5	0,0760	15
0,0082	6	0,0676	16
0,0428	7	0,0797	17
0,0189	8	0,0645	18
0,0127	9	0,0636	19
0,0516	10	0,0604	20

Tabla 2. Ejemplo de Resultados para una muestra de 6 sensores

3. Modelo Matemático

El modelo matemático para el proyecto se desarrolló de la siguiente manera:

Partiendo de los pasos lógicos explicados anteriormente se observa que en primera medida se hace todo el proceso de normalización de los datos:

Para este proceso se llevó a cabo la vectorización de los datos como se observa en la figura 24, seguido a esto se halla la norma del vector con la siguiente ecuación:

Donde n está dada por:

$$n = (N^{\circ}_{\text{sensores}} - 1) * 60000$$

Luego se procede a dividir cada uno de los datos de $X(n)$ sobre su norma (N) generando el vector normalizado.

$$V_{\text{norm}} = \frac{X(n)}{N}$$

Luego se procede a realizar la correlación cruzada entre los datos del patrón $Y(n)$ y los datos de los daños $X(n)$

$$R_{xy}(L) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (X(n) * y(n + L))$$

Esta correlación se realiza punto a punto con cada uno de los paquetes de 60000 datos que arroja el sensor que recibe la información tanto del patrón como del daño, una vez obtenidos estos, se procede a realizar la media para obtener el valor medio de la correlación de ese punto.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Donde X_i indica los valores resultantes de la correlación y n indica la cantidad de datos que en este caso serán 60000, estos resultados se organizan como se muestra en las figuras 27,28 y 29 dependiendo de la cantidad de sensores en el sistema.

Una vez generadas las 50 matrices por cada ubicación (dependiendo de la placa a evaluar) se procede a realizar el promedio de estas matrices para general la matriz característica de cada daño.

$$M_{prom}[n*n] = \frac{Matriz_{Exp\ 1} + Matriz_{Exp\ 2} + \dots + Matriz_{Exp\ 50}}{50}$$

Donde n está dada por el número de sensores en la placa.

Para realizar el proceso de desviación estándar se procedió a vectorizar cada uno de los 50 experimentos con los que se realizó el promedio y se encontró la dispersión en cada uno de los puntos generados.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

En donde $N = 50$ experimentos, $\bar{X}$ = Media de los datos y X_i = Valores Resultantes de las correlaciones.

Con esto se obtenían los 3 archivos necesarios para luego hacer la predicción (Resultados, promedio y desviación estándar).

Para la predicción final se realiza una nueva toma de datos y se realiza el mismo procedimiento mencionado anteriormente hasta el promedio.

Luego de esto se realizó una resta entre cada uno de los promedios obtenidos anteriormente y el promedio obtenido a partir de los nuevos datos

$$Resta_{(:,n)} = Promedio\ Estadio_{(:,n)} - Promedio\ Nuevo$$

Siendo n la cantidad de posibles ubicaciones identificadas en el estudio.

Luego estos resultados se vectorizaron de tal manera que pudieran ser comparados con los datos generados por la desviación estándar del estudio.

Finalmente se realizó la comparación punto a punto entre cada una de los valores de las ubicaciones generados del archivo de estudio como de comparación utilizando nuevamente la desviación estándar como método para observar la dispersión entre estos, el resultado indica que la ubicación con el menor valor de dispersión entre ambos datos sería la predicción que el algoritmo arrojaría, el algoritmo entrega 2 predicciones, la primera predicción sería en donde está la mayor probabilidad de encontrar el defecto simulado, mientras que la segunda predicción sería un respaldo en caso de que la primera predicción no resulte ser correcta.

4. Resultados

En esta etapa se darán a conocer los resultados que se obtuvieron en la implementación de la metodología para las 2 fases principales (**Caracterización para Estudio base y Predicción Final**), para la fase de caracterización del estudio base se tienen en cuenta diferentes aspectos tales como el tiempo de procesamiento de datos, esto debido a que se están manejando matrices en donde cada muestra obtenida por sensor tiene un tamaño de 60.000 datos por lo tanto a mayor cantidad de sensores se obtiene más información para procesar, además a los estudios a los cuales se les realizó el proceso de filtración para eliminar ruidos aumenta ese tiempo de procesamiento para obtener los archivos mencionados en

el capítulo 7, los siguientes fueron los tiempos que le tomó al programa MATLAB realizar el procesamiento de datos en cada una de las etapas:

ETAPA	3 SENSORES		4 SENSORES		6 SENSORES	
	TIEMPO NORMAL	TIEMPO CON FILTRO GOLAY	TIEMPO NORMAL	TIEMPO CON FILTRO GOLAY	TIEMPO NORMAL	TIEMPO CON FILTRO GOLAY
RESULTADOS INICIALES (50 EXP)	20 MINUTOS	35 MINUTOS	60 MINUTOS	120 MINUTOS	150 MINUTOS	320 MINUTOS
PROMEDIO RESULTADOS INICIALES	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO
DESVIACIÓN ESTANDAR	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO	< 1 MINUTO
PREDICCIÓN (10 EXP PROMEDIO)	1 MINUTO 30 SEGUNDOS	3 MINUTOS	3 MINUTOS	5 MINUTOS	4 MINUTOS	7 MINUTOS

Tabla 3. Tiempo estimado de procesamiento en Matlab

Se observa que en promedio el 90% del tiempo de procesamiento se utiliza para la caracterización y construcción del estudio base, mientras que el 10% restante se utilizó al momento de realizar las predicciones por parte del algoritmo, esto debido a que para el estudio, el estándar manejado de 50 experimentos por cada uno de los daños hace que el tiempo de procesamiento sea considerablemente más alto ya que este tiene en cuenta todas las ubicaciones mientras que al momento de realizar la predicción solo se tienen en cuenta los datos recientes, si el usuario decide cambiar la cantidad de experimentos a tener en cuenta para el promedio de la predicción, este porcentaje variará ya que este tiempo es directamente proporcional a la cantidad de experimentos, finalmente se obtuvieron cada uno de los 3 archivos necesarios para realizar la predicción como se observa en la siguiente imagen:

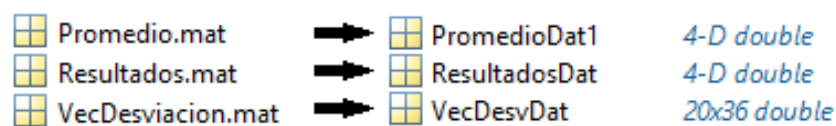


Figura 39. Archivos Generados por los estudios para prueba de 6 sensores

El archivo “Resultados. Mat” contiene todos los resultados obtenidos para 50 experimentos en cada una de las ubicaciones posibles, organizados como se menciona en el apartado Caracterización para estudio base; “Promedio.mat” contiene el promedio de los 50 experimentos para cada daño en la placa y “VecDesviación.mat” contiene la desviación estándar para las 50 muestras, una vez obtenidos estos, se procedería a realizar la comparación, para esto se tomaron las 4 tomas de datos restantes y así realizar la evaluación de la metodología, esta consistiría en realizar las predicciones de tal manera que para cada ubicación en las diferentes placas se tendrían 4 comparaciones, es decir, para una placa de 3 sensores con 23 ubicaciones posibles incluyendo el patrón se tendrían 92 comparaciones, para la placa de 4 sensores se tendrían 88 comparaciones ya que tiene 22 ubicaciones incluyendo el patrón y por último para la placa de 6 sensores se tendrían 80 comparaciones debido a que se tienen 20 ubicaciones, cada una de estas comparaciones se realizó bajo el mismo archivo estudio teniendo en cuenta que se realizaron 2 estudios utilizando en uno de ellos el filtro Savitsky Golay por lo tanto cada una de las comparaciones mencionadas anteriormente tendrán resultados omitiendo este filtro y utilizándolo.

La manera escogida para representar los resultados obtenidos fue mediante un mapa de codificación de color inspirado en el concepto de la cámara termográfica con ello se busca asociar un color a una probabilidad de acierto, indicando de esta manera la correlación que tienen los datos, con esto se pretende mostrar de manera más ágil, gráfica y útil la información que se quiere presentar, su forma de representación es mediante una matriz de datos simulando la respectiva placa en donde se tomaron los datos, esto se realizó utilizando comúnmente colores cálidos para esto, MATLAB permite presentar estas termografías con 18 escalas de color diferentes, entre las cuales están jet, hsv, summer, cool, spring, hot, autumn, winter, bone, copper, pink, lines y gray, estas escalas se representan de la siguiente manera:

Nombre del mapa de colores	Escala de color
parula	
jet	
hsv	
hot	
cool	
spring	
summer	
autumn	
winter	
gray	
bone	
copper	
pink	
lines	
colorcube	
prism	
flag	
white	

Figura 40. Escalas de colores utilizadas en Matlab

Tomado de: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/colormap.html>

La escala escogida para utilizar en el mapa de codificación de color fue “JET” que maneja una gama de colores de azul a rojo pasando por amarillo y verde, en donde el color azul significará que en esa zona la predicción no tiene cercanía alguna con el daño es decir **baja correlación y probabilidad de ubicación del daño en esta posición**, mientras que el color rojo representará la zona en donde la predicción indicó que está ubicado el daño es decir **alta correlación y probabilidad de ubicación del daño en esta posición**, este mapa de codificación de color se diseñó con la finalidad de hacer más amigable al usuario los resultados que arroja el algoritmo y su predicción final, además de ser fácilmente acoplable para añadir a la interfaz de usuario que se creó, en estos mapas de temperatura los sensores que se ubicaron en las piezas siempre estarán representados por el color más bajo de la escala (azul), los puntos utilizados para tomar los datos en cada una de las ubicaciones se observará un color de la escala más alto, ya que el código arroja 2 predicciones, la primera y más acertada tomará el color más alto de la escala (rojo) mientras que la segunda predicción tomará un color medio de esta, esto se realiza con el fin de indicar claramente la diferencia entre las 2 predicciones y la manera

como estas deben ser vistas a la hora de observar, identificar y cuantificar los resultados; Para representar cada una de las placas se crearon los siguientes diagramas:

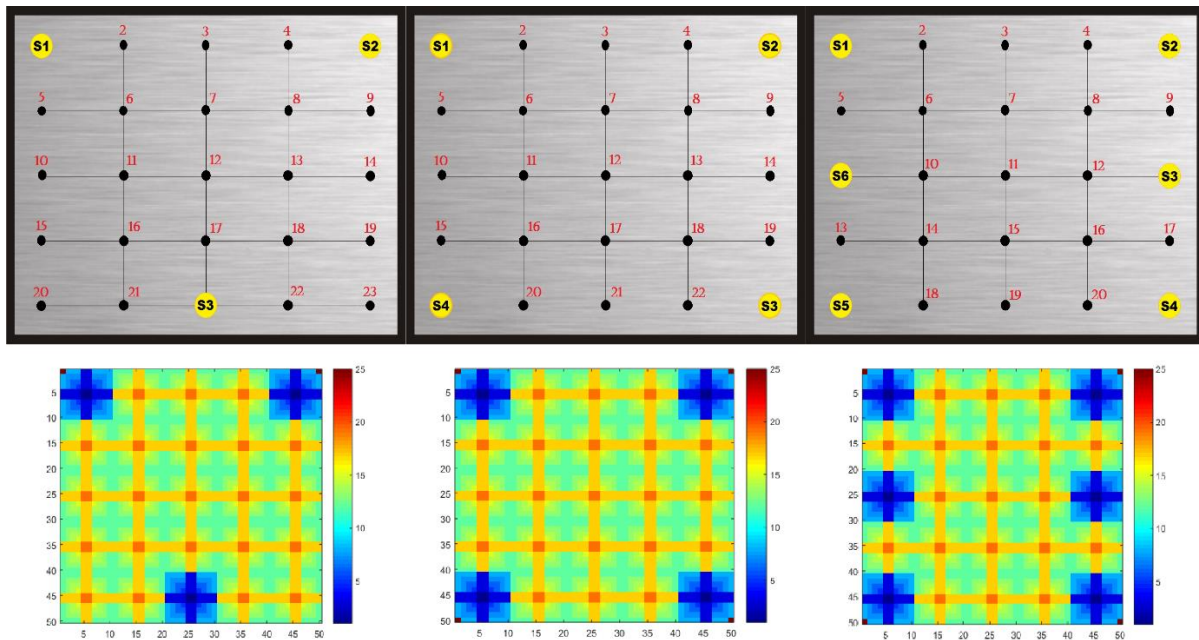


Figura 41. Representación gráfica en mapa de codificación de color de las placas

Finalmente, una vez obtenidos los archivos y diseñado la manera de representarlos, se procedió a realizar todas y cada una de las comparaciones para los 3 montajes sin filtro y con filtro Savitsky Golay para así evaluar la efectividad de la metodología, la efectividad de las pruebas se midió en base a las 2 predicciones arrojadas por el algoritmo, en donde se cuenta como acierto si la correcta ubicación del daño coincide con alguna de estas 2 predicciones, esto debido a que para efectos de cuantificación, la posibilidad de acierto para una placa de 3 sensores seria de $2 / 23$, para una placa de 4 sensores será de $2 / 22$ y para una placa de 6 sensores será de $2 / 20$, por lo que manejar 2 opciones de predicción le daría al programa un margen máximo de 10% de posibilidad de acierto.

Para dar un ejemplo de cómo funciona el mapa de codificación de color se debe ubicar en las 3 placas la localización #3 en cada una de ellas, se realizó la comparación respecto a la caracterización elaborada en los estudios y estos fueron los resultados que arrojó el algoritmo:

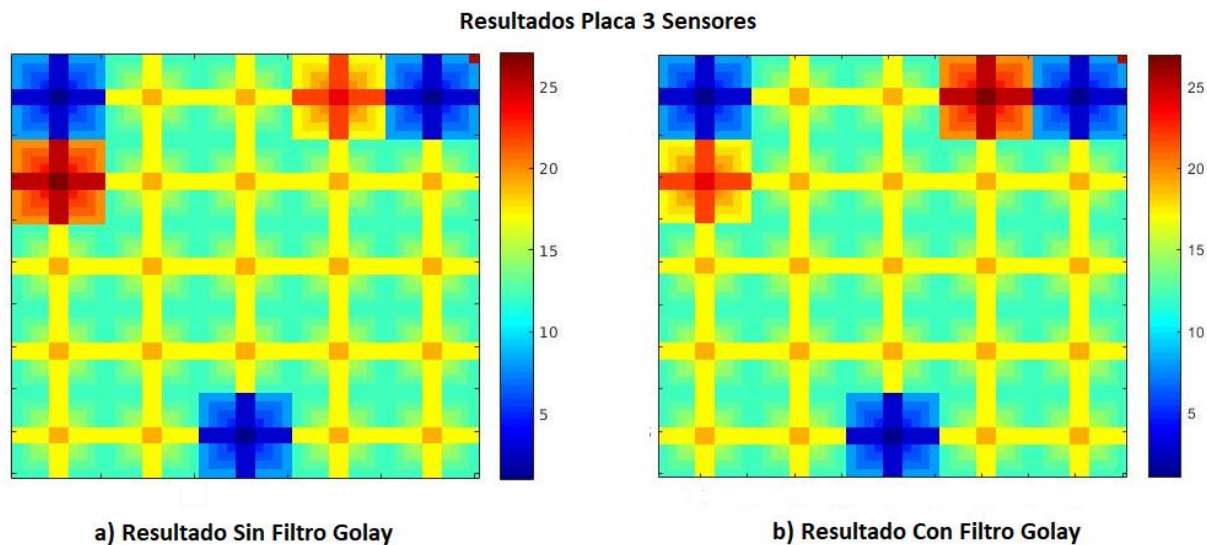


Figura 42.(MT) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 3 sensores

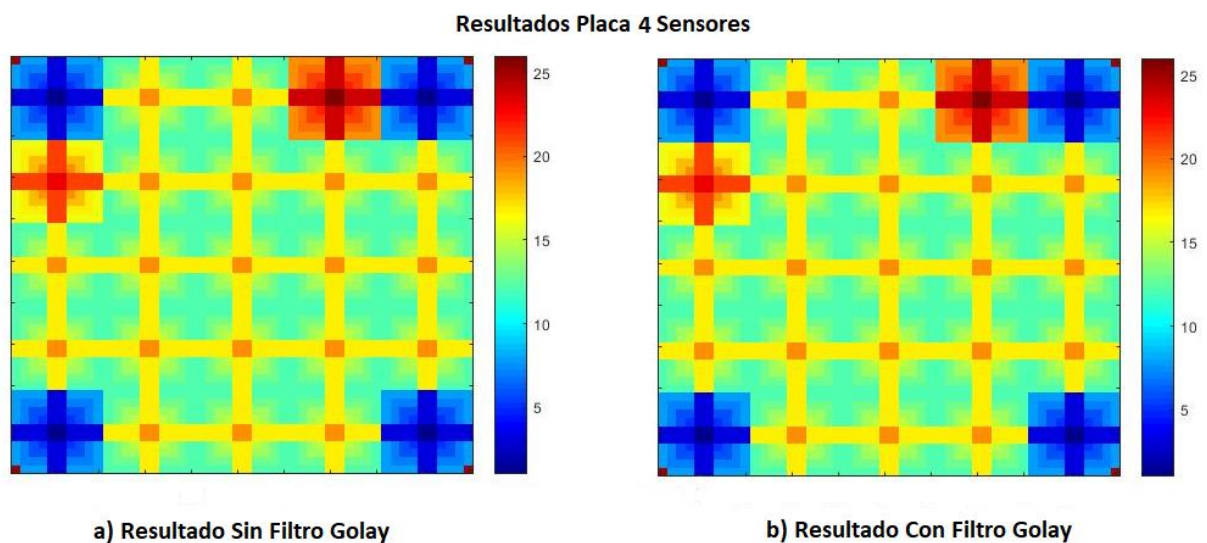


Figura 43.(MT) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 4 sensores

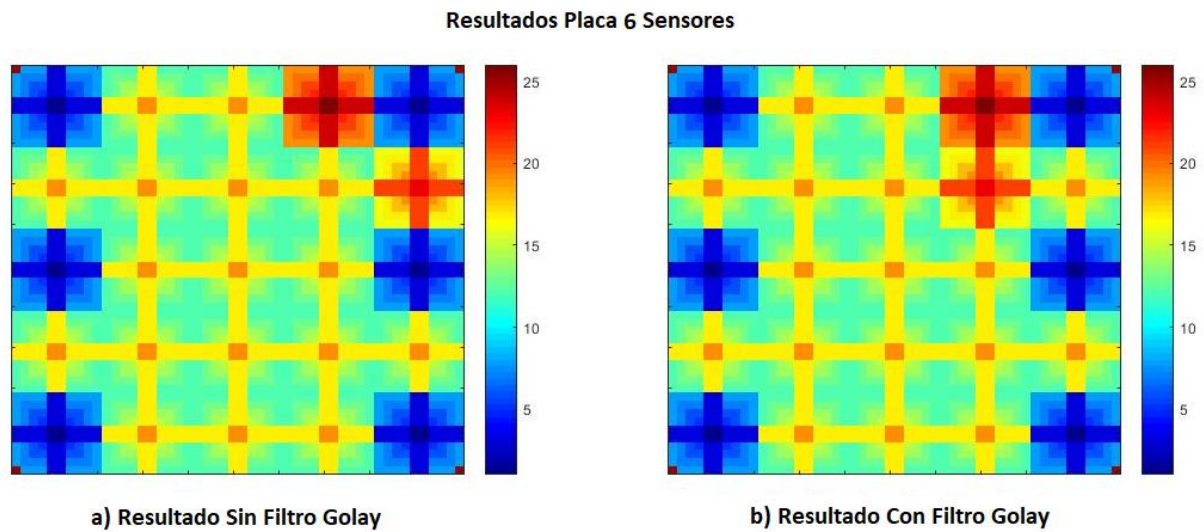


Figura 44.(MT) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 6 sensores

Como se observa en las anteriores figuras, la predicción del daño en la ubicación 3 se dio en 5 de los 6 escenarios posibles con la primera predicción en las placas respectivas, el restante sigue cumpliendo la condición planteada inicialmente de ser la segunda predicción arrojada por el algoritmo, esto significa que la metodología es capaz de arrojar predicciones confiables en los casos donde se requiera su evaluación

Una manera de hacer el algoritmo y la metodología más amigable para los usuarios, es realizando una interfaz gráfica con las herramientas que ofrece Matlab, en este caso se utilizó GUIDE el cual permite de manera sencilla tender el control de la aplicación desarrollada para generar la predicción, eliminando la necesidad de escribir comandos para ejecutar el algoritmo, esta interfaz gráfica se desarrolló de la siguiente manera:



Figura 45. Interfaz de usuario GUI de Matlab

La interfaz creada en la figura 45 posee los siguientes elementos:

- **Selector Cantidad de Sensores:** Este selector le permite al usuario escoger entre las 3 diferentes placas con las que se realizó el estudio, sus opciones son 3 SENSORES, 4 SENSORES y 6 SENSORES, este indicador es obligatorio antes de oprimir el botón calcular y a medida que selecciona las opciones, en la imagen de comparación de la placa se verá reflejada su elección.
- **Selector Filtro Golay:** Este selector le permite al usuario escoger si quiere que los datos antes de generar la predicción sean filtrados mediante un filtro

Savitsky Golay, sus opciones son SIN FILTRO GOLAY y CON FILTRO GOLAY, este indicador también es obligatorio antes de oprimir el botón calcular.

- **Número de Experimentos:** En este espacio se puede modificar la cantidad de experimentos a tener en cuenta para realizar el promedio, el valor a colocar puede variar desde 1 hasta 100 y se tiene en cuenta que el tiempo de procesamiento es directamente proporcional a la cantidad de experimentos que se colocan en este indicador.

- **Resultados Mapa de Codificación de colores:** En este espacio, una vez terminados los cálculos se podrá observar el respectivo mapa de codificación de colores generado para las 2 predicciones que arroja el algoritmo, esta codificación de colores se realiza de tal manera que se asocia los siguientes colores a los resultados que allí se muestran:
 - **Color Azul:** Este color indica en el mapa que hay una menor probabilidad de que el daño a predecir este ubicado en esta posición.
 - **Color Rojo:** Este color indica en el mapa que hay una mayor probabilidad de que el daño a predecir este ubicado en esta posición.
 - El resto de colores que se indica en la gama de colores presentada en la figura 45 indicara en este sentido la probabilidad de la ubicación partiendo del color azul como menor y siendo el color rojo la máxima expresión de la codificación.

- **Imagen de Comparación de la Placa:** Las imágenes que se colocan en este espacio se utilizan como referencia para indicarle al usuario el tipo de placa que escogió y poder interpretar los resultados que se arrojan en la imagen del mapa de codificación de color.

- **Botón Reiniciar:** Se utiliza después de que se hace un cálculo y se quiere realizar otro de nuevo, este botón vuelve a dejar los ajustes por defecto y

permite seleccionar todos los componentes de nuevo para hacer un nuevo cálculo.

- **Botón Salir:** Este botón se utiliza para salir de la interfaz de usuario y terminar la ejecución del algoritmo de predicción.
- **Indicador 1:** Este indicador se utiliza para mostrar el mensaje de bienvenida además de mostrar la ubicación de la primera predicción del algoritmo de localización.
- **Indicador 2:** Este indicador se utiliza para mostrar el mensaje de bienvenida además de mostrar la ubicación de la segunda predicción del algoritmo de localización.
- **Botón Calcular:** Este botón se utiliza cada vez que se requiere hacer un cálculo nuevo ya sea de una localización diferente o cambiando todos los ajustes posibles para esto, antes de esto es necesario verificar que tanto el número de experimentos, como el selector de cantidad de sensores y el selector de filtro Golay estén debidamente llenos con la información correcta.

El procedimiento para utilizar la interfaz de usuario es, seleccionar la cantidad de sensores para la evaluación, luego seleccionar si requiere filtro Golay o no para las pruebas a realizar, llenar la casilla con el número de experimentos para el promedio a realizar y finalmente oprimir el botón calcular y esperar los resultados, se repitió el mismo ejercicio utilizando el daño ubicado en la localización 3, las figuras 41 a la 43 representan los resultados obtenidos:

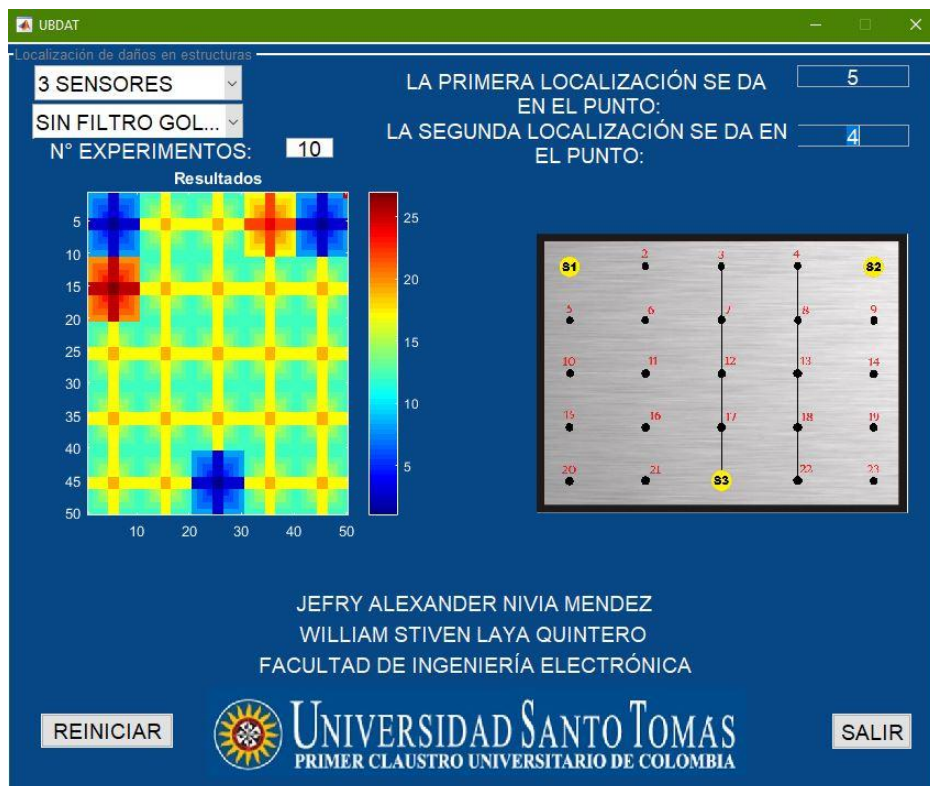


Figura 46. (Interfaz Gráfica) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 3 sensores

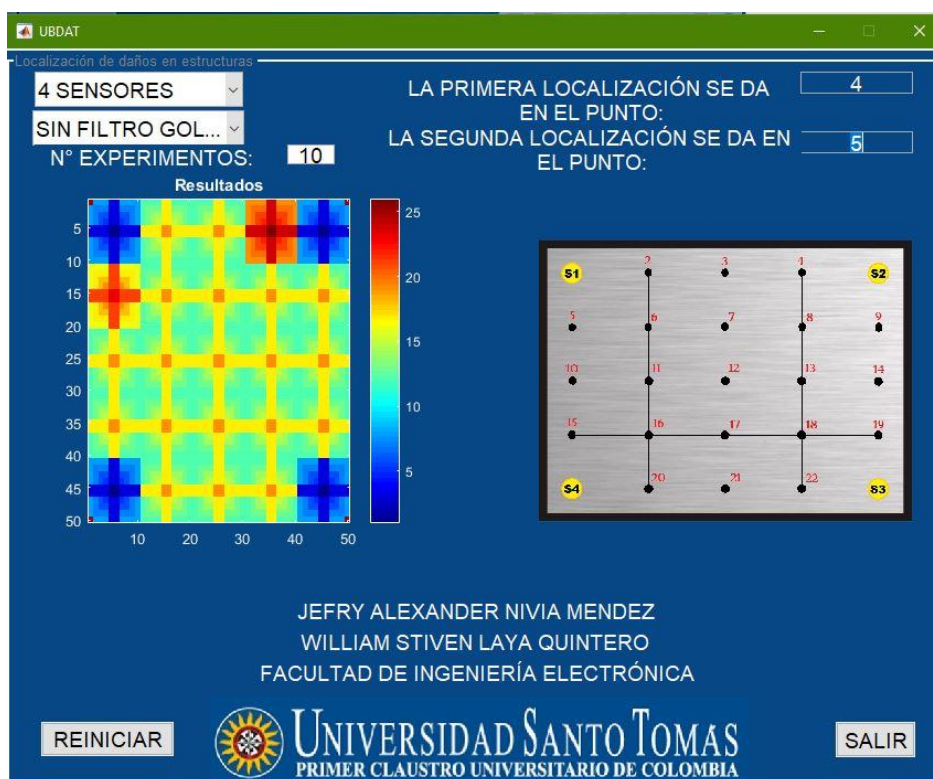


Figura 47. (Interfaz Gráfica) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 4 sensores

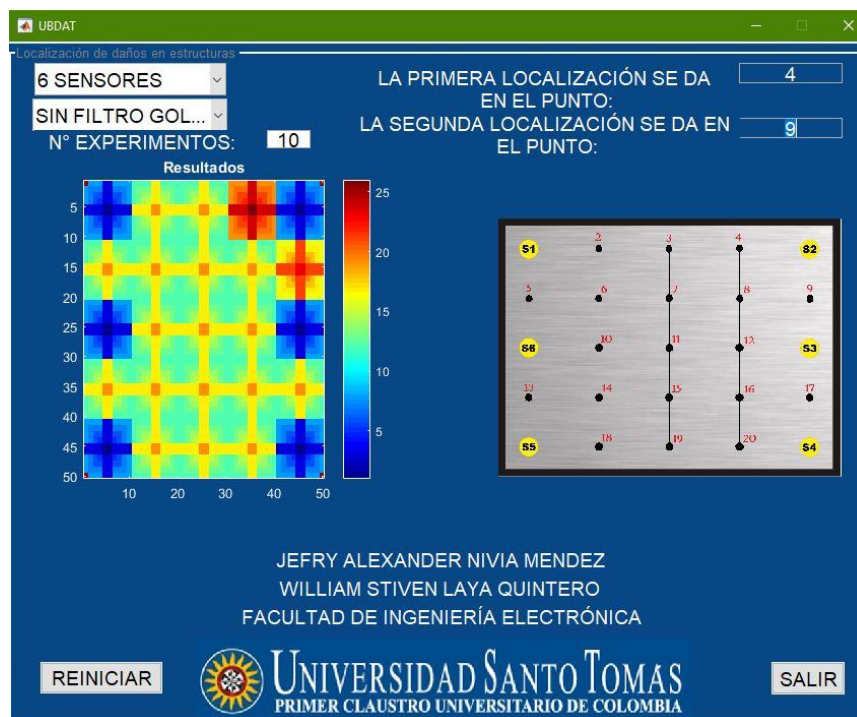


Figura 48.(Interfaz Gráfica) para predicción daño en la ubicación 3 con placa de 6 sensores

Por último, se realizó el procedimiento con cada uno de los daños para las placas y estos fueron los resultados obtenidos en las siguientes tablas teniendo en cuenta ya lo mencionado anteriormente con el concepto de acierto y error respectivo que se tiene para cada uno de los experimentos realizados:

TABLA DE POSIBLES RESULTADOS		
3 SENSORES	ACIERTO	2/23 POSIBILIDADES DE ACIERTO SEGÚN PREDICCIONES
	ERROR	21/23 POSIBILIDADES DE ERROR SEGÚN PREDICCIONES
4 SENSORES	ACIERTO	2/22 POSIBILIDADES DE ACIERTO SEGÚN PREDICCIONES
	ERROR	20/22 POSIBILIDADES DE ERROR SEGÚN PREDICCIONES
6 SENSORES	ACIERTO	2/20 POSIBILIDADES DE ACIERTO SEGÚN PREDICCIONES
	ERROR	18/20 POSIBILIDADES DE ERROR SEGÚN PREDICCIONES

Tabla 4. Referencias para acierto y error

MONTAJE 3 SENSORES SFG												
EXP	PRIMERA PRUEBA			SEGUNDA PRUEBA			TERCERA PRUEBA			CUARTA PRUEBA		
	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES
1 PATRON	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
2 A	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
3 B	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
4 C	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
5 D	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
6 E	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
7 F	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1
8 G	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
9 H	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1
10 I	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
11 J	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
12 K	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
13 L	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
14 M	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
15 N	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
16 O	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
17 P	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
18 Q	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
19 R	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
20 S	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
21 T	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
22 U	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
23 V	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
RESULTADOS	10	3	10	10	6	7	9	5	9	9	5	9
EFFECTIVIDAD	43%	13%	43%	43%	26%	30%	39%	22%	39%	39%	22%	39%
	57%			70%			61%			61%		

61,96%

Tabla 5. placa de 3 sensores sin filtro Golay

MONTAJE 3 SENSORES CFG												
EXP	PRIMERA PRUEBA			SEGUNDA PRUEBA			TERCERA PRUEBA			CUARTA PRUEBA		
	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES
1 PATRON	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
2 A	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
3 B	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
4 C	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
5 D	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
6 E	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
7 F	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
8 G	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
9 H	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
10 I	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
11 J	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
12 K	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1
13 L	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
14 M	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
15 N	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
16 O	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
17 P	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
18 Q	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
19 R	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
20 S	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
21 T	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
22 U	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
23 V	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
RESULTADOS	12	6	5	14	5	4	7	12	4	6	10	7
EFFECTIVIDAD	52%	26%	22%	61%	22%	17%	30%	52%	17%	26%	43%	30%
	78%			83%			83%			70%		

78,26%

Tabla 6. placa de 3 sensores con filtro Golay

MONTAJE 4 SENSORES SFG												
EXP	PRIMERA PRUEBA			SEGUNDA PRUEBA			TERCERA PRUEBA			CUARTA PRUEBA		
	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES
1 PATRON	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2 A	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
3 B	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
4 C	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
5 D	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
6 E	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
7 F	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
8 G	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
9 H	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
10 I	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
11 J	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
12 K	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
13 L	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
14 M	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
15 N	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
16 O	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
17 P	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
18 Q	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
19 R	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
20 S	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
21 T	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
22 U	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
RESULTADOS	17	3	2	15	4	3	10	7	5	5	9	8
	77%	14%	9%	68%	18%	14%	45%	32%	23%	23%	41%	36%
EFFECTIVIDAD	91%			86%			77%			64%		

79,55%

Tabla 7.placa de 4 sensores sin filtro Golay

MONTAJE 4 SENSORES CFG												
EXP	PRIMERA PRUEBA			SEGUNDA PRUEBA			TERCERA PRUEBA			CUARTA PRUEBA		
	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES
1 PATRON	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2 A	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
3 B	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
4 C	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
5 D	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
6 E	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
7 F	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
8 G	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
9 H	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
10 I	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
11 J	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
12 K	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
13 L	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
14 M	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
15 N	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
16 O	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
17 P	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
18 Q	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
19 R	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
20 S	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
21 T	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1
22 U	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
RESULTADOS	18	1	3	7	6	9	8	8	6	6	5	11
	82%	5%	14%	32%	27%	41%	36%	36%	27%	27%	23%	50%
EFFECTIVIDAD	86%			59%			73%			50%		

67,05%

Tabla 8.placa de 4 sensores con filtro Golay

MONTAJE 4 SENSORES SFG												
EXP	PRIMERA PRUEBA			SEGUNDA PRUEBA			TERCERA PRUEBA			CUARTA PRUEBA		
	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES
1 PATRON	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
2 A	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
3 B	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
4 C	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
5 D	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
6 E	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
7 F	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
8 G	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
9 H	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
10 J	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
11 K	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
12 L	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
13 N	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
14 O	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
15 P	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
16 Q	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
17 R	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
18 S	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
19 T	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
20 U	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
RESULTADOS	17	2	1	13	2	5	12	4	4	11	2	7
EFFECTIVIDAD	85%	10%	5%	65%	10%	25%	60%	20%	20%	55%	10%	35%
	95%			75%			80%			65%		

78,75%

Tabla 9. placa de 6 sensores sin filtro Golay

MONTAJE 4 SENSORES SFG												
EXP	PRIMERA PRUEBA			SEGUNDA PRUEBA			TERCERA PRUEBA			CUARTA PRUEBA		
	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES	ACIERTOS 1RA OPC	ACIERTOS 2DA OPC	ERRORES
1 PATRON	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
2 A	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
3 B	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
4 C	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
5 D	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
6 E	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
7 F	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
8 G	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
9 H	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
10 J	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
11 K	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
12 L	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
13 N	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
14 O	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
15 P	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
16 Q	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
17 R	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
18 S	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
19 T	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
20 U	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
RESULTADOS	16	1	3	10	5	5	13	3	4	9	7	4
EFFECTIVIDAD	80%	5%	15%	50%	25%	25%	65%	15%	20%	45%	35%	20%
	85%			75%			80%			80%		

80,00%

Tabla 10. placa de 6 sensores con filtro Golay

5. Conclusiones

- El sistema de adquisición de datos compuesto por la tarjeta multiplexor, el handyscope HS4 (Osciloscopio) y handyscope HS5 (Generador de Onda Arbitraria) es vulnerable ante el ruido o vibración, dado que se encontró que, en las pruebas realizadas ante estas perturbaciones, estas no fueron satisfactorias en cuanto a la localización del daño en la estructura porque el algoritmo interpretaba estas variaciones y ruido como datos relevantes lo cual cambiaba los valores obtenidos en la caracterización del estudio base y a su vez hacía que las nuevas muestras no fueran similares en sus medidas y por lo tanto en su predicción.
- El número de sensores es directamente proporcional a la efectividad de la metodología, dado que el porcentaje de error en la localización disminuye notoriamente cuando se incluyen más sensores en la estructura, teniendo en cuenta que eso aumenta el tiempo de procesamiento que conlleva todo el proceso como se observó anteriormente, la cantidad de sensores debe ser acorde al tamaño de la estructura a evaluar y la capacidad de procesamiento disponible en el momento.
- Fue necesario filtrar los datos adquiridos, para eliminar el ruido ambiente que se generaba mientras se realizaban las pruebas, esto derivó en una localización más efectiva como se observa en los resultados obtenidos al trabajar con el filtro Savistky Golay a comparación de las muestras que no fueron filtradas y en su efectividad como se observa en las tablas 4 a la 9 para cada uno de los montajes realizados.
- Los tiempos de procesamiento observados en la tabla 3 indican que se requiere de una gran carga computacional para llevar a cabo los cálculos para el estudio base y la posterior predicción de los daños, por lo tanto, se requiere de un equipo con un rendimiento acorde o superior para mejorar estos tiempos estimados de duración obtener una mayor eficiencia en los resultados.

- Después de tabular y analizar cada uno de los experimentos realizados para cada placa de aluminio con su respectivo arreglo de sensores, se evidencio que:
 - Efectividad Placa de aluminio (3 sensores) sin filtro Golay: 61.96%
 - Efectividad Placa de aluminio (3 sensores) con filtro Golay: 78.26%
 - Efectividad Placa de aluminio (4 sensores) sin filtro Golay: 79.55%
 - Efectividad Placa de aluminio (4 sensores) con filtro Golay: 67.05%
 - Efectividad Placa de aluminio (6 sensores) sin filtro Golay: 78.75%
 - Efectividad Placa de aluminio (6 sensores) con filtro Golay: 80%

6. Trabajo Futuro

Como se observó anteriormente, el proyecto logró la ubicación en diferentes localizaciones de los daños mencionados en las figuras 13 a la 15, siendo esta la demostración para el SHM de la localización de daños en estas estructuras metálicas, siendo este un conjunto de técnicas ampliamente utilizadas entre los cuales se pueden identificar diferentes mejoras que se podrían realizar en el futuro:

- Mejorar la red de transductores que es utilizada actualmente con el fin de evitar las variaciones que se presentan con las vibraciones y el ruido, de tal manera que la adquisición de datos sea mucho más confiable y los estudios de estas se asemejen mucho más a la realidad de la estructura.
- Optimizar de manera consecuente el procesamiento de datos que es llevado a cabo al realizar los estudios pertinentes para la primera etapa de la solución, mejorando así los tiempos de procesamiento mostrados en la tabla 3 y haciendo más eficiente y rápida la obtención de los estudios para su posterior comparación.
- Acoplar la metodología para distintos tipos de materiales con el fin de ampliar el campo de estudio del proyecto no solo al material utilizado en este como lo es el aluminio, sino abarcar materiales tales como la fibra de carbono y el material compuesto.
- Evaluar diferentes métodos estadísticos para la predicción de los daños en las ubicaciones con el fin de mejorar la eficacia de la metodología y tener alternativas para la toma de decisiones en el algoritmo presentado según los resultados obtenidos.

7. Anexos

A continuación, se mostrarán las gráficas de cada uno de los resultados que se obtuvieron de las pruebas realizadas para cada una de las placas de aluminio con arreglos de 3,4 y 6 sensores piezoeléctricos distribuidos. Las figuras que se presentan son el reflejo de los resultados que se presentan en las tablas 4, 5, 6, 7,8 y 9.

7.1 Resultados 3 sensores Sin Filtro Golay

- Patrón

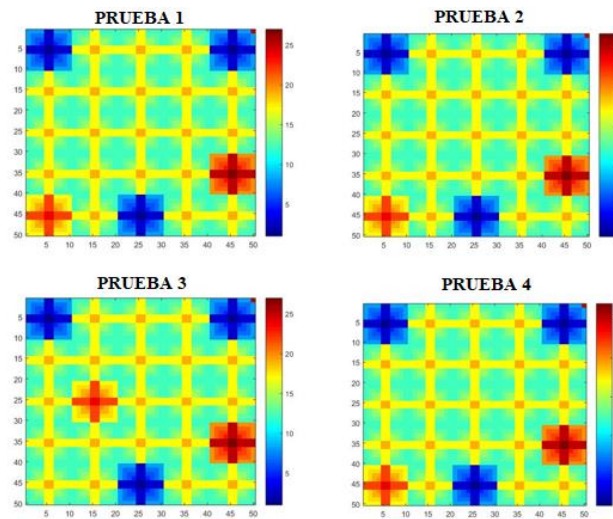


Figura 49.(MT) para predicción daño en la ubicación 1, placa de 3 sensores

- Daño A

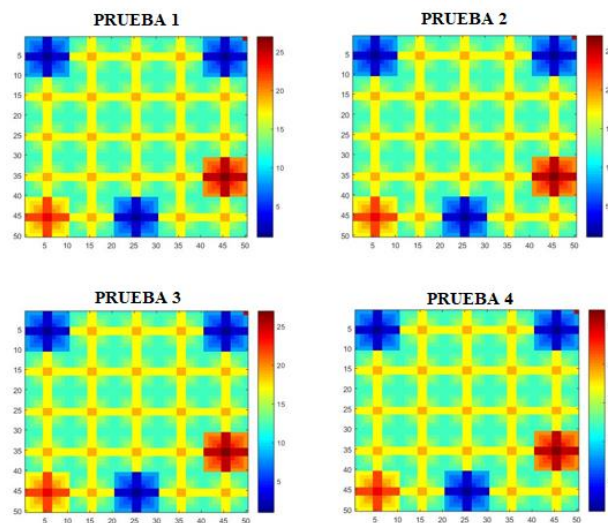


Figura 50.(MT) para predicción daño en la ubicación 2, placa de 3 sensores

- Daño B

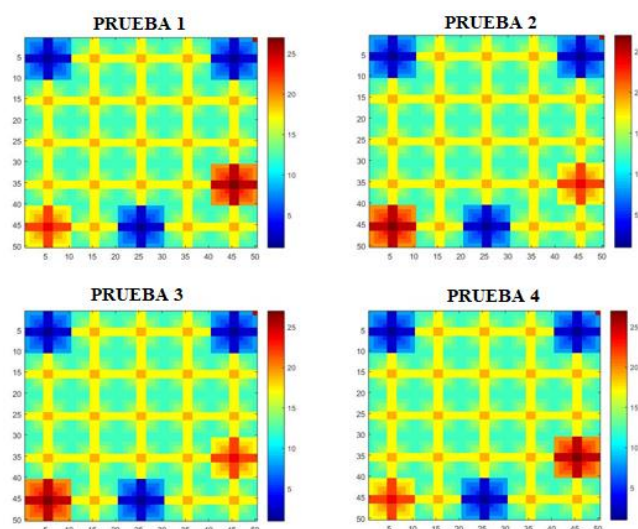


Figura 51.(MT) para predicción daño en la ubicación 3, placa de 3 sensores

- Daño C

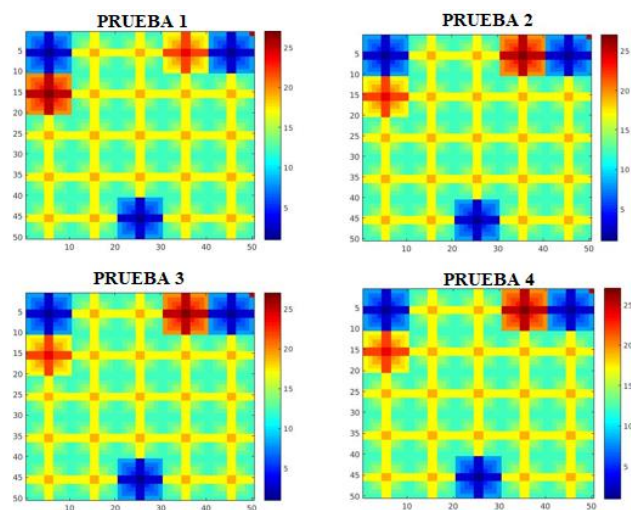


Figura 52. (MT) para predicción daño en la ubicación 4, placa de 3 sensores

- Daño D

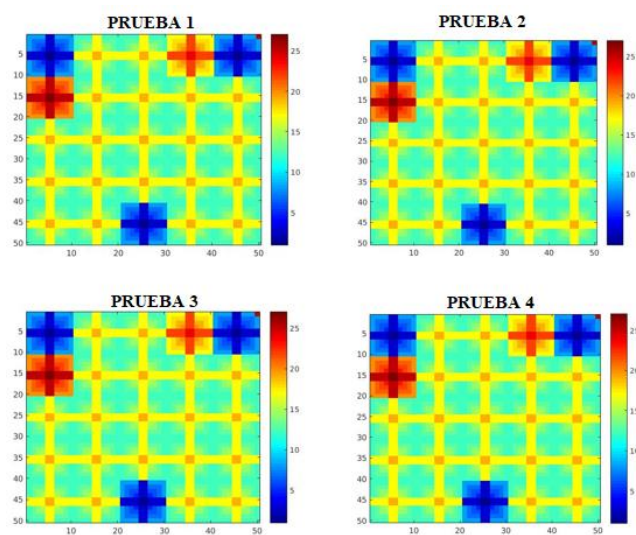


Figura 53. (MT) para predicción daño en la ubicación 5, placa de 3 sensores

- Daño E

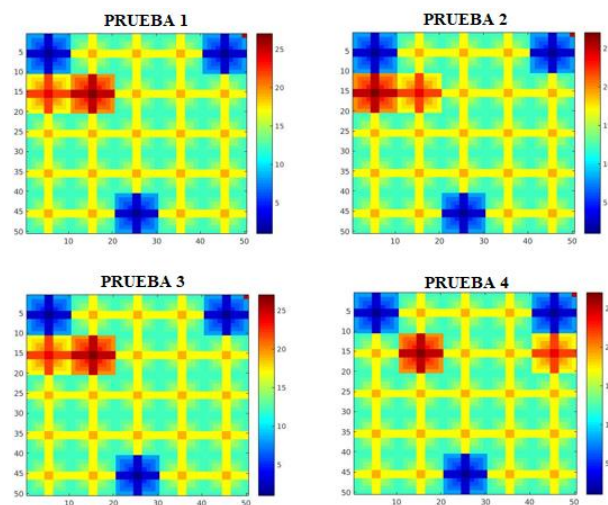


Figura 54. (MT) para predicción daño en la ubicación 6, placa de 3 sensores

- Daño F

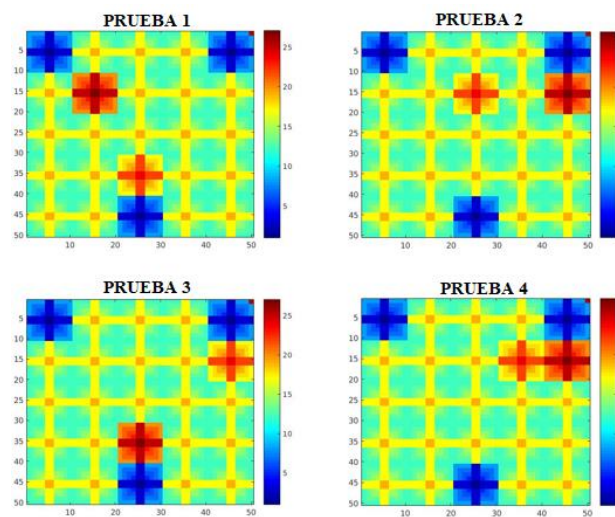


Figura 55. (MT) para predicción daño en la ubicación 7, placa de 3 sensores

- Daño G

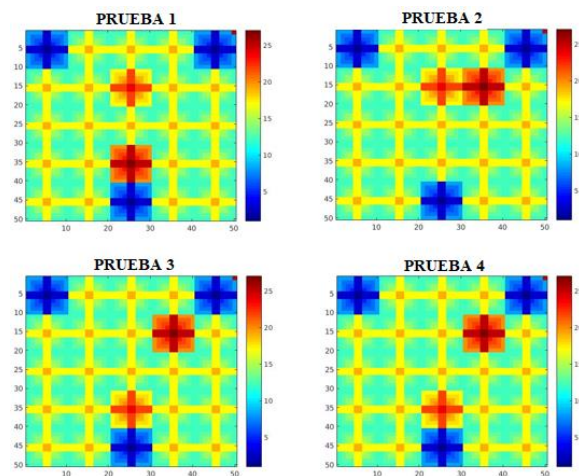


Figura 56. (MT) para predicción daño en la ubicación 8, placa de 3 sensores

- Daño H

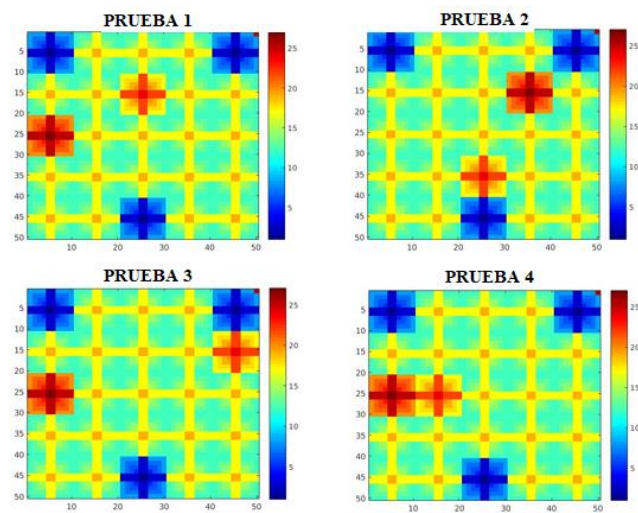


Figura 57. (MT) para predicción daño en la ubicación 9, placa de 3 sensores

- Daño I

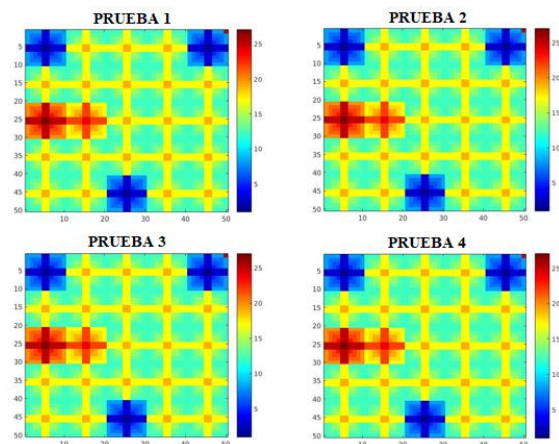


Figura 58. (MT) para predicción daño en la ubicación 10, placa de 3 sensores

- Daño J

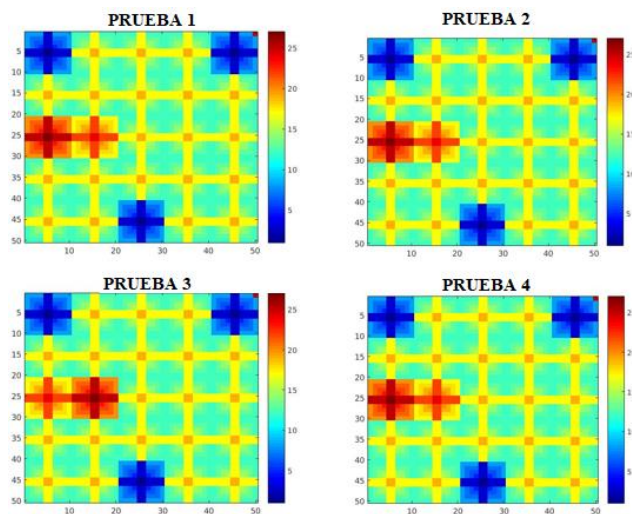


Figura 59. (MT) para predicción daño en la ubicación 11, placa de 3 sensores

- Daño K

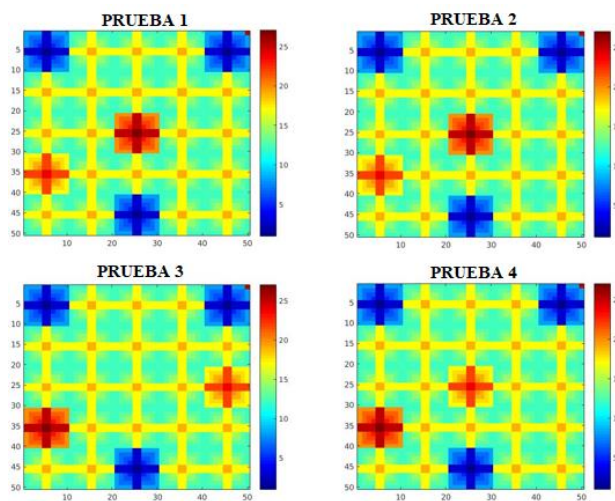


Figura 60. (MT) para predicción daño en la ubicación 12, placa de 3 sensores

- Daño L

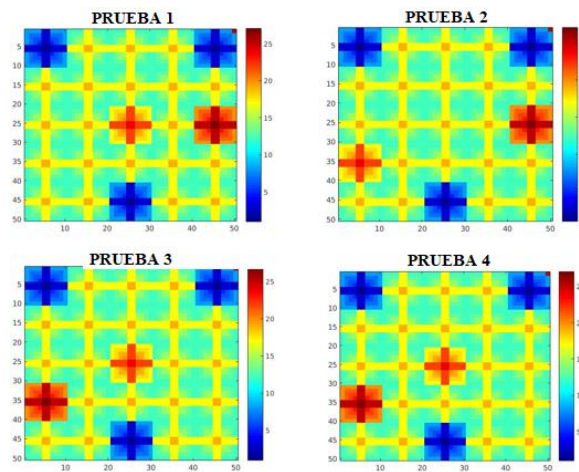


Figura 61. (MT) para predicción daño en la ubicación 13, placa de 3 sensores

- Daño M

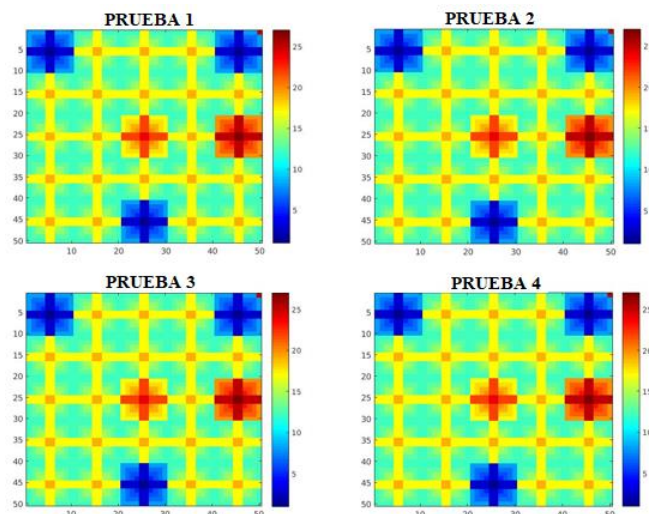


Figura 62. (MT) para predicción daño en la ubicación 14, placa de 3 sensores

- Daño N

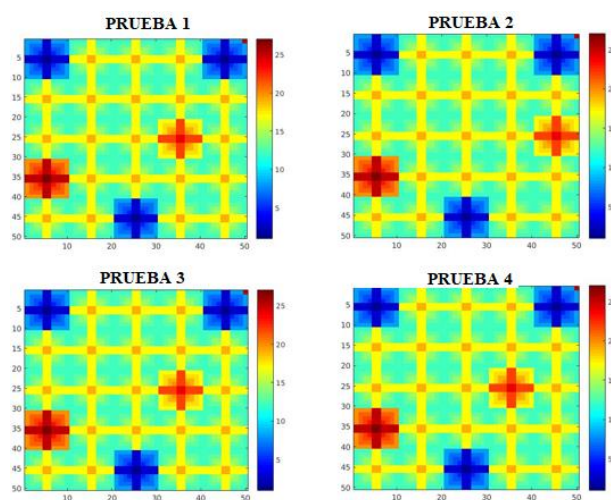


Figura 63. (MT) para predicción daño en la ubicación 15, placa de 3 sensores

- Daño O

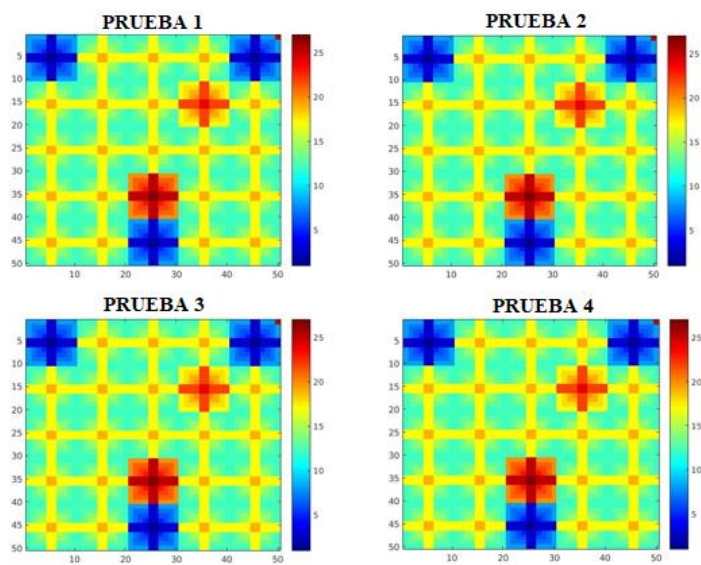


Figura 64. (MT) para predicción daño en la ubicación 16, placa de 3 sensores

- Daño P

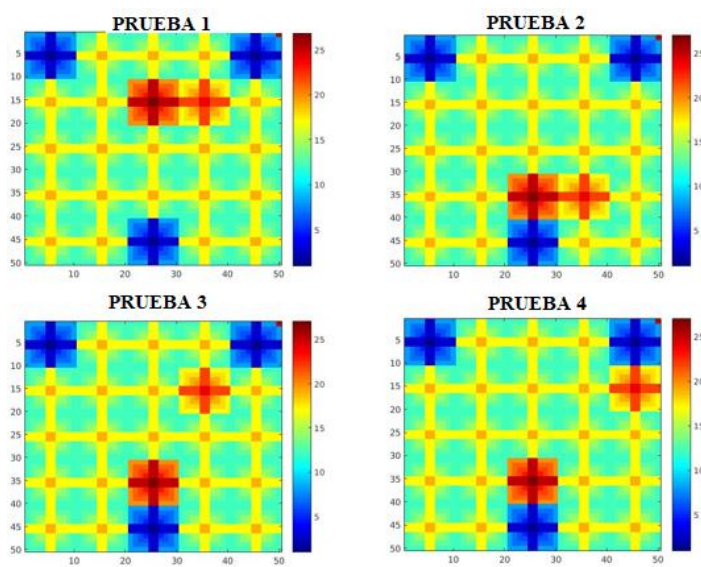


Figura 65. (MT) para predicción daño en la ubicación 17, placa de 3 sensores

- Daño Q

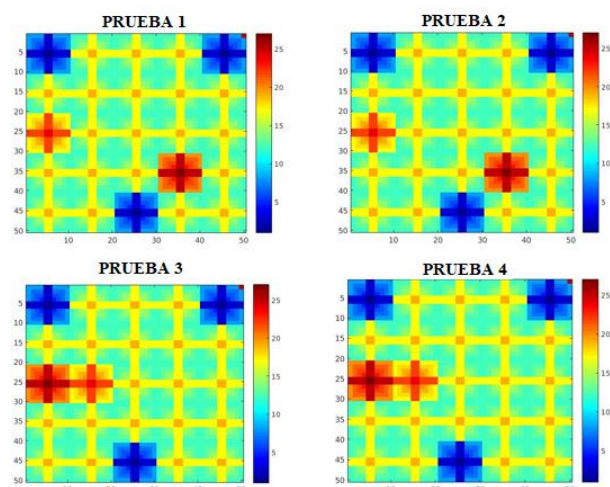


Figura 66. (MT) para predicción daño en la ubicación 18, placa de 3 sensores

- Daño R

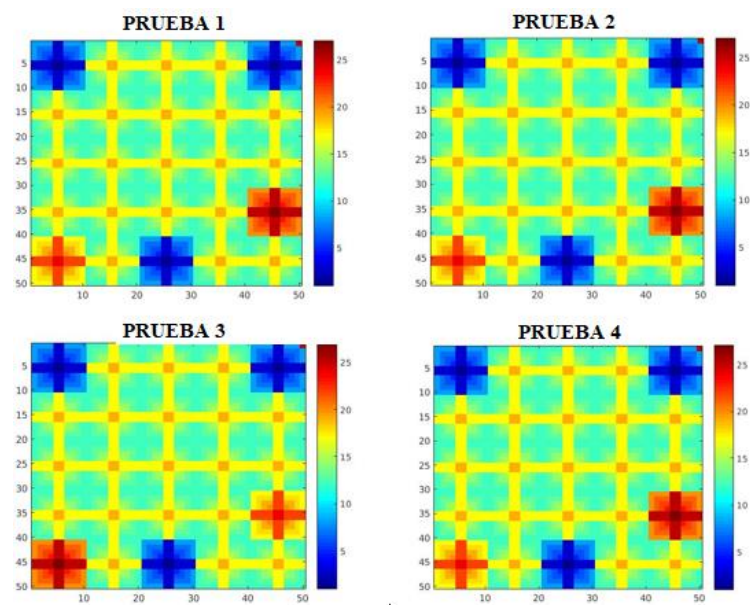


Figura 67. (MT) para predicción daño en la ubicación 19, placa de 3 sensores

- Daño S

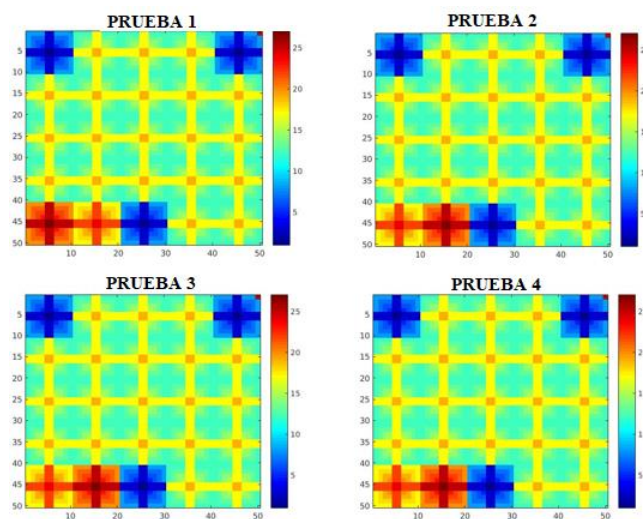


Figura 68. (MT) para predicción daño en la ubicación 20, placa de 3 sensores

- Daño T

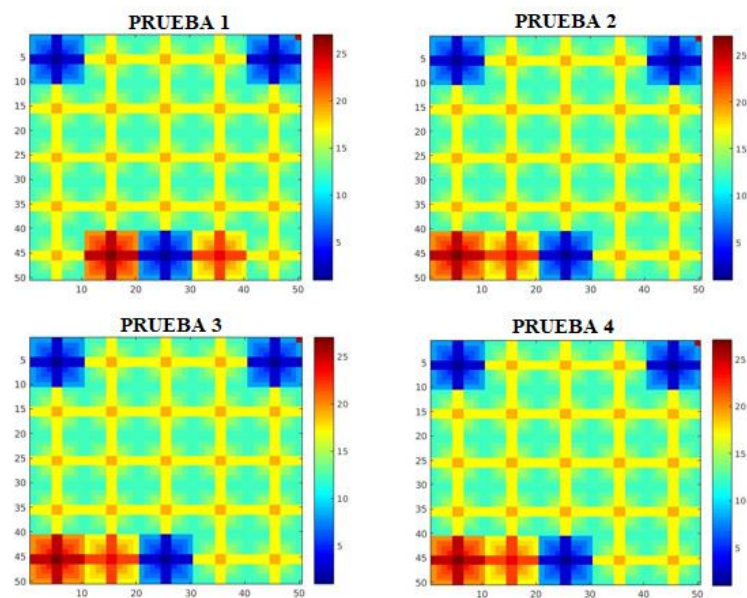


Figura 69. (MT) para predicción daño en la ubicación 21, placa de 3 sensores

- Daño U

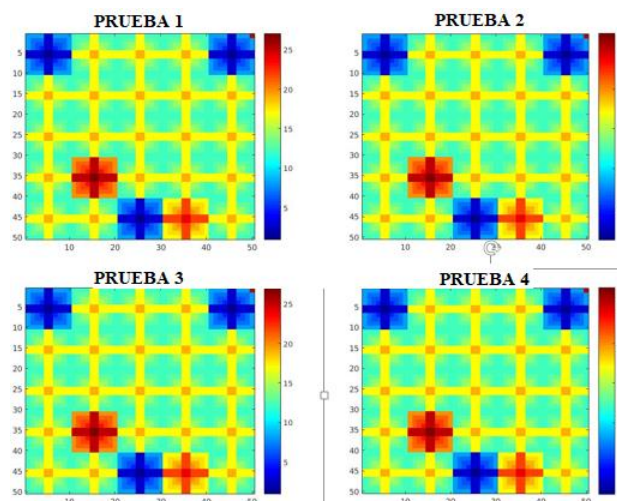


Figura 70. (MT) para predicción daño en la ubicación 22, placa de 3 sensores

- Daño V

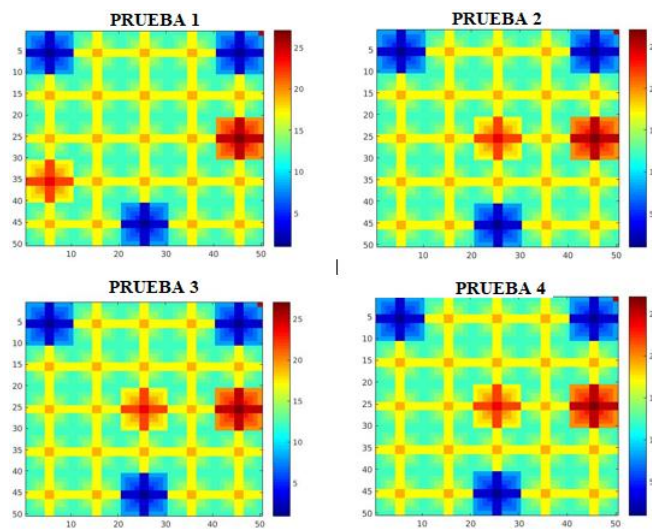


Figura 71. (MT) para predicción daño en la ubicación 23, placa de 3 sensores

7.2 Resultados 3 sensores con Filtro Golay

- Patrón ubicación 1

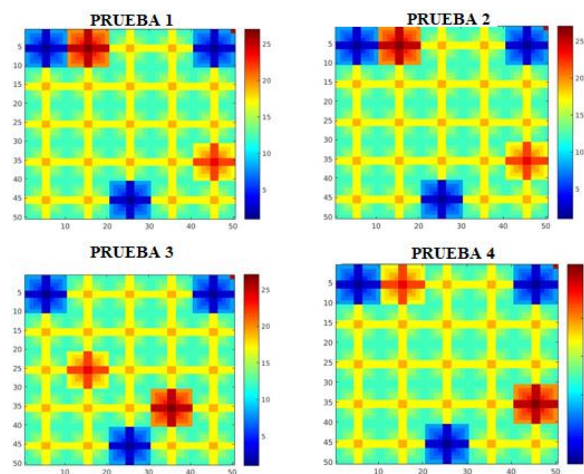


Figura 72. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 1, placa de 3 sensores

- Daño A ubicación 2

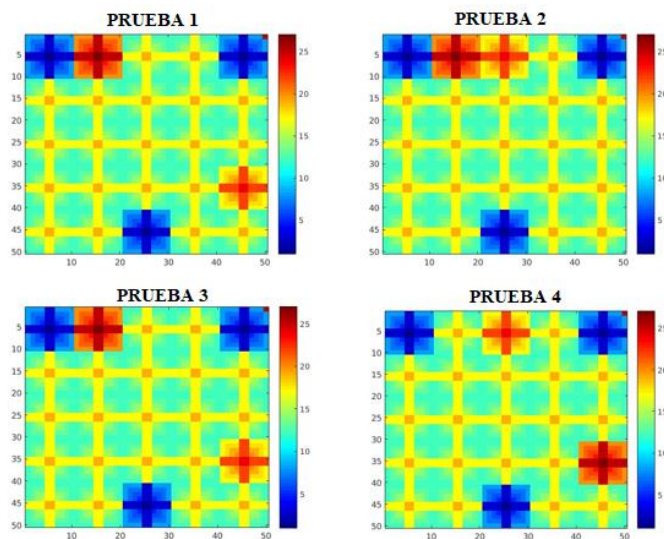


Figura 73. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 2, placa de 3 sensores

- Daño B ubicación 3

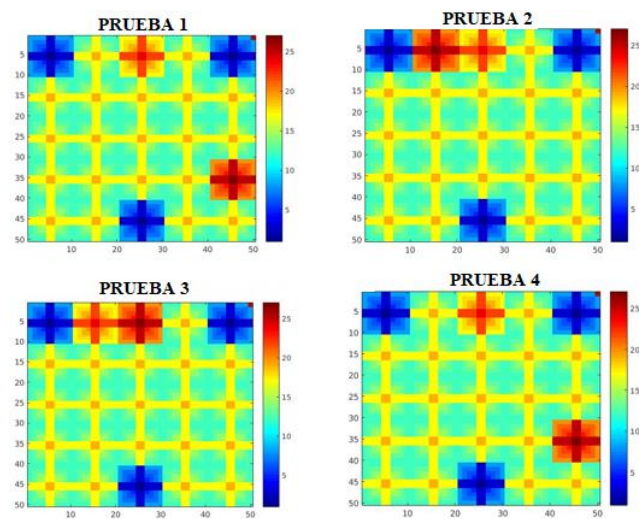


Figura 74. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 3, placa de 3 sensores

- Daño C ubicación 4

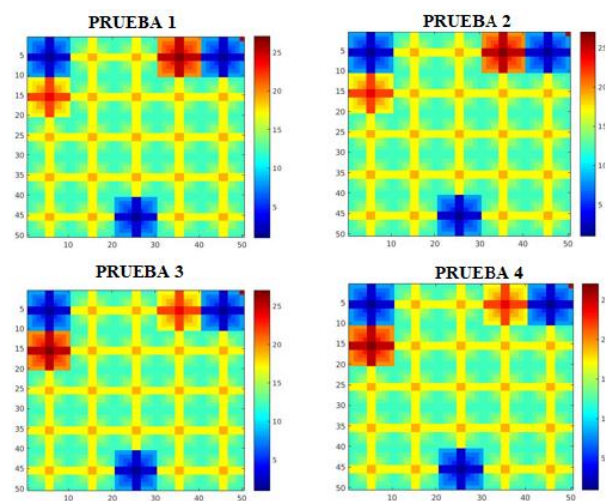


Figura 75. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 4, placa de 3 sensores

- Daño D ubicación 5

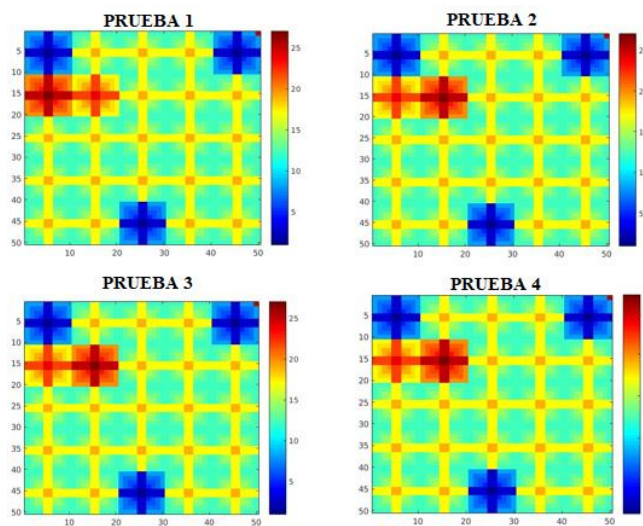


Figura 76. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 5, placa de 3 sensores

- Daño E ubicación 6

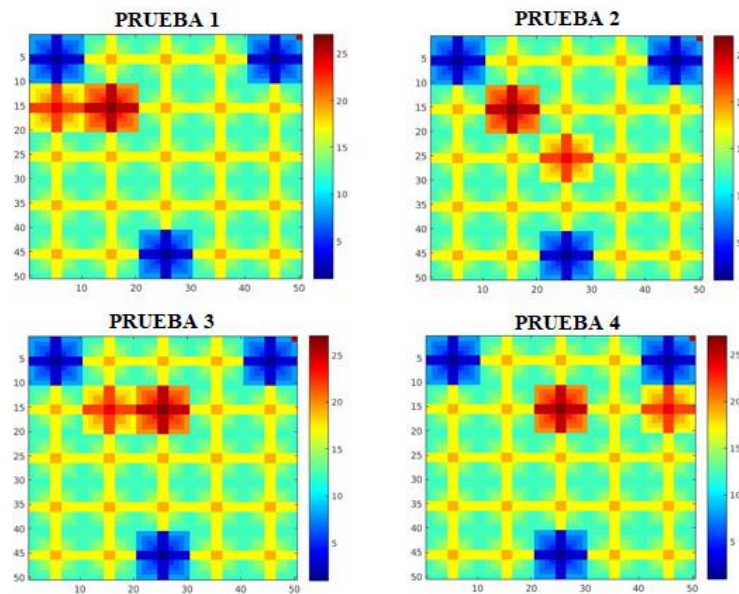


Figura 77. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 6, placa de 3 sensores

- Daño F ubicación 7

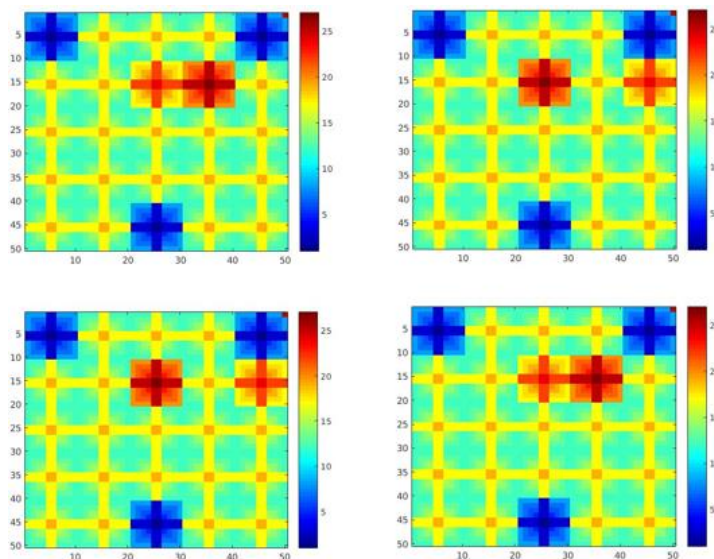


Figura 78. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 7, placa de 3 sensores

- Daño G ubicación 8

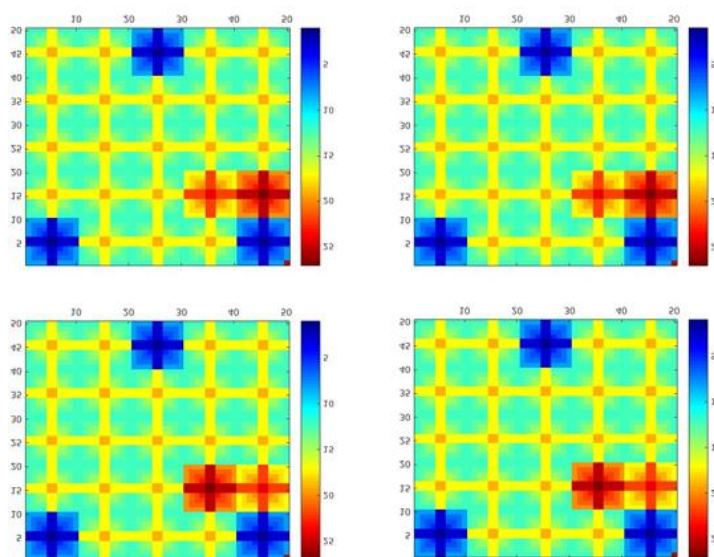


Figura 79. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 8, placa de 3 sensores

- Daño H ubicación 9

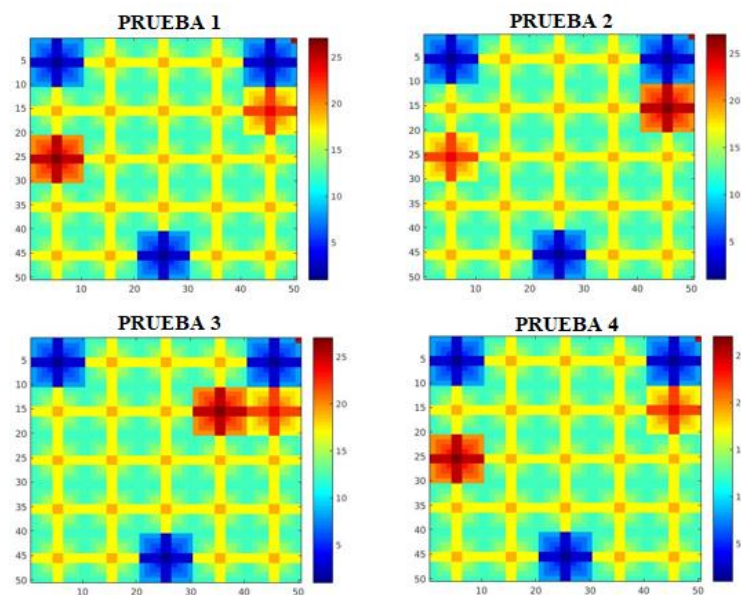


Figura 80.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 9, placa de 3 sensores

- Daño I ubicación 10

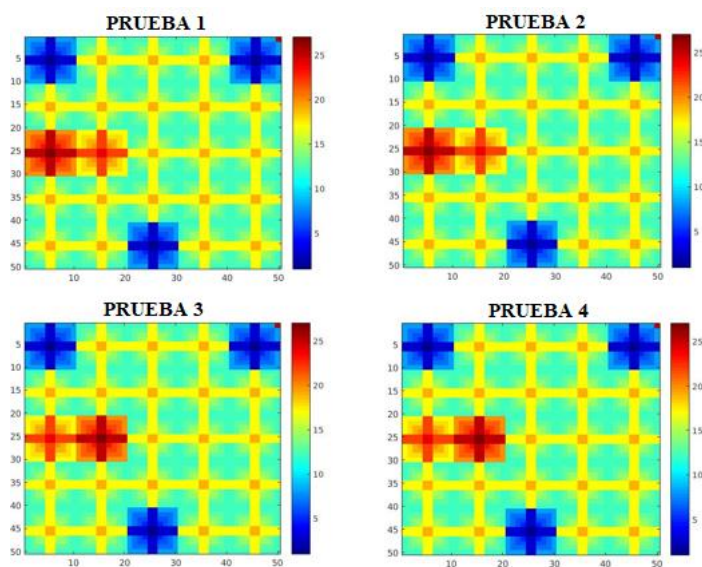


Figura 81.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 10, placa de 3 sensores

- Daño J ubicación 11

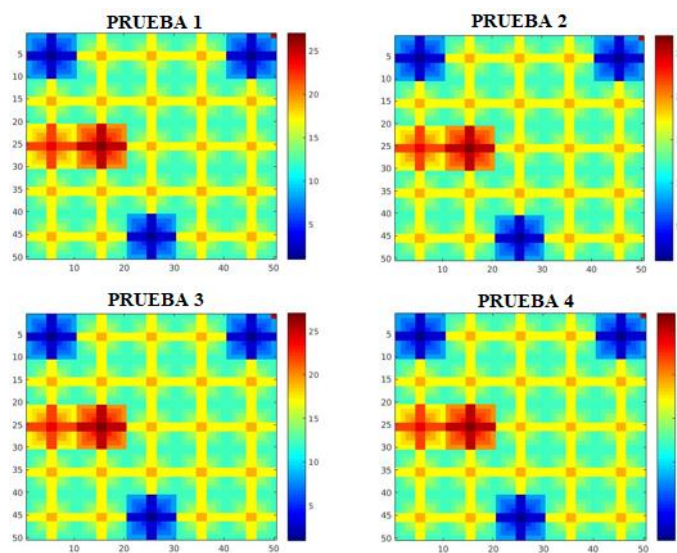


Figura 82.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 11, placa de 3 sensores

- Daño K ubicación 12

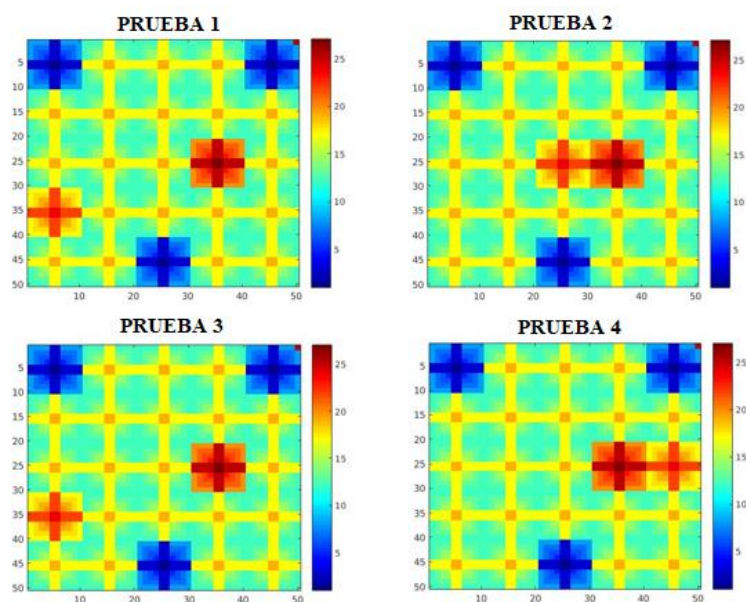


Figura 83.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 12 , placa de 3 sensores

- Daño L ubicación 13

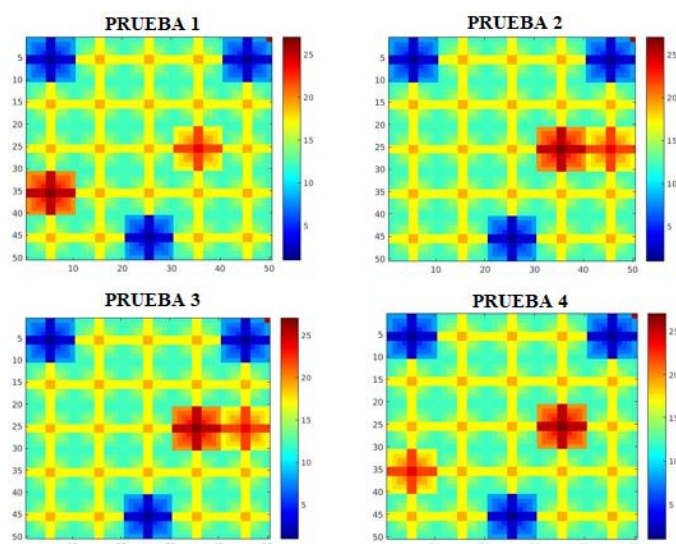


Figura 84.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 13, placa de 3 sensores

- Daño M ubicación 14

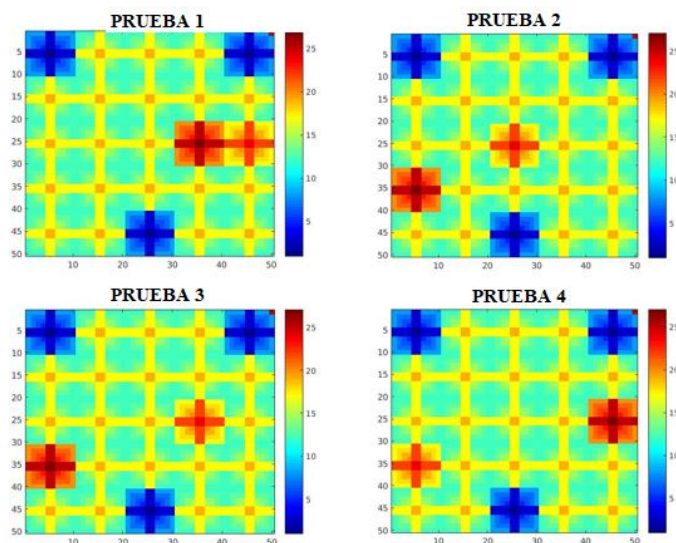


Figura 85.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 14, placa de 3 sensores

- Daño N ubicación 15

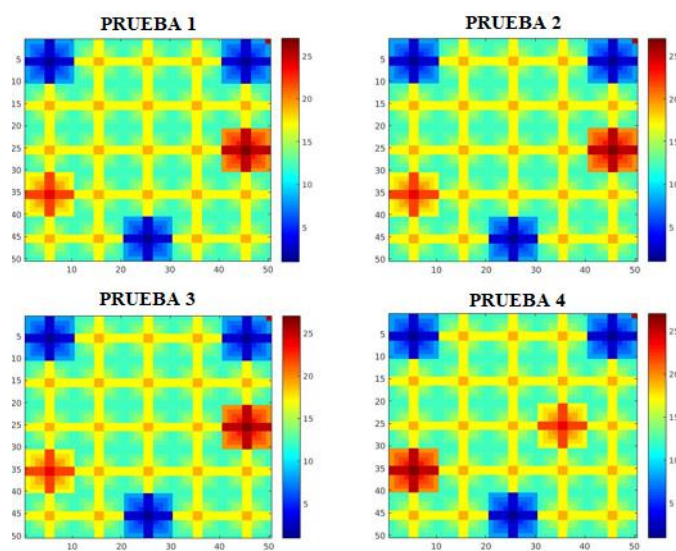


Figura 86.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 15, placa de 3 sensores

- Daño O ubicación 16

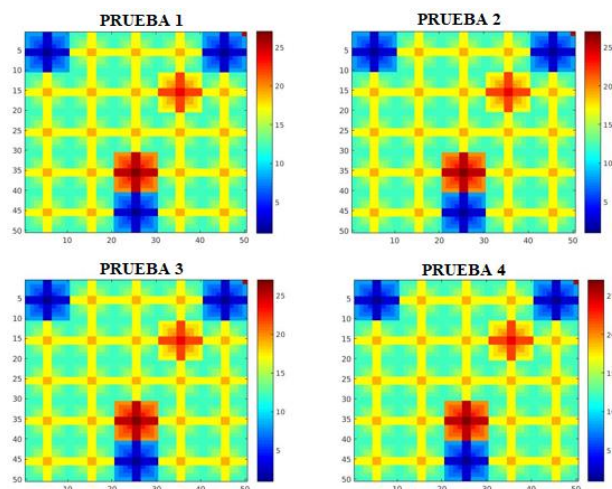


Figura 87.(MT)para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 16, placa de 3 sensores

- Daño P ubicación 17

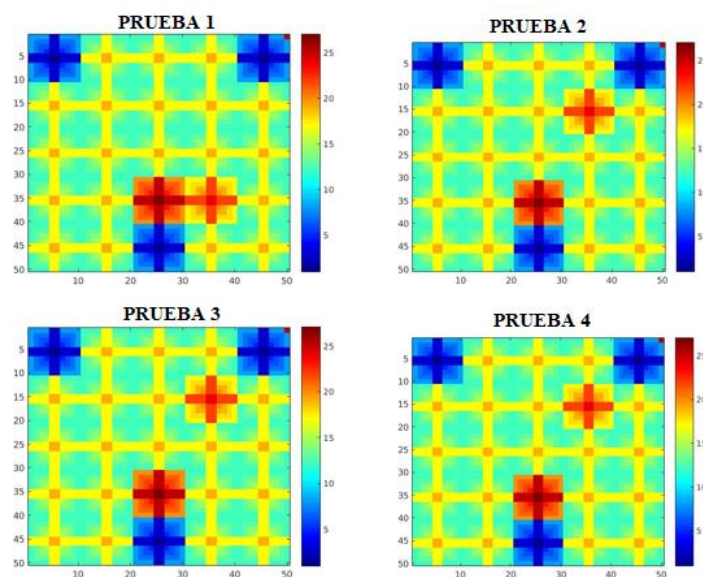


Figura 88.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 17, placa de 3 sensores

- Daño Q ubicación 18

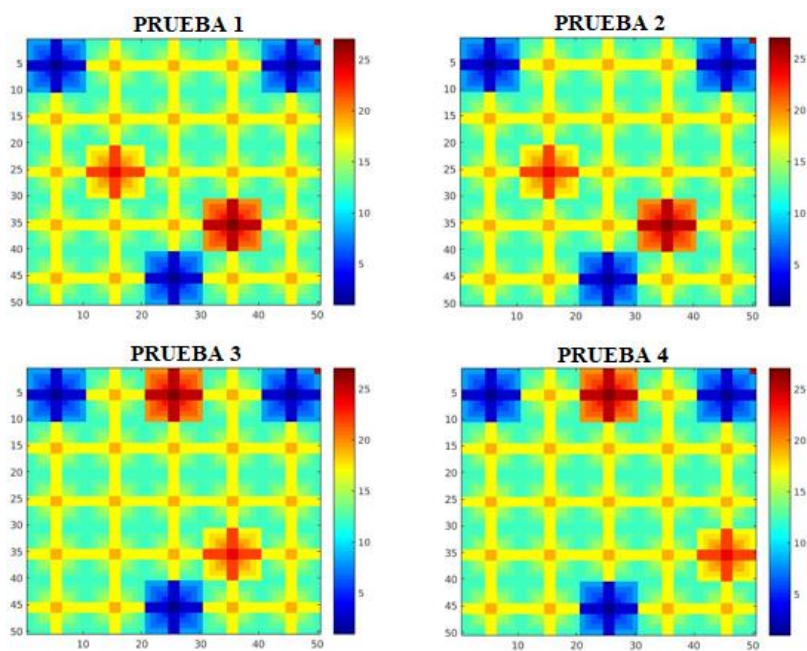


Figura 89.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 18, placa de 3 sensores

- Daño R ubicación 19

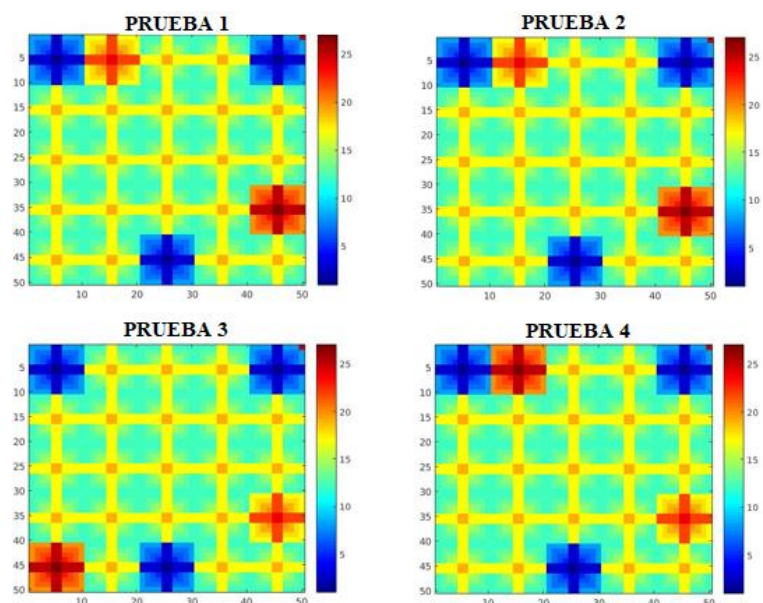


Figura 90.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 19, placa de 3 sensores

- Daño S ubicación 20

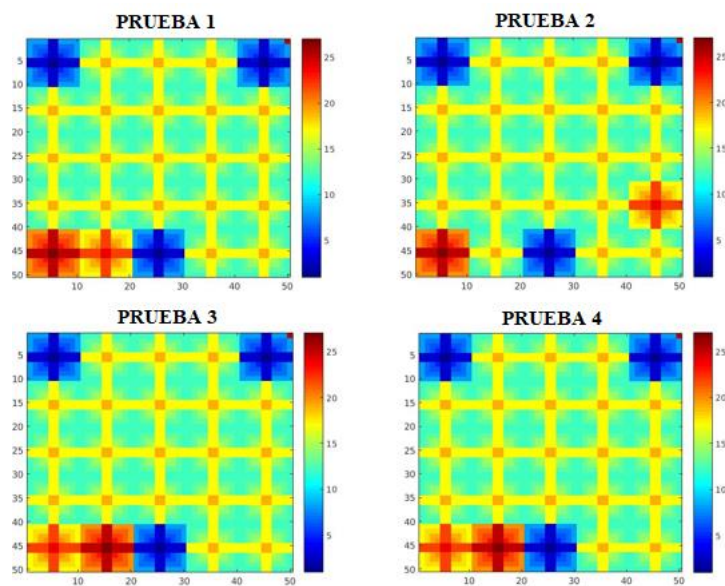


Figura 91.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 20, placa de 3 sensores

- Daño T ubicación 21

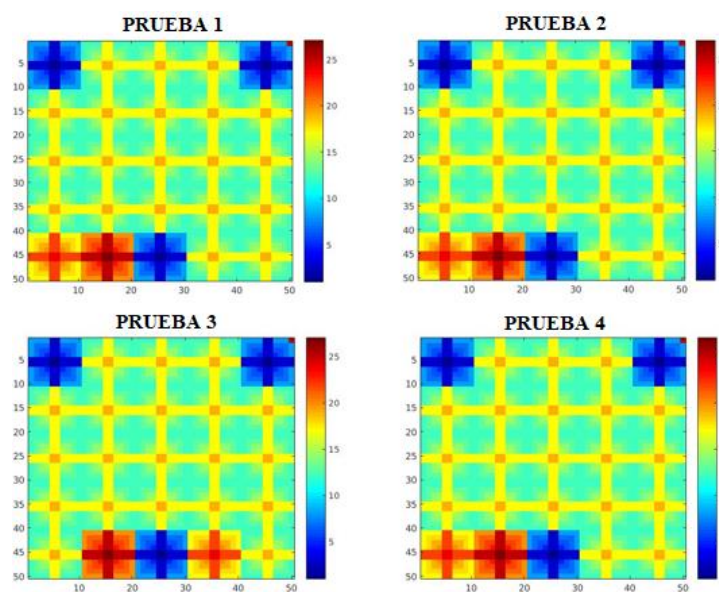


Figura 92.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 21, placa de 3 sensores

- Daño U ubicación 22

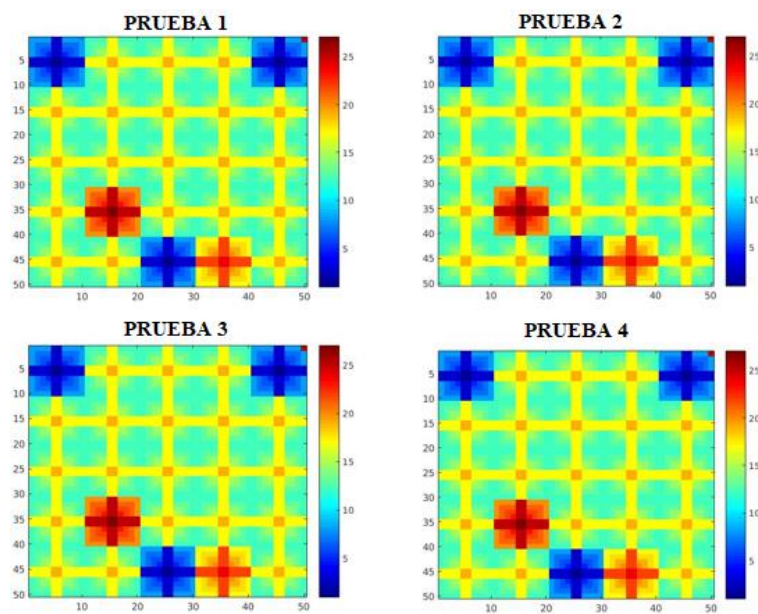


Figura 93.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 22, placa de 3 sensores

- Daño V ubicación 23

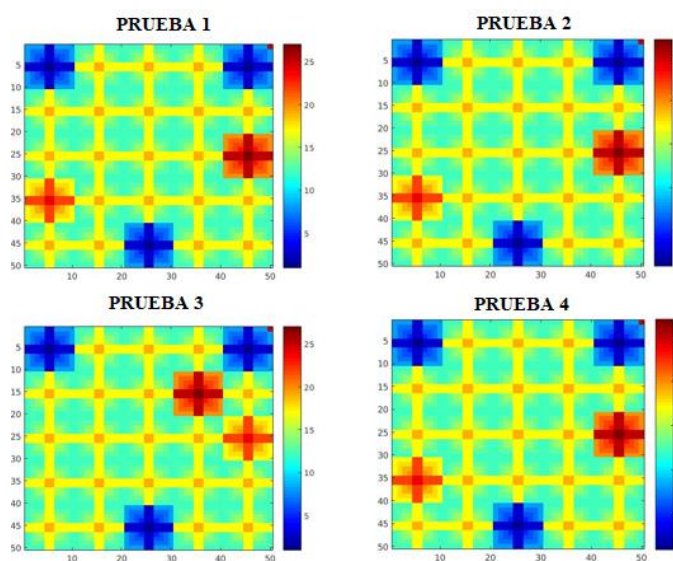


Figura 94. (MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 23, placa de 3 sensores

7.3 Resultados 4 sensores sin Filtro Golay

- Patrón ubicación 1

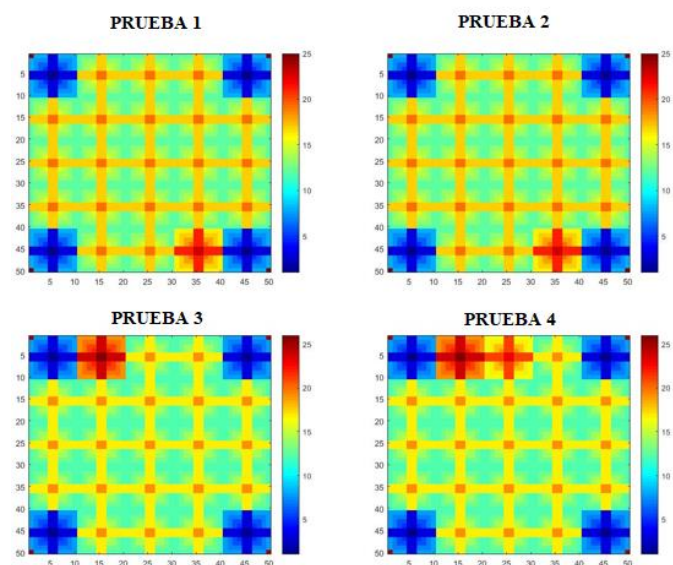


Figura 95. (MT) para predicción daño en la ubicación 1, placa de 4 sensores

- Daño A ubicación 2

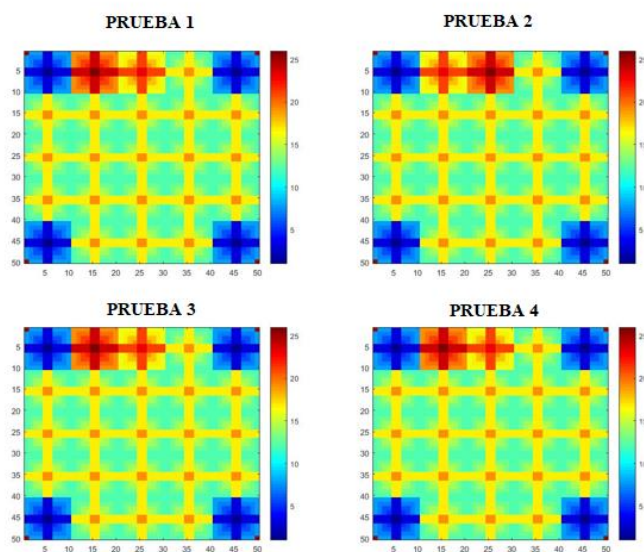


Figura 96.(MT) para predicción daño en la ubicación 2, placa de 4 sensores

- Daño B ubicación 3

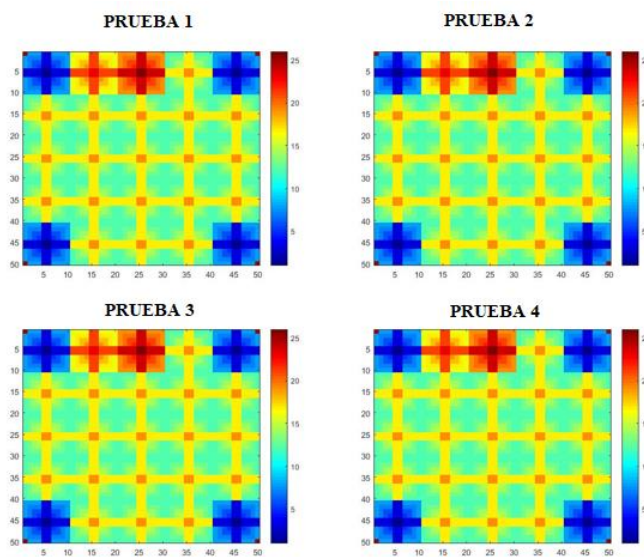


Figura 97.(MT) para predicción daño en la ubicación 3, placa de 4 sensores

- Daño C ubicación 4

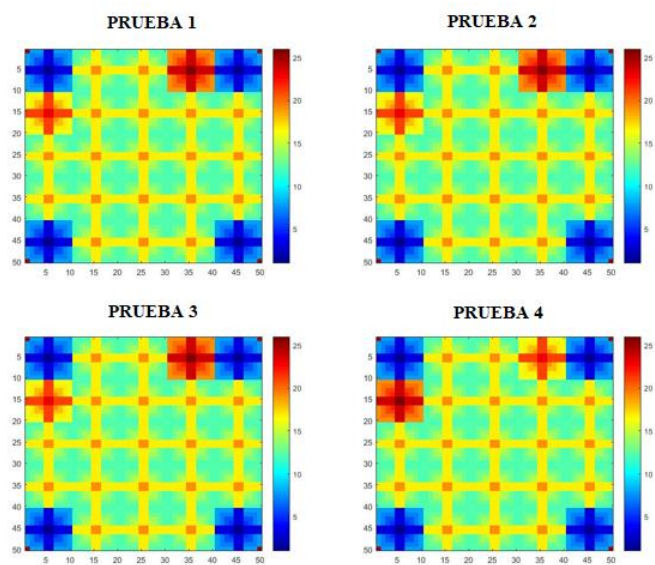


Figura 98.(MT) para predicción daño en la ubicación 4, placa de 4 sensores

- Daño D ubicación 5

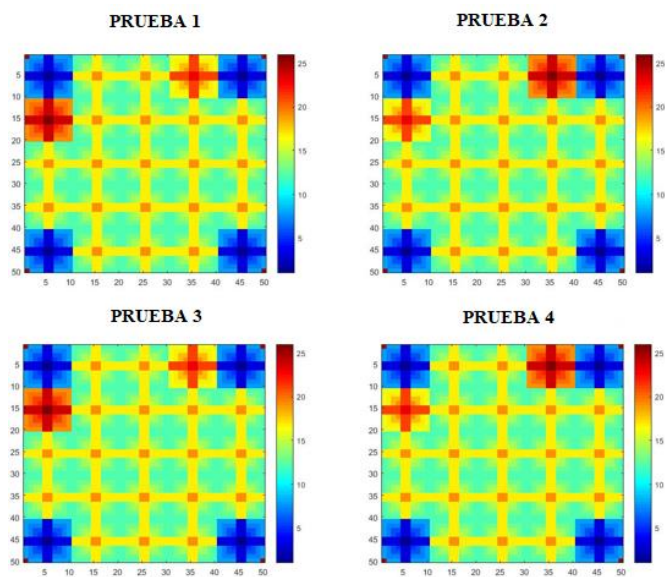


Figura 99.(MT) para predicción daño en la ubicación 5, placa de 4 sensores

- Daño E ubicación 6

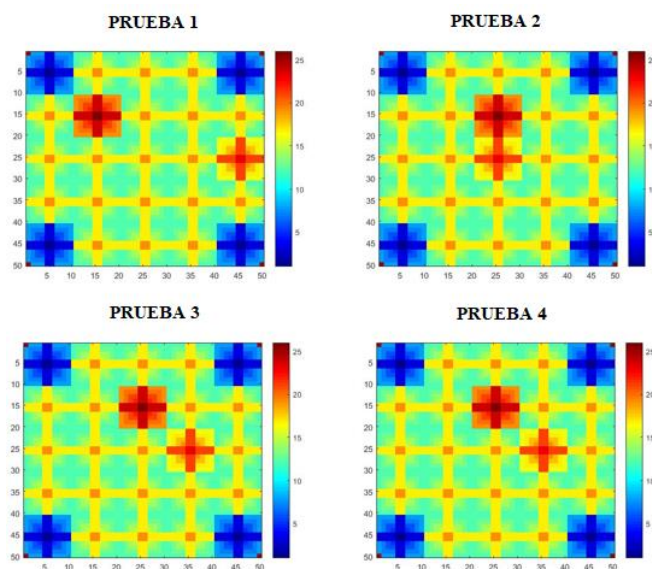


Figura 100.(MT) para predicción daño en la ubicación 6, placa de 4 sensores

- Daño F ubicación 7

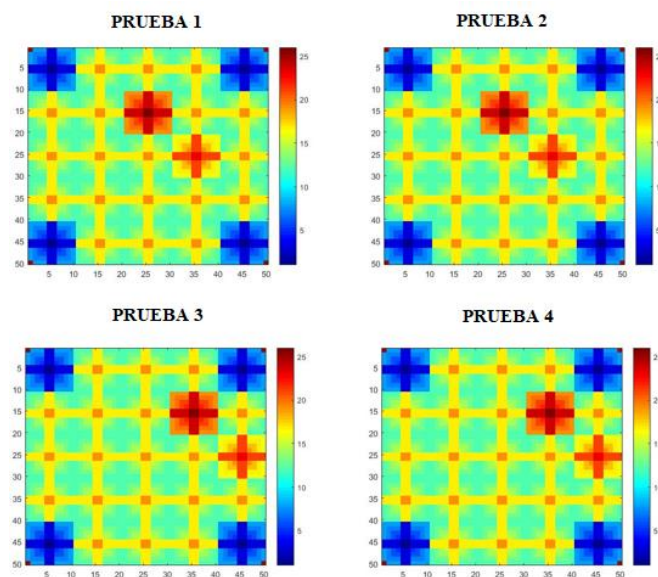


Figura 101.(MT) para predicción daño en la ubicación 7, placa de 4 sensores

- Daño G ubicación 8

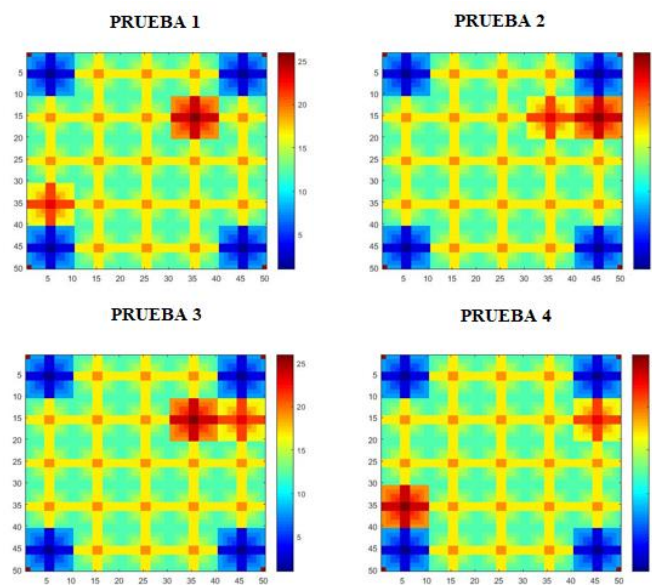


Figura 102.(MT) para predicción daño en la ubicación 8, placa de 4 sensores

- Daño H ubicación 9

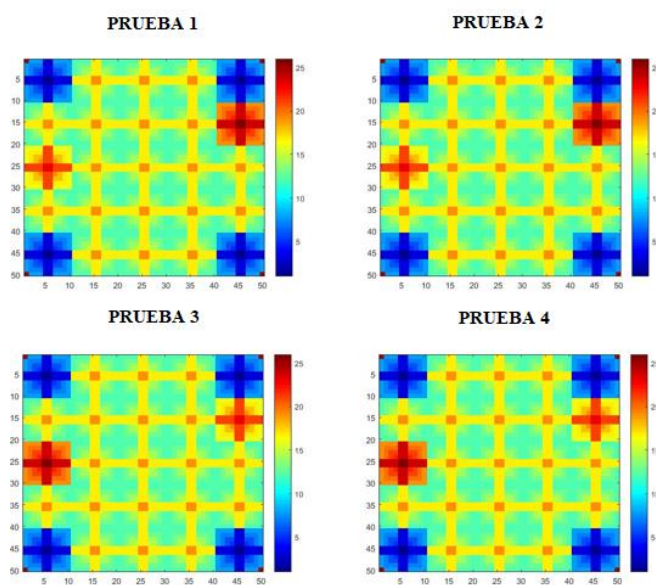


Figura 103.(MT) para predicción daño en la ubicación 9, placa de 4 sensores

- Daño I ubicación 10

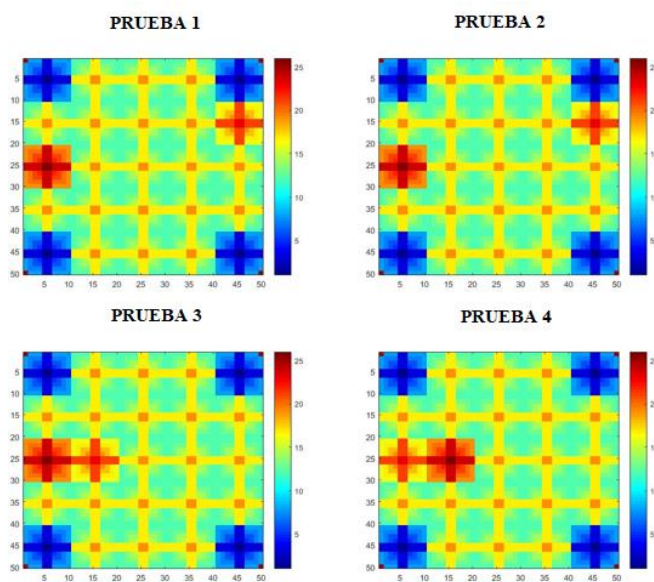


Figura 104.(MT) para predicción daño en la ubicación 10, placa de 4 sensores

- Daño J ubicación 11

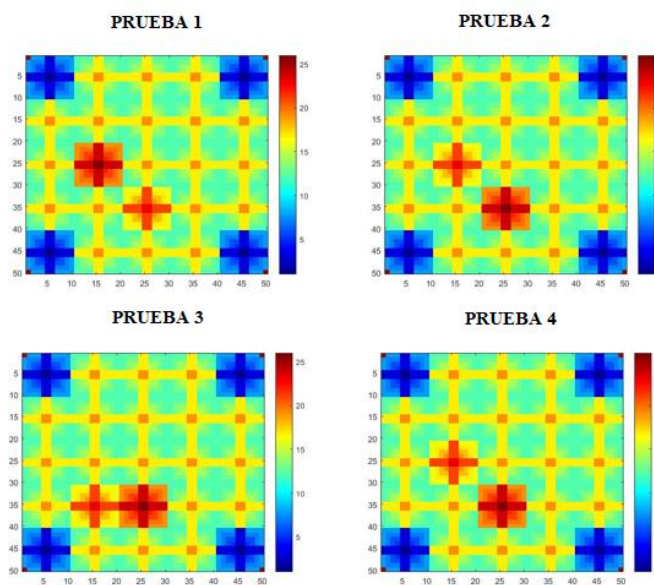


Figura 105.(MT) para predicción daño en la ubicación 11, placa de 4 sensores

- Daño K ubicación 12

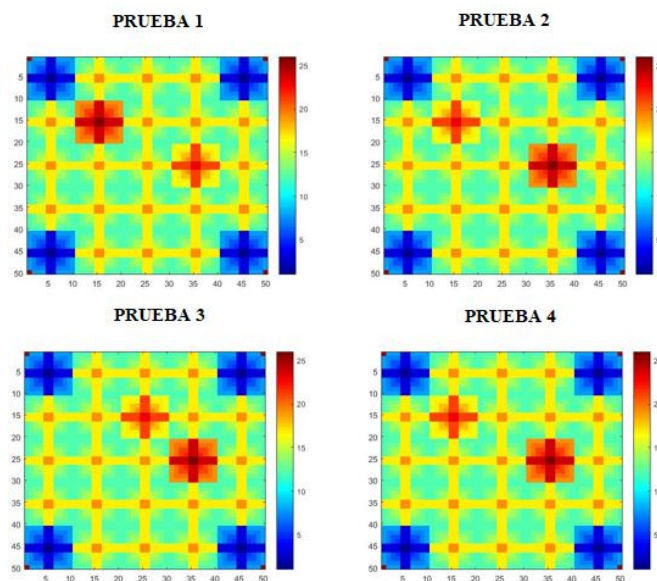


Figura 106.(MT) para predicción daño en la ubicación 12 , placa de 4 sensores

- Daño L ubicación 13

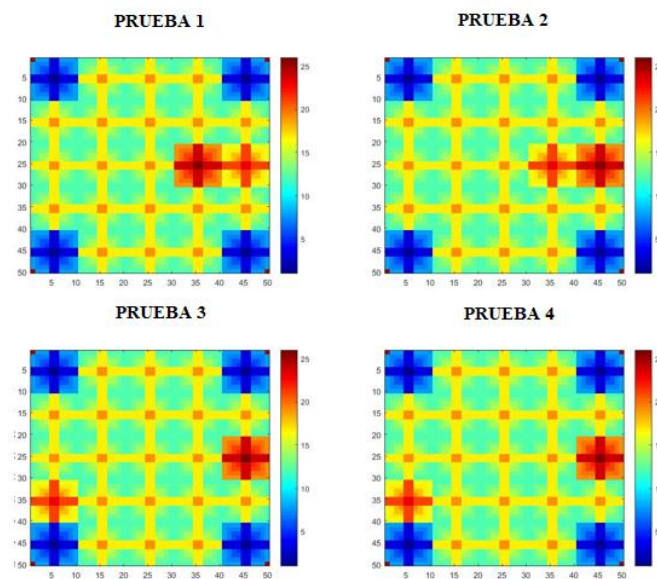


Figura 107.(MT) para predicción daño en la ubicación 13 , placa de 4 sensores

- Daño M ubicación 14

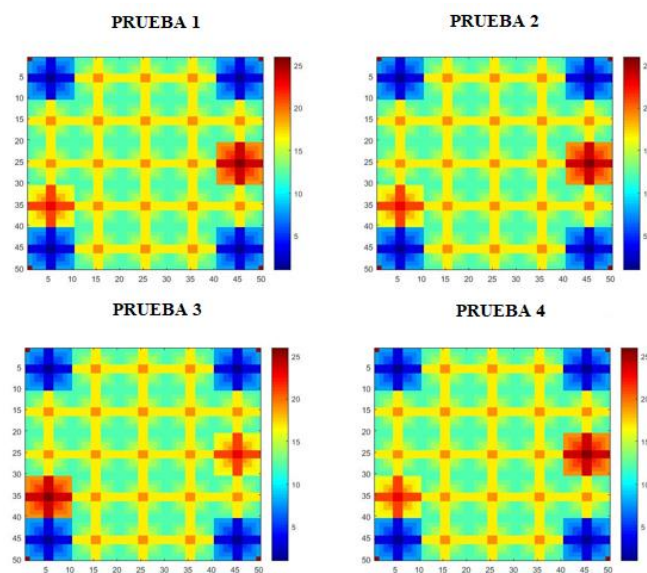


Figura 108.(MT) para predicción daño en la ubicación 14, placa de 4 sensores

- Daño N ubicación 15

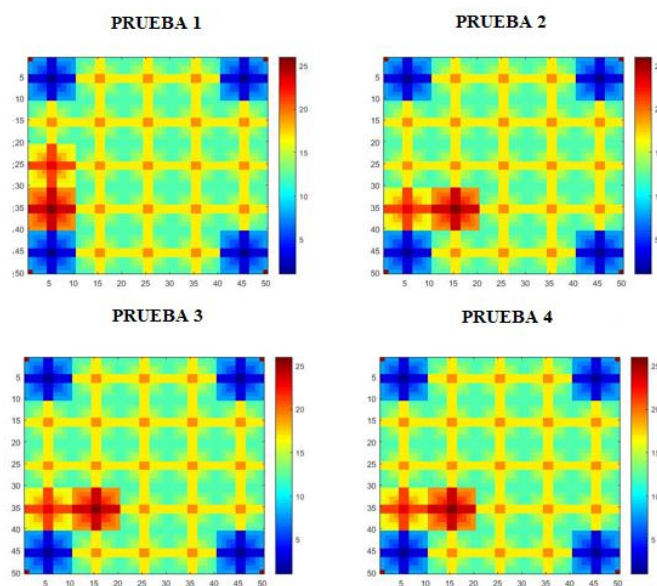


Figura 109.(MT) para predicción daño en la ubicación 15, placa de 4 sensores

- Daño O ubicación 16

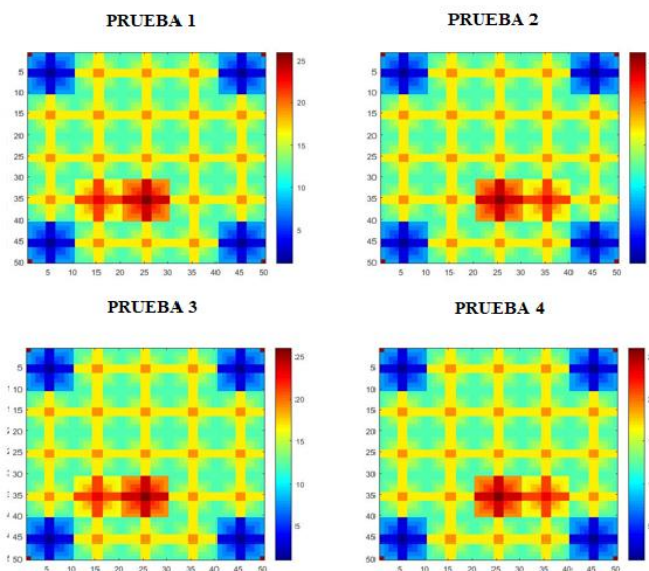


Figura 110.(MT) para predicción daño en la ubicación 16, placa de 4 sensores

- Daño P ubicación 17

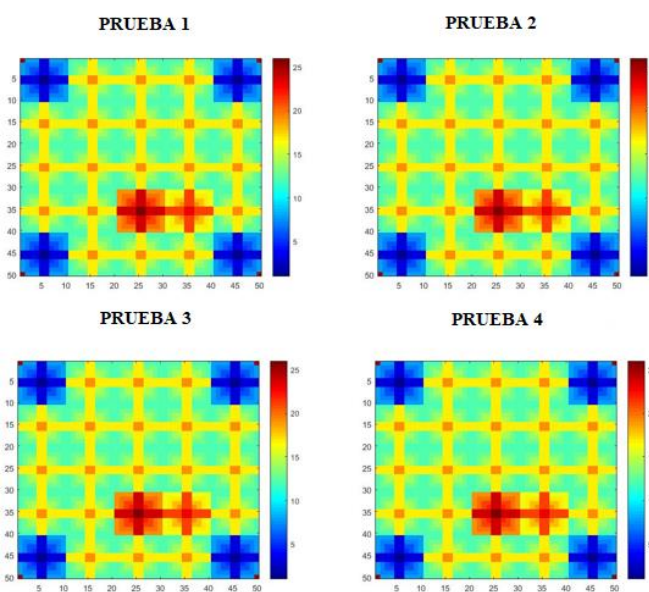


Figura 111.(MT) para predicción daño en la ubicación 17, placa de 4 sensores

- Daño Q ubicación 18

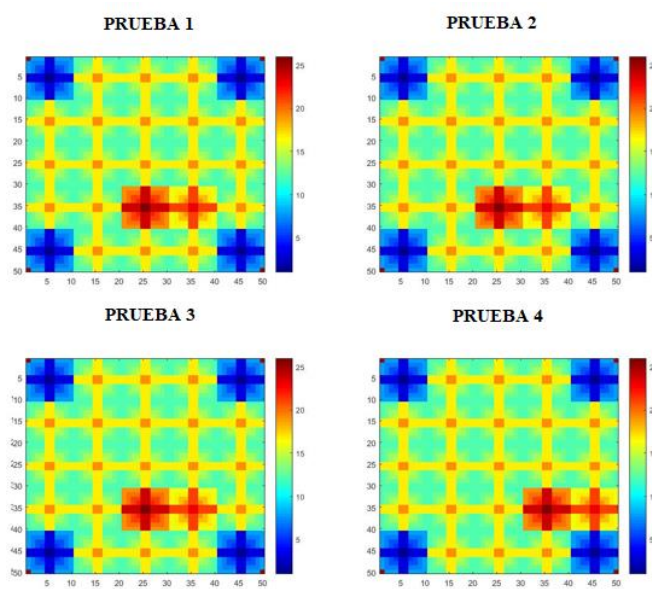


Figura 112.(MT) para predicción daño en la ubicación 18, placa de 4 sensores

- Daño R ubicación 19

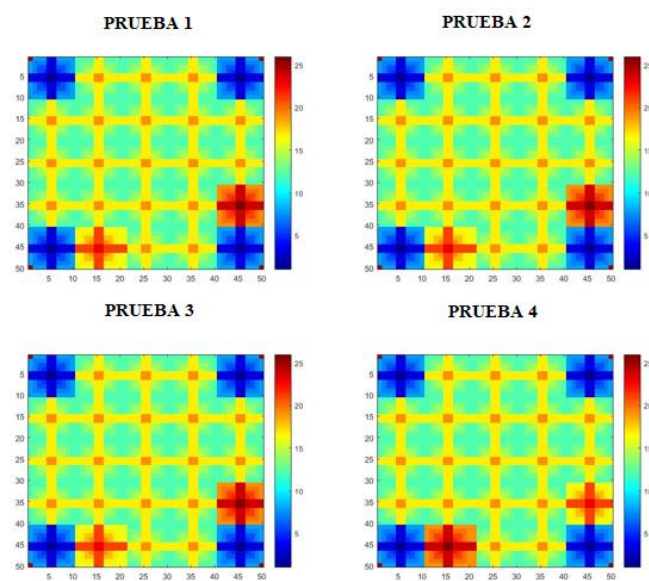


Figura 113.(MT) para predicción daño en la ubicación 19, placa de 4 sensores

- Daño S ubicación 20

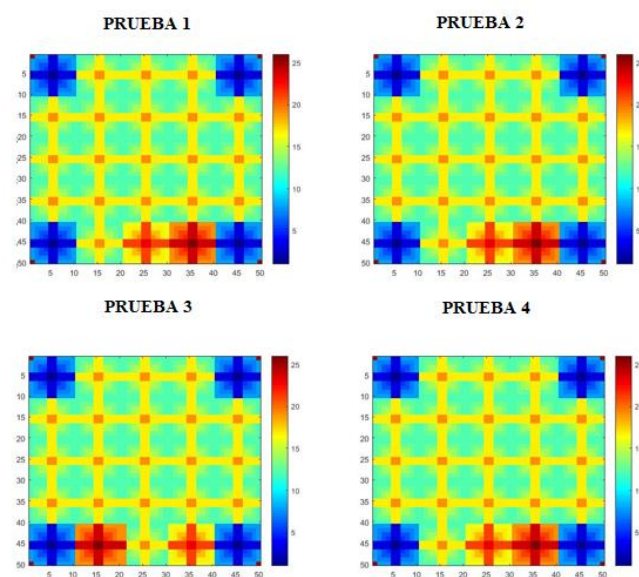


Figura 114.(MT) para predicción daño en la ubicación 20, placa de 4 sensores

- Daño T ubicación 21

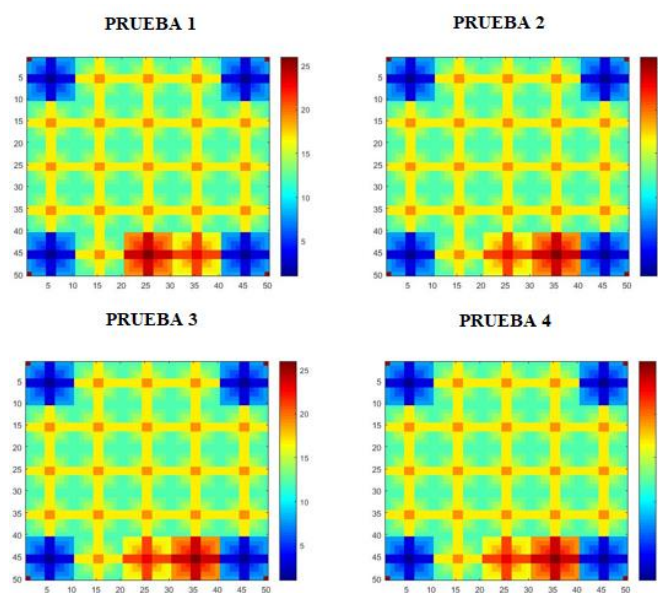


Figura 115.(MT) para predicción daño en la ubicación 21, placa de 4 sensores

- Daño U ubicación 22

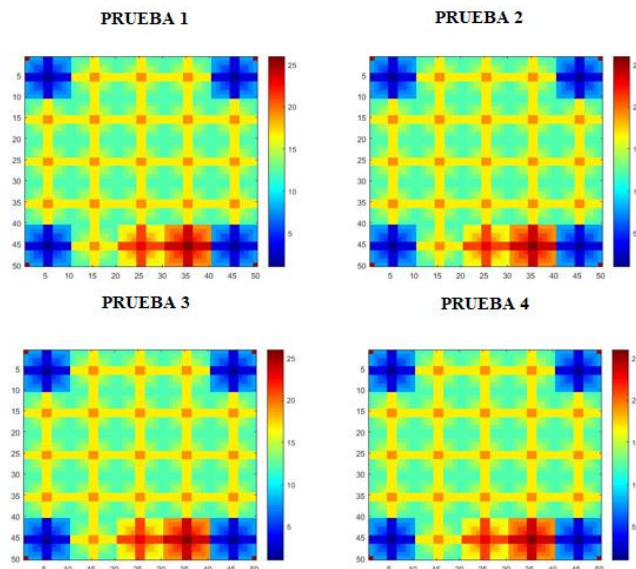


Figura 116.(MT) para predicción daño en la ubicación 22, placa de 4 sensores

7.4 Resultados 4 sensores con Filtro Golay

- Patrón ubicación 1

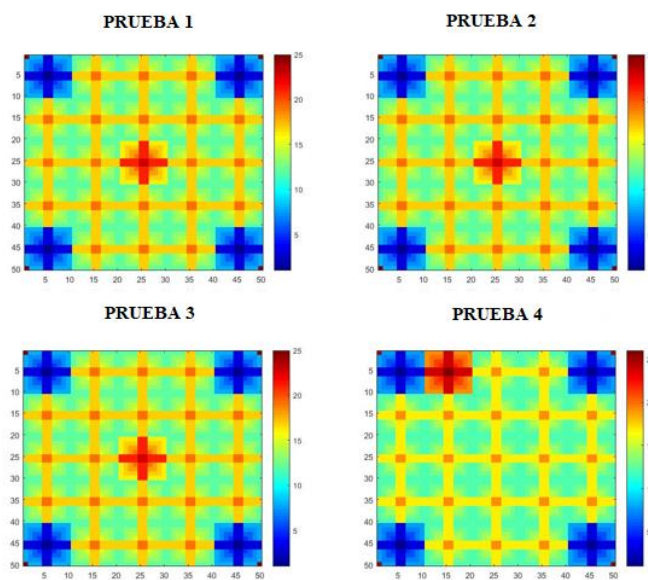


Figura 117.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 1, placa de 4 sensores

- Daño A ubicación 2

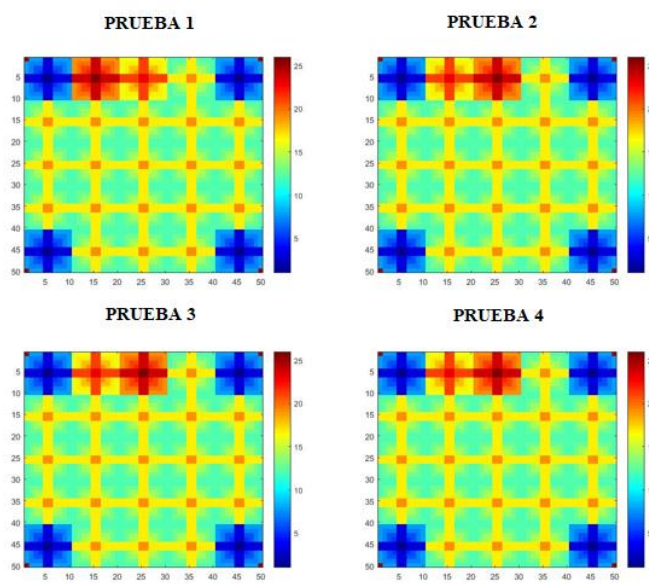


Figura 118.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 2, placa de 4 sensores

- Daño B ubicación 3

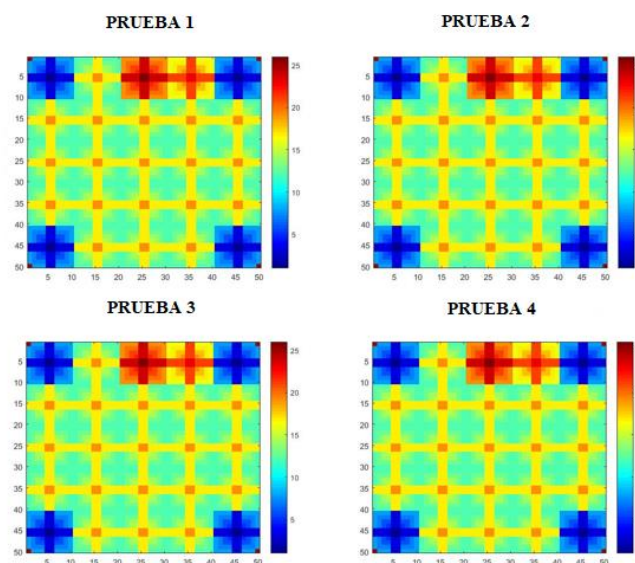


Figura 119.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 3, placa de 4 sensores

- Daño C ubicación 4

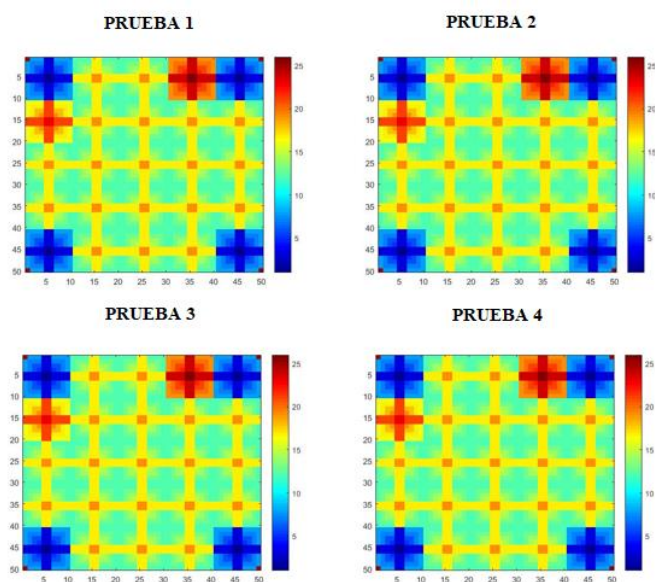


Figura 120.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 4, placa de 4 sensores

- Daño D ubicación 5

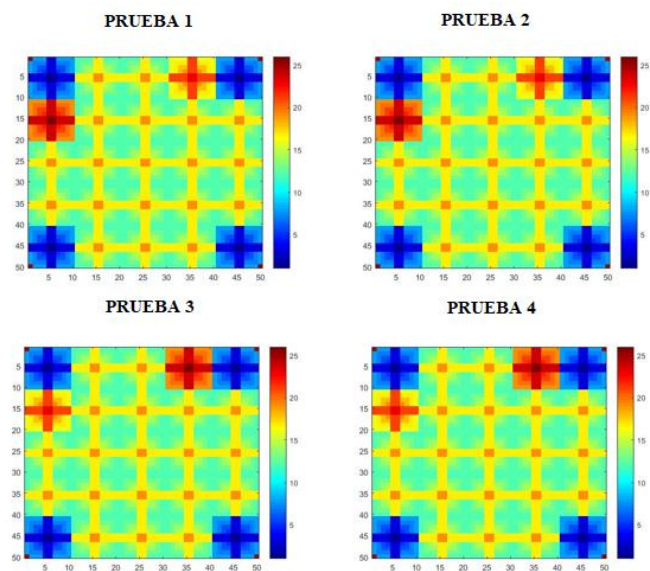


Figura 121.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 5, placa de 4 sensores

- Daño E ubicación 6

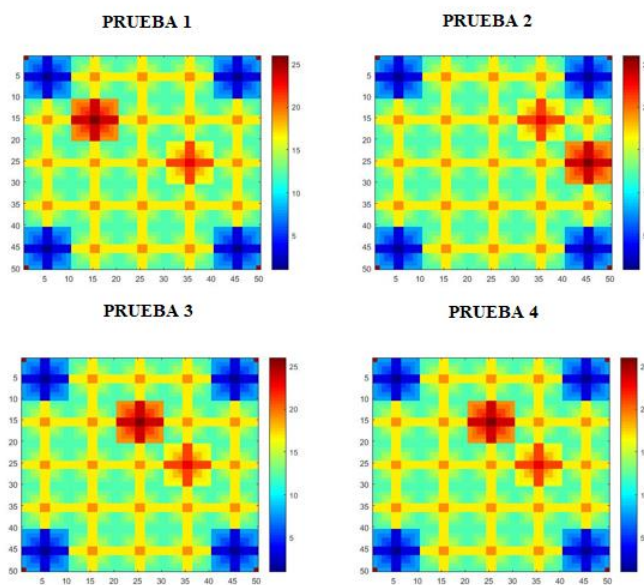


Figura 122.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 6, placa de 4 sensores

- Daño F ubicación 7

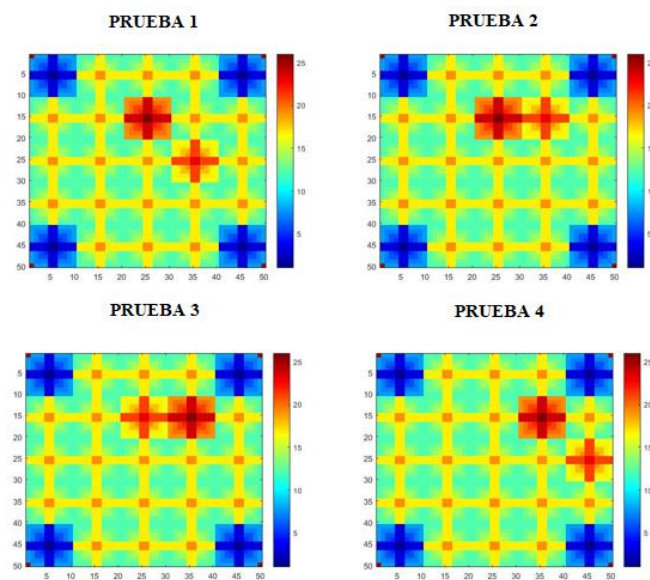


Figura 123.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 7, placa de 4 sensores

- Daño G ubicación 8

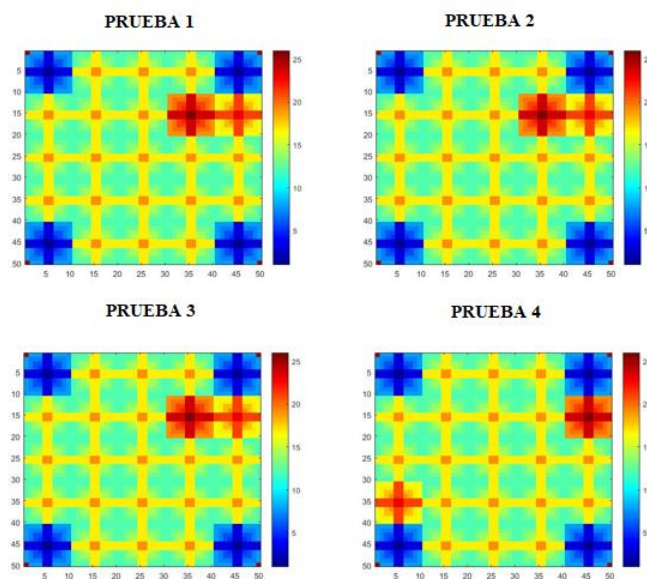


Figura 124.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 8, placa de 4 sensores

- Daño H ubicación 9

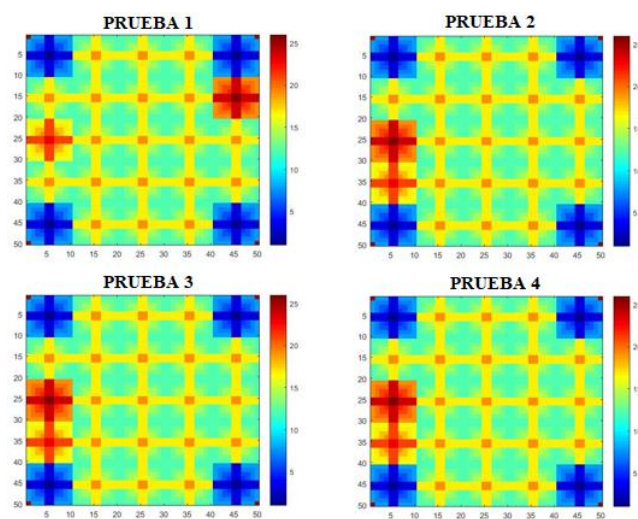


Figura 125.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 9, placa de 4 sensores

- Daño I ubicación 10

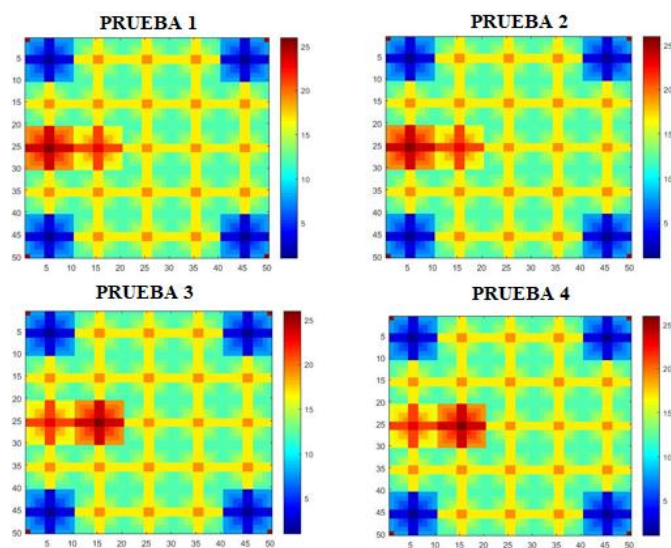


Figura 126.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 10, placa de 4 sensores

- Daño J ubicación 11

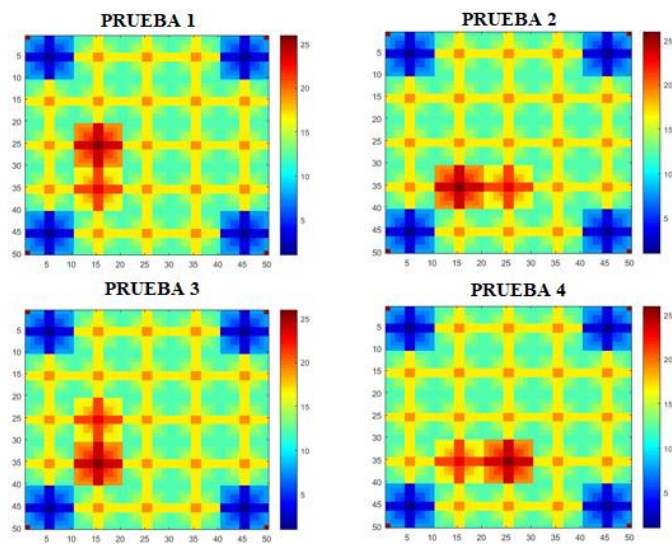


Figura 127.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 11, placa de 4 sensores

- Daño K ubicación 12

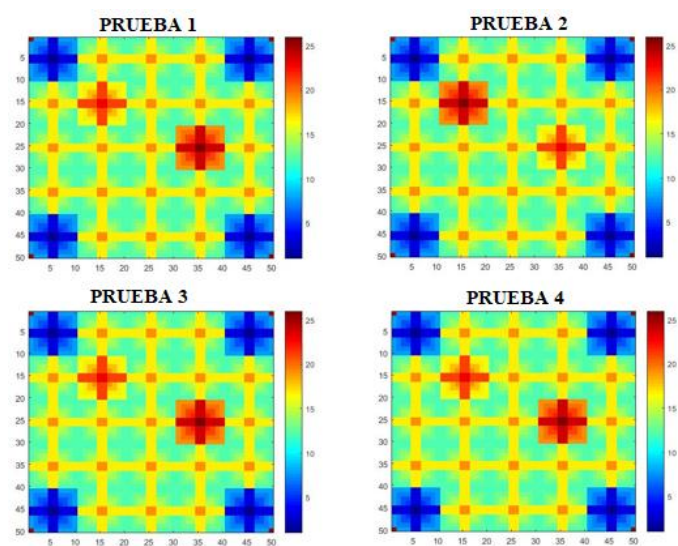


Figura 128.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 12 , placa de 4 sensores

- Daño L ubicación 13

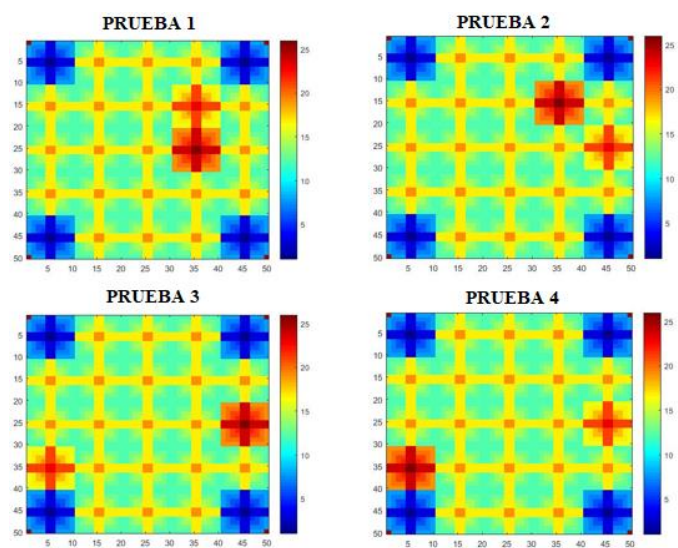


Figura 129.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 13, placa de 4 sensores

- Daño M ubicación 14

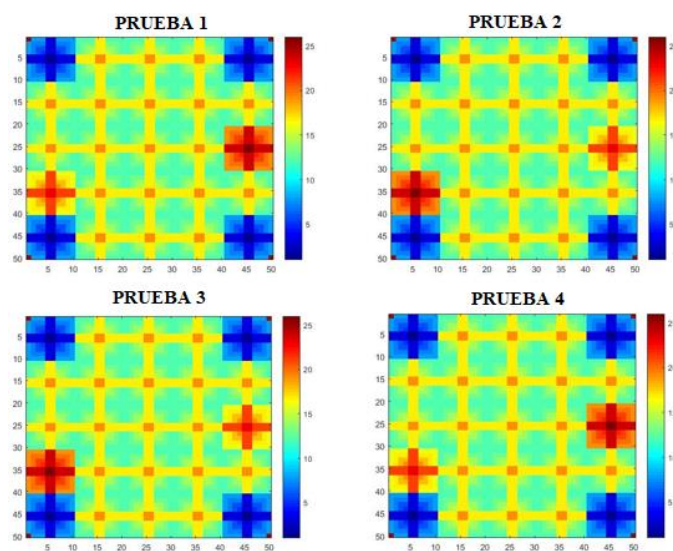


Figura 130.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 14, placa de 4 sensores

- Daño N ubicación 15

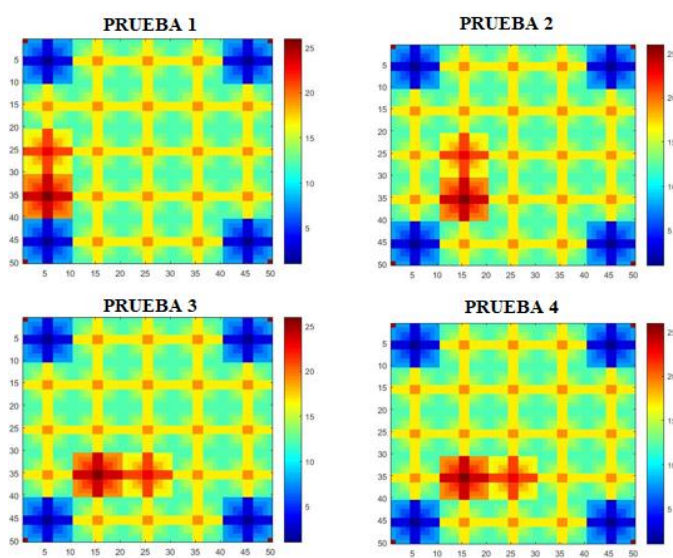


Figura 131.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 15, placa de 4 sensores

- Daño O ubicación 16

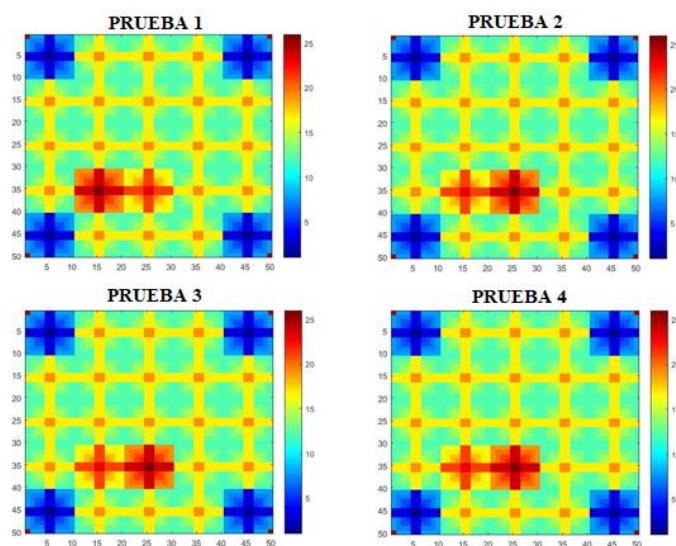


Figura 132.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 16, placa de 4 sensores

- Daño P ubicación 17

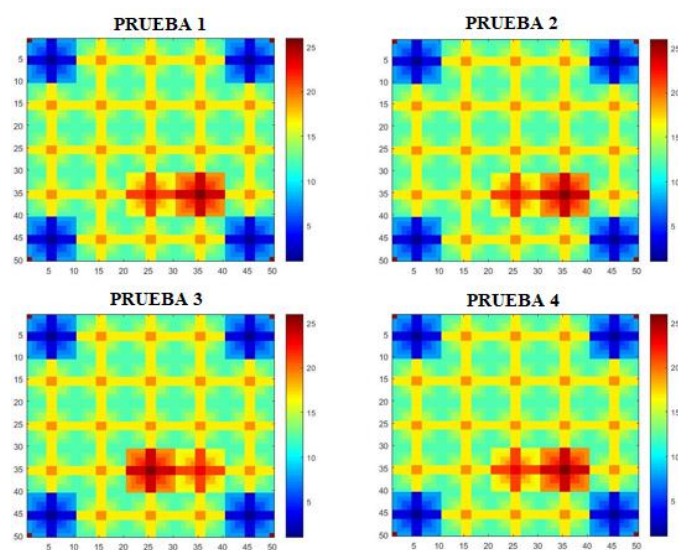


Figura 133.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 17, placa de 4 sensores

- Daño Q ubicación 18

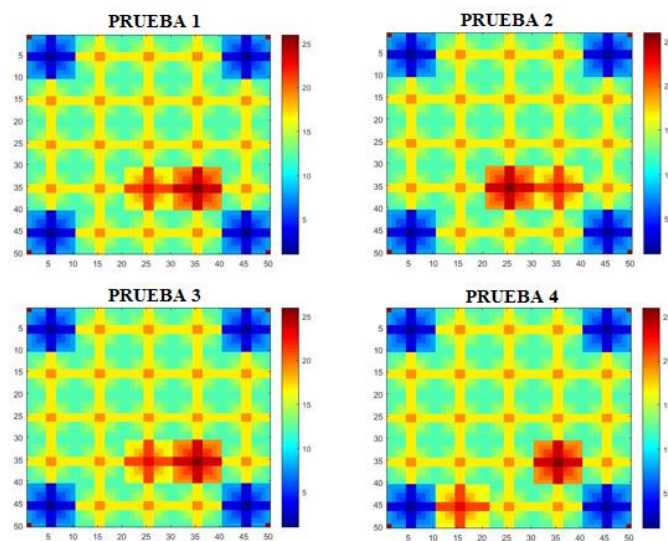


Figura 134.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 18, placa de 4 sensores

- Daño R ubicación 19

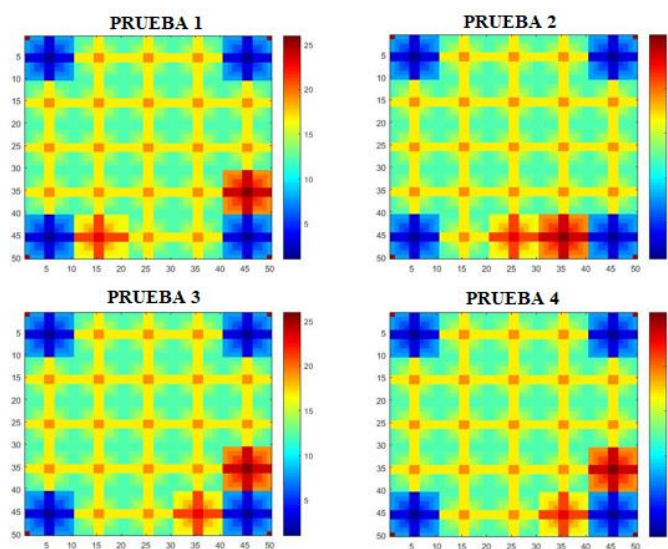


Figura 135.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 19, placa de 4 sensores

- Daño S ubicación 20

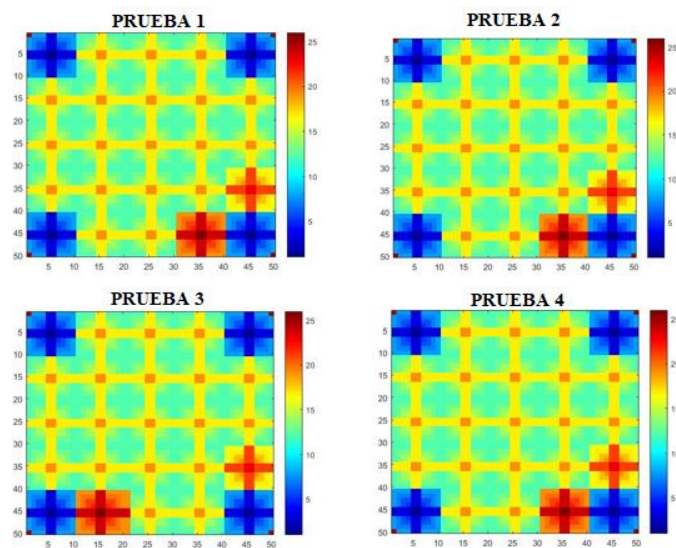


Figura 136.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 20, placa de 4 sensores

- Daño T ubicación 21

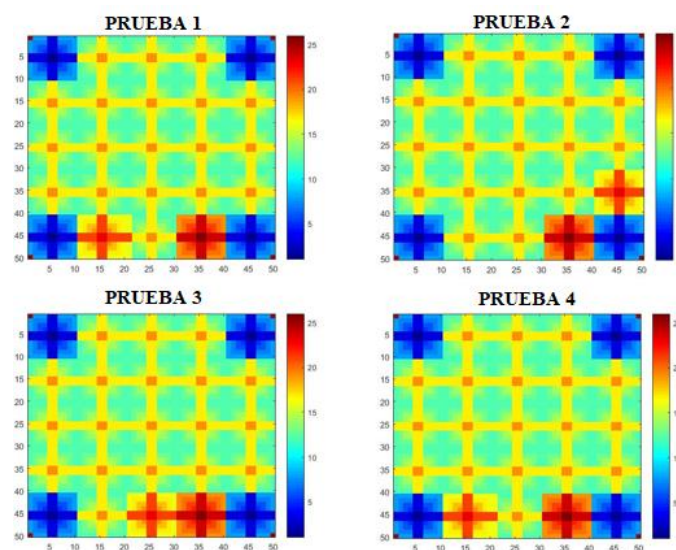


Figura 137.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 21, placa de 4 sensores

- Daño U ubicación 22

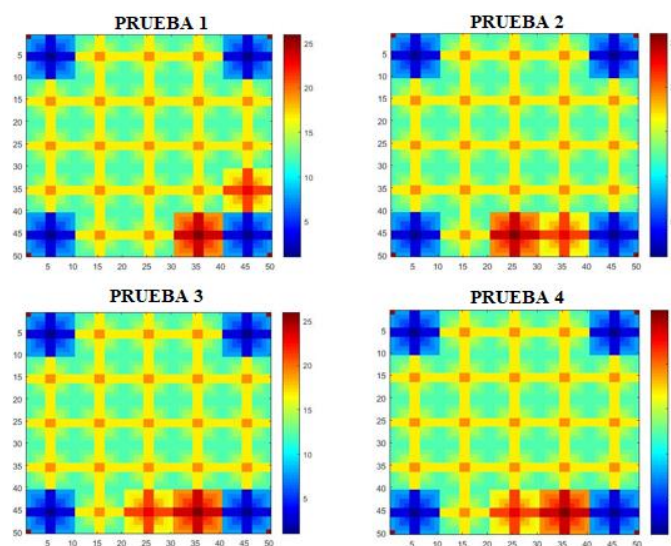


Figura 138.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 22, placa de 4 sensores

7.5 Resultados 6 sensores sin Filtro Golay

- Patrón ubicación 1

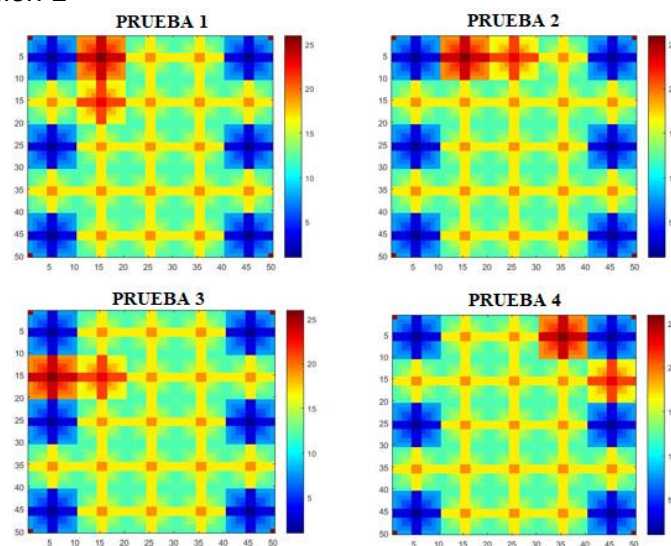


Figura 139.(MT) para predicción daño en la ubicación 1, placa de 6 sensores

- Daño A ubicación 2

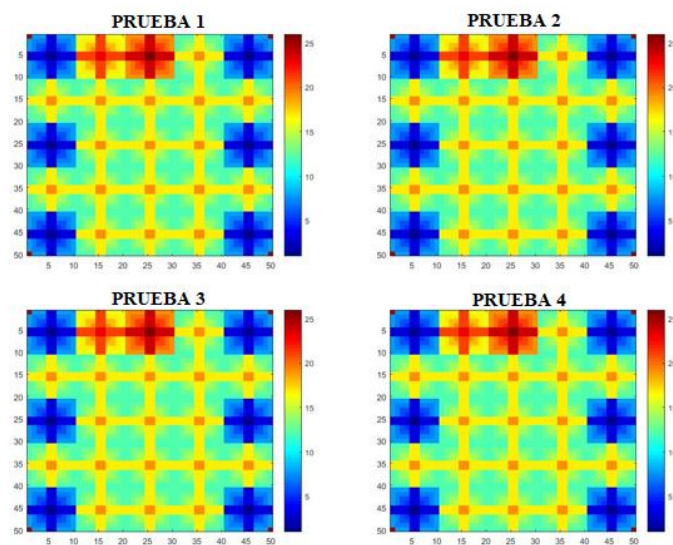


Figura 140.(MT) para predicción daño en la ubicación 2, placa de 6 sensores

- Daño B ubicación 3

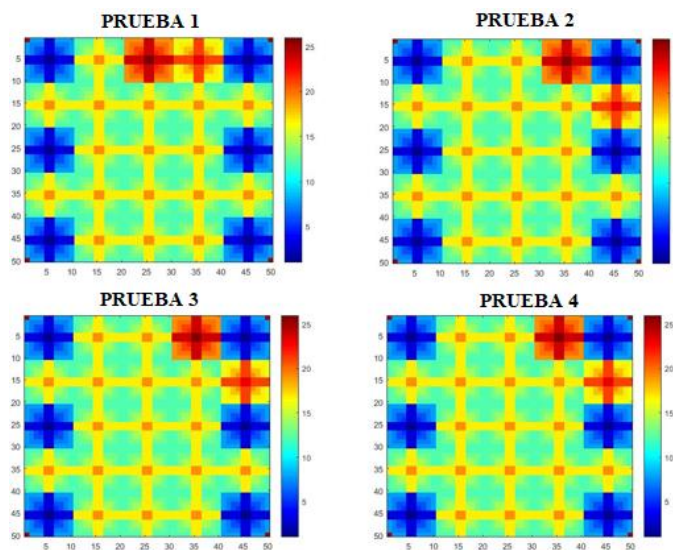


Figura 141.(MT) para predicción daño en la ubicación 3, placa de 6 sensores

- Daño C ubicación 4

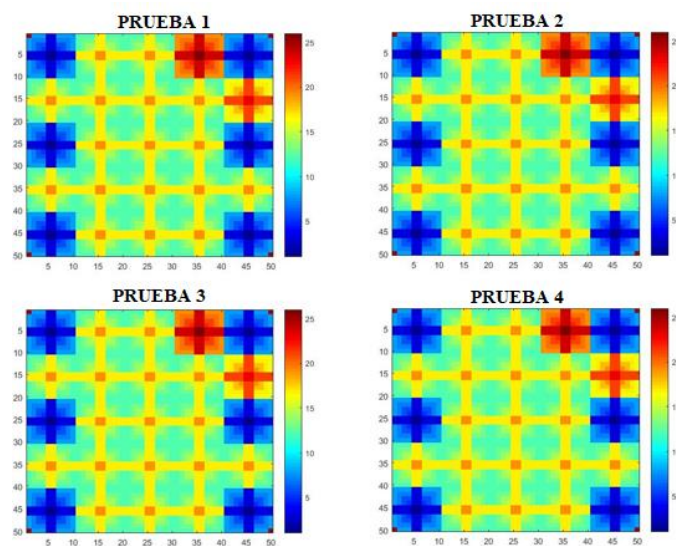


Figura 142.(MT) para predicción daño en la ubicación 4, placa de 6 sensores

- Daño D ubicación 5

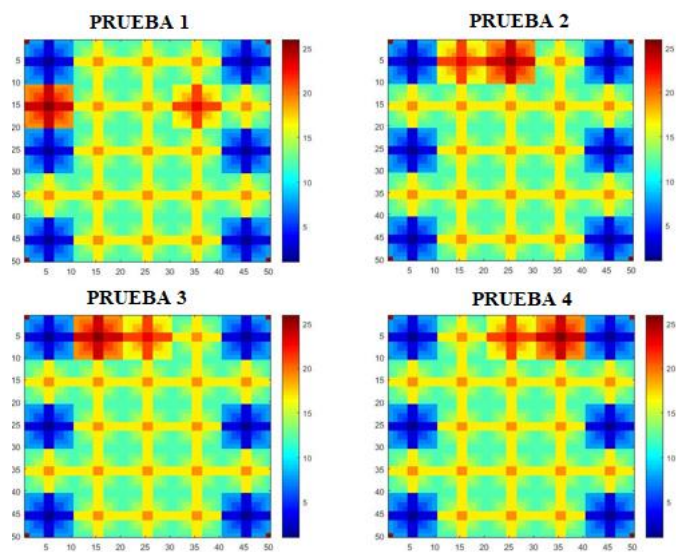


Figura 143.(MT) para predicción daño en la ubicación 5, placa de 6 sensores

- Daño E ubicación 6

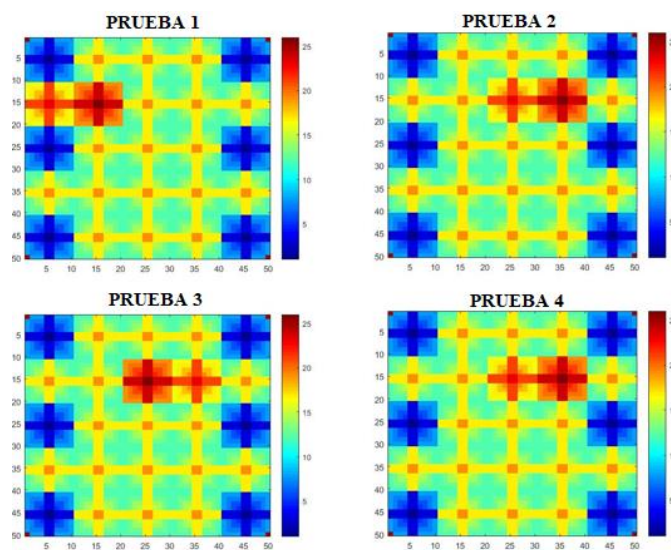


Figura 144.(MT) para predicción daño en la ubicación 6, placa de 6 sensores

- Daño F ubicación 7

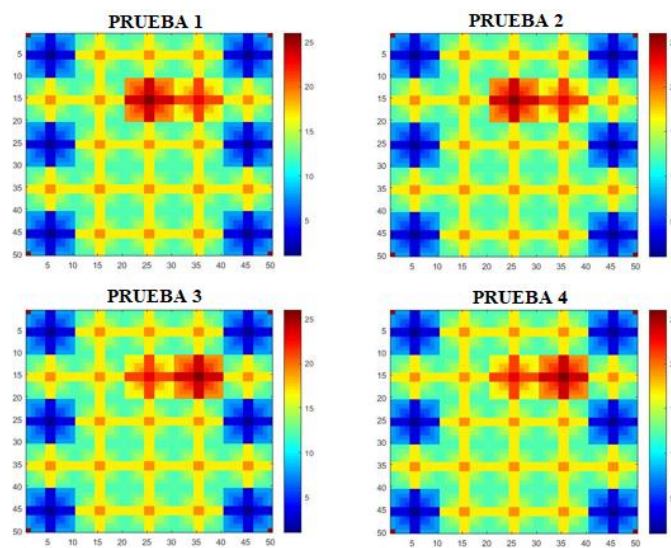


Figura 145.(MT) para predicción daño en la ubicación 7, placa de 6 sensores

- Daño G ubicación 8

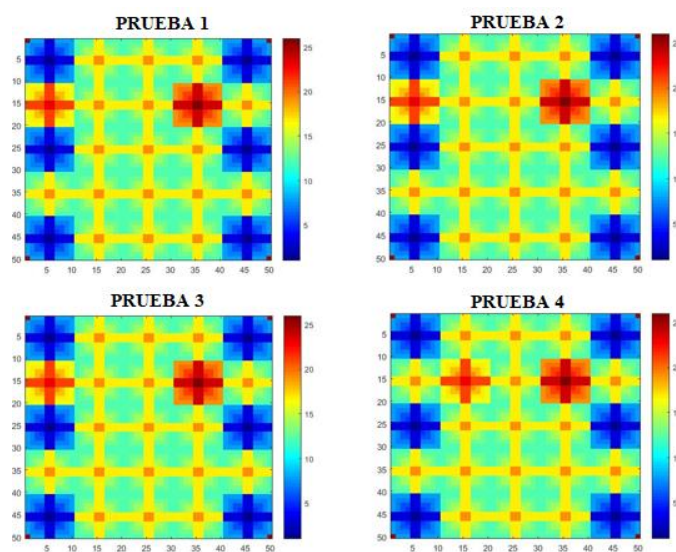


Figura 146.(MT) para predicción daño en la ubicación 8, placa de 6 sensores

- Daño H ubicación 9

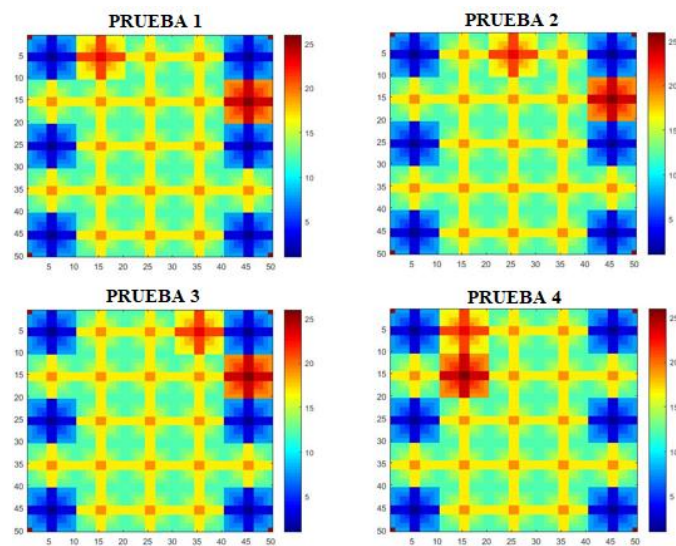


Figura 147.(MT) para predicción daño en la ubicación 9, placa de 6 sensores

- Daño J ubicación 10

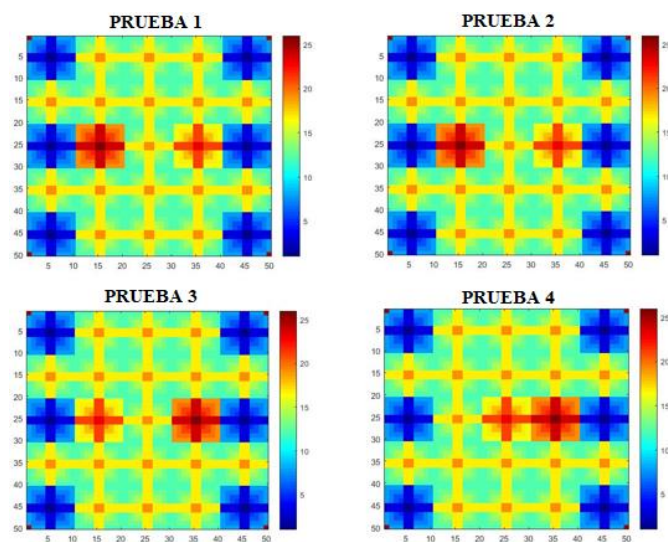


Figura 148.(MT) para predicción daño en la ubicación 10, placa de 6 sensores

- Daño K ubicación 11

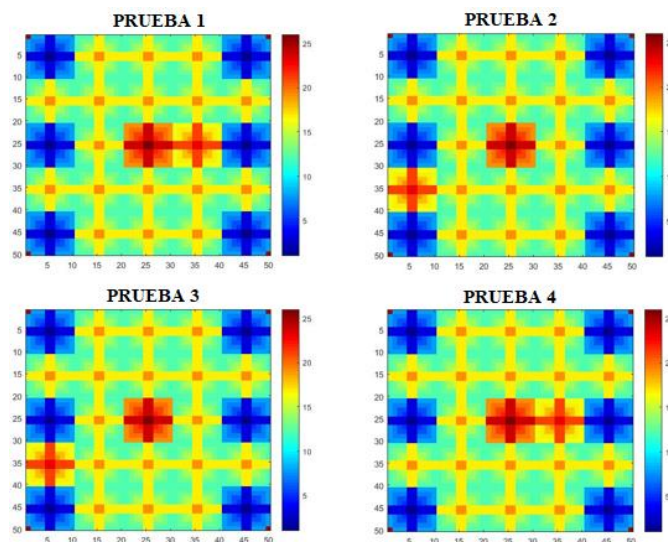


Figura 149.(MT) para predicción daño en la ubicación 11 , placa de 6 sensores

- Daño L ubicación 12

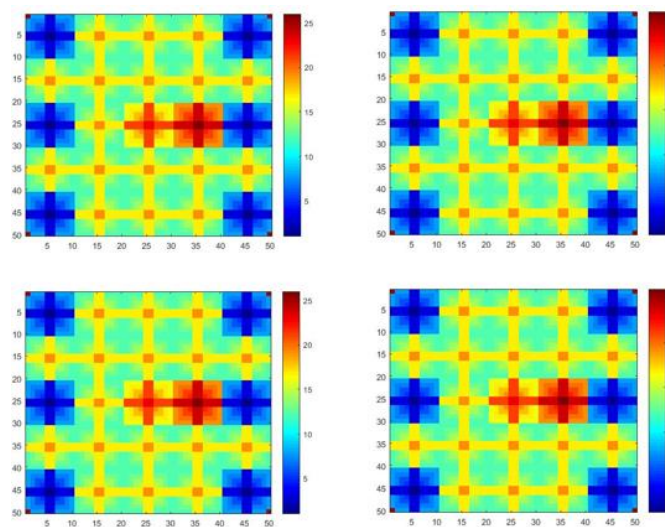


Figura 150.(MT) para predicción daño en la ubicación 12, placa de 6 sensores

- Daño N ubicación 13

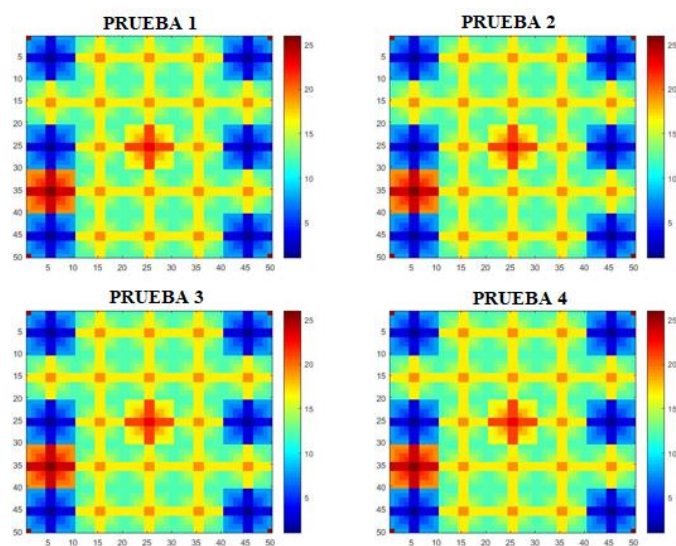


Figura 151.(MT) para predicción daño en la ubicación 13, placa de 6 sensores

- Daño O ubicación 14

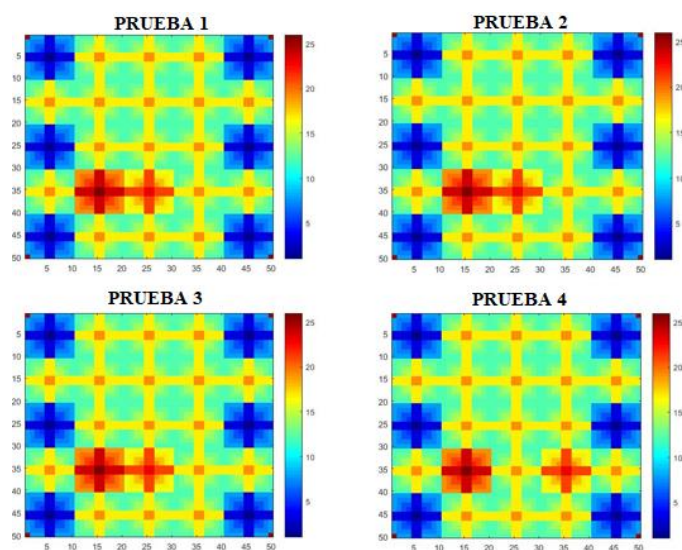


Figura 152.(MT) para predicción daño en la ubicación 14, placa de 6 sensores

- Daño P ubicación 15

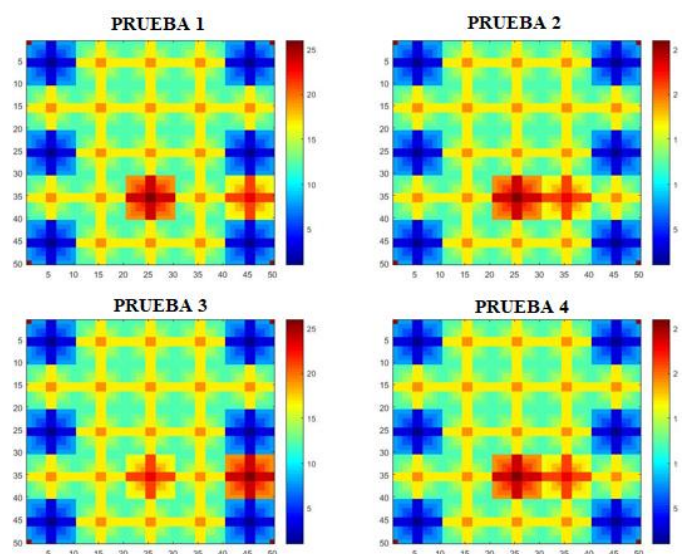


Figura 153.(MT) para predicción daño en la ubicación 15, placa de 6 sensores

- Daño Q ubicación 16

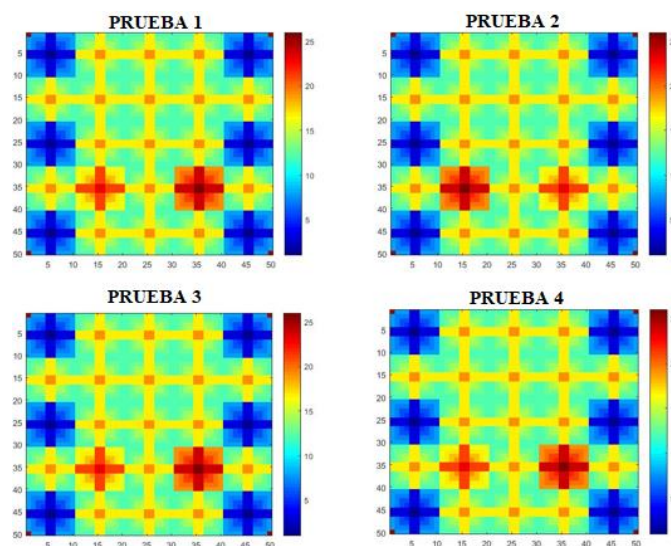


Figura 154.(MT) para predicción daño en la ubicación 16, placa de 6 sensores

- Daño R ubicación 17

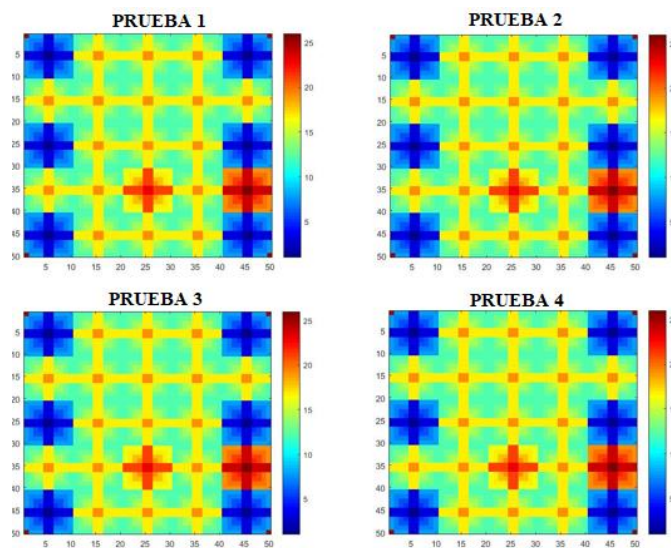


Figura 155.(MT) para predicción daño en la ubicación 17, placa de 6 sensores

- Daño S ubicación 18

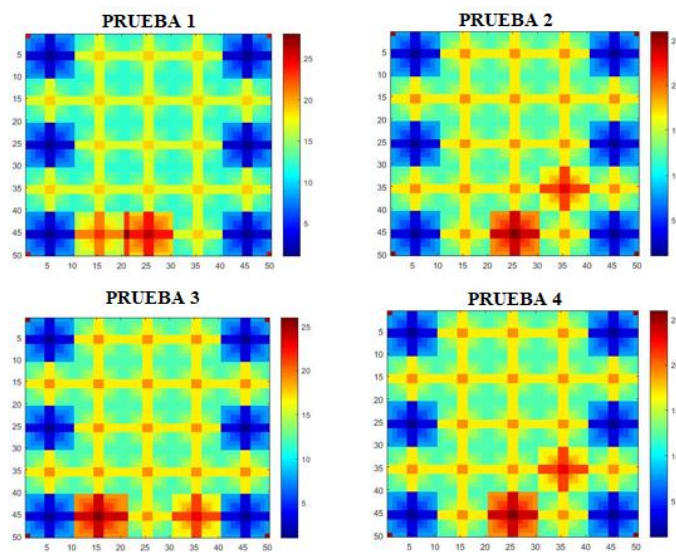


Figura 156.(MT) para predicción daño en la ubicación 18, placa de 6 sensores

- Daño T ubicación 19

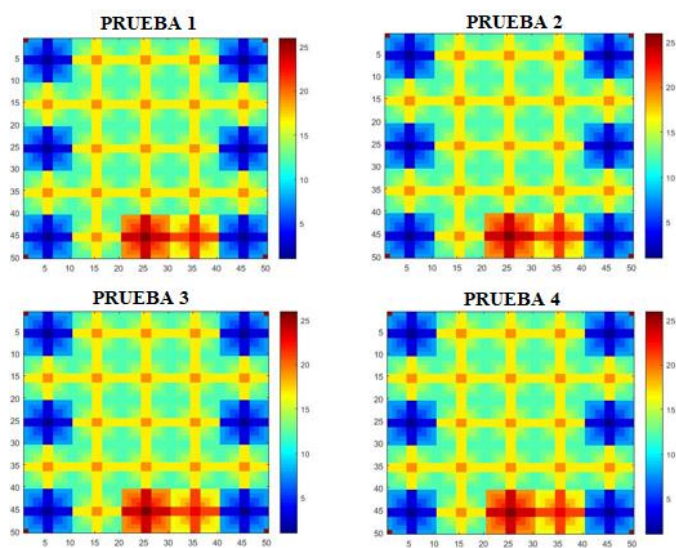


Figura 157.(MT) para predicción daño en la ubicación 19, placa de 6 sensores

- Daño U ubicación 20

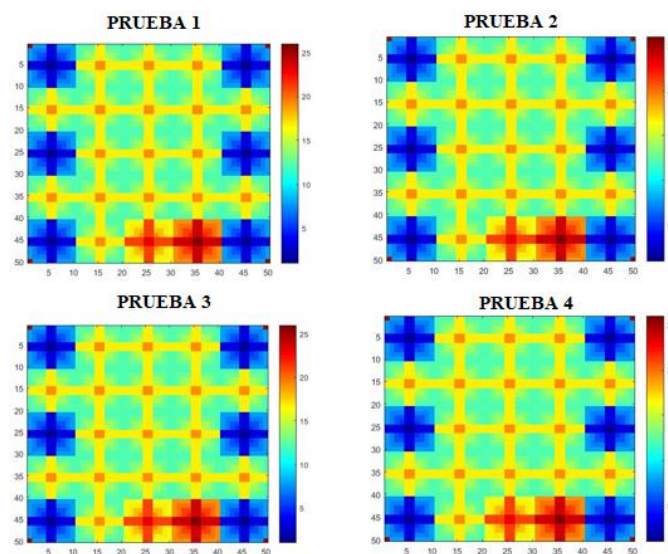


Figura 158.(MT) para predicción daño en la ubicación 20, placa de 6 sensores

7.6 Resultados 6 sensores con Filtro Golay

- Patrón ubicación 1

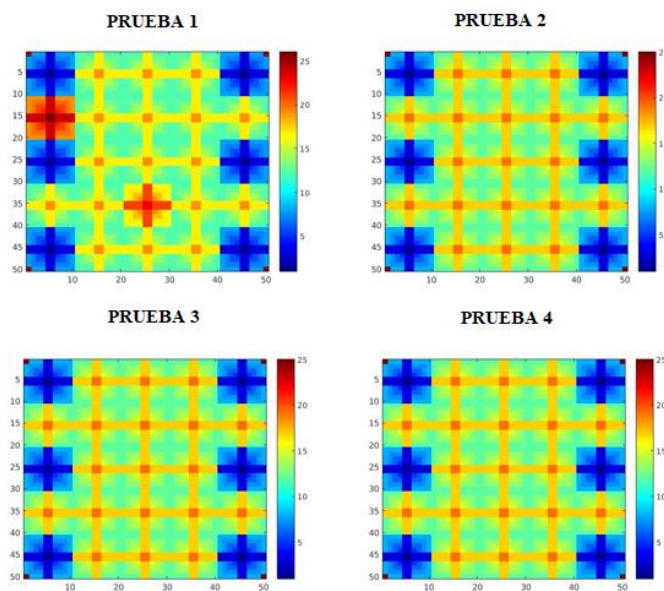


Figura 159.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 1, placa de 6 sensores

- Daño A ubicación 2

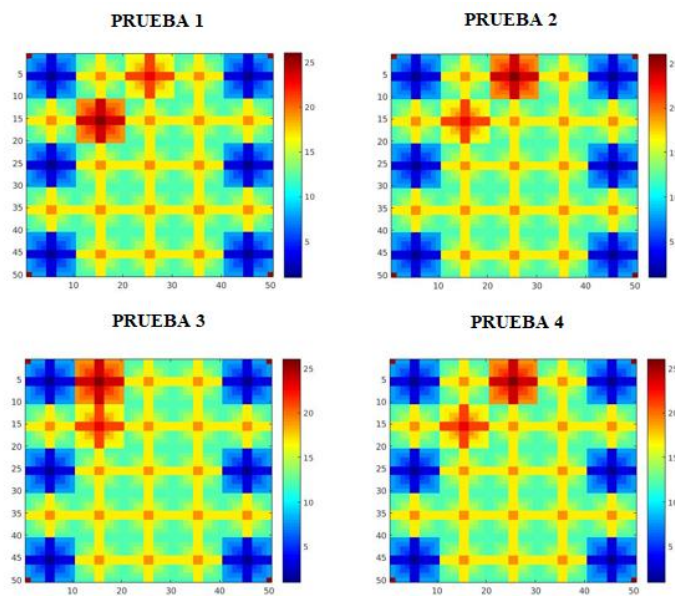


Figura 160.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 2, placa de 6 sensores

- Daño B ubicación 3

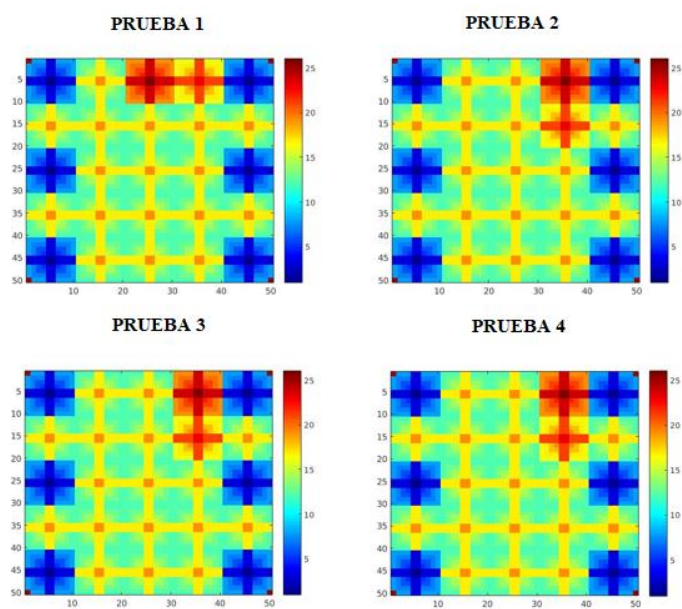


Figura 161.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 3, placa de 6 sensores

- Daño C ubicación 4

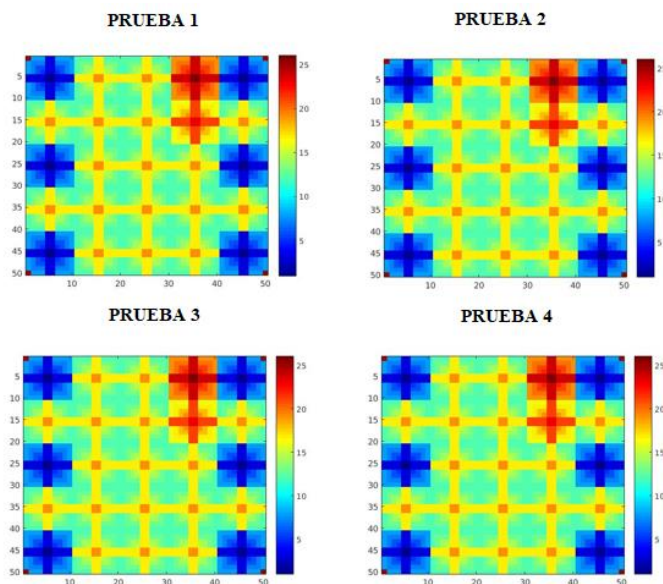


Figura 162.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 4, placa de 6 sensores

- Daño D ubicación 5

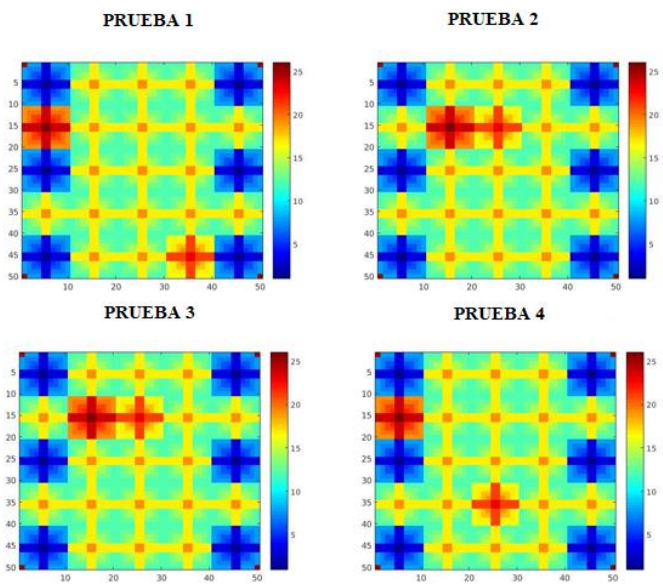


Figura 163.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 5, placa de 6 sensores

- Daño E ubicación 6

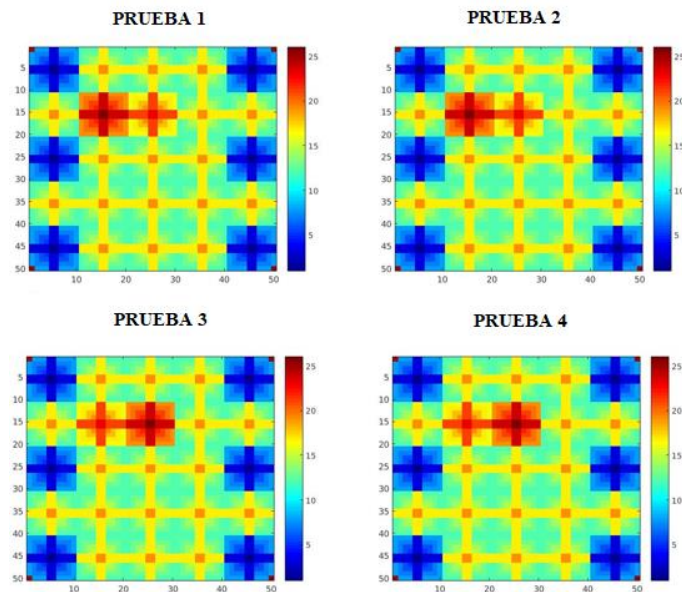


Figura 164.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 6, placa de 6 sensores

- Daño F ubicación 7

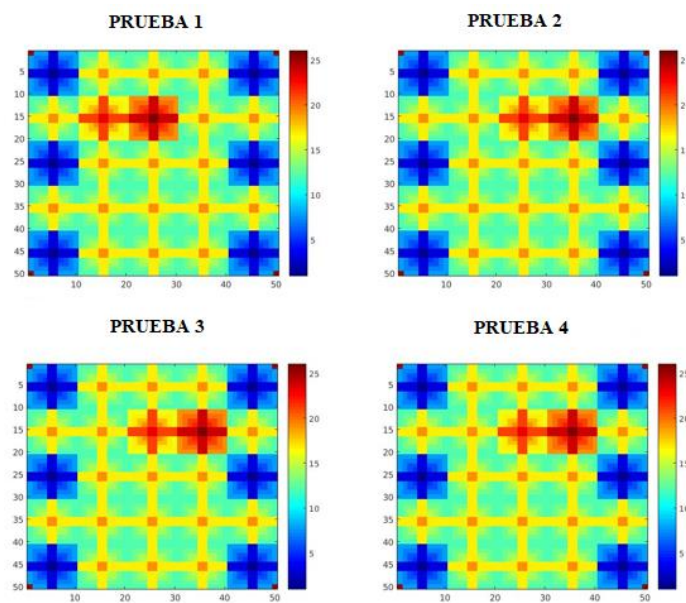


Figura 165.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 7, placa de 6 sensores

- Daño G ubicación 8

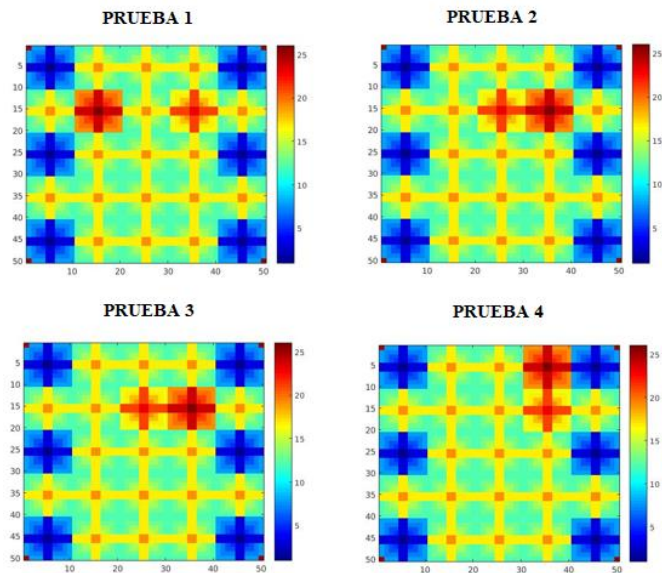


Figura 166.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 8, placa de 6 sensores

- Daño H ubicación 9

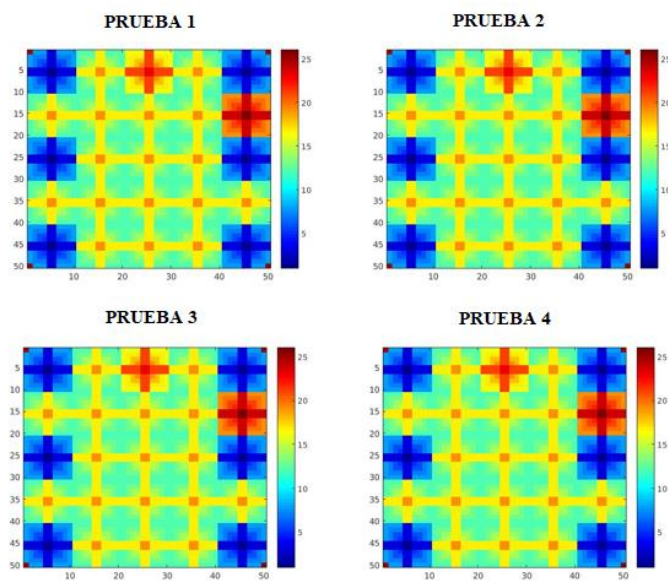


Figura 167.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 9, placa de 6 sensores

- Daño J ubicación 10

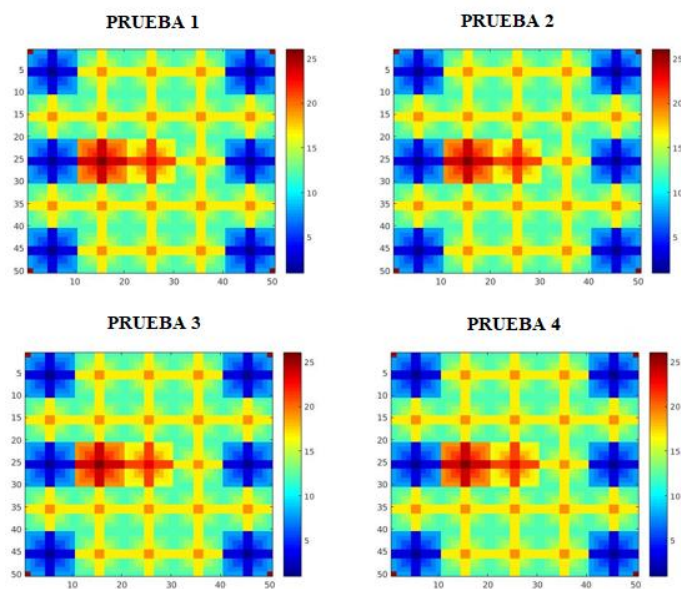


Figura 168.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 10, placa de 6 sensores

- Daño K ubicación 11

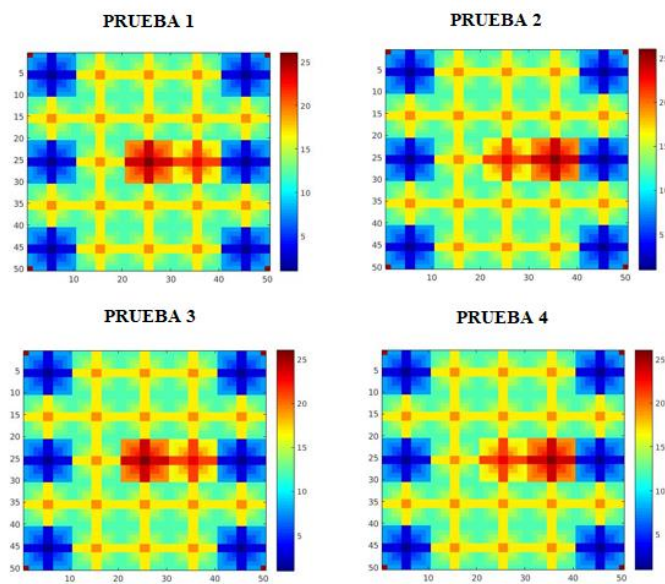


Figura 169.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 11, placa de 6 sensores

- Daño L ubicación 12

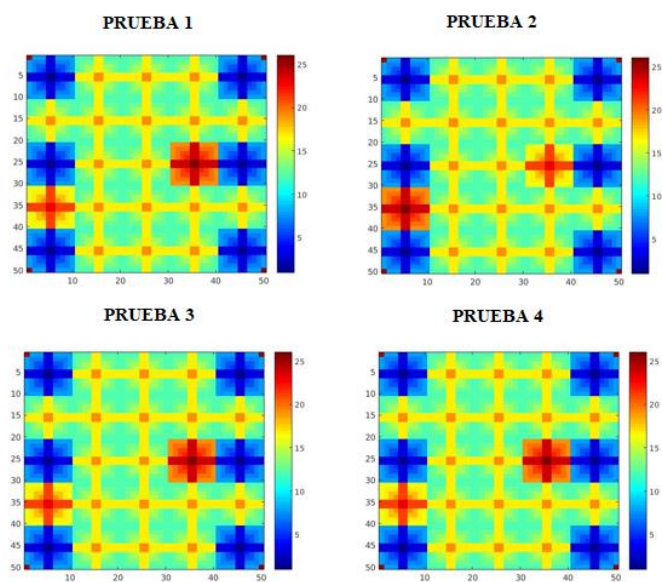


Figura 170.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 12, placa de 6 sensores

- Daño N ubicación 13

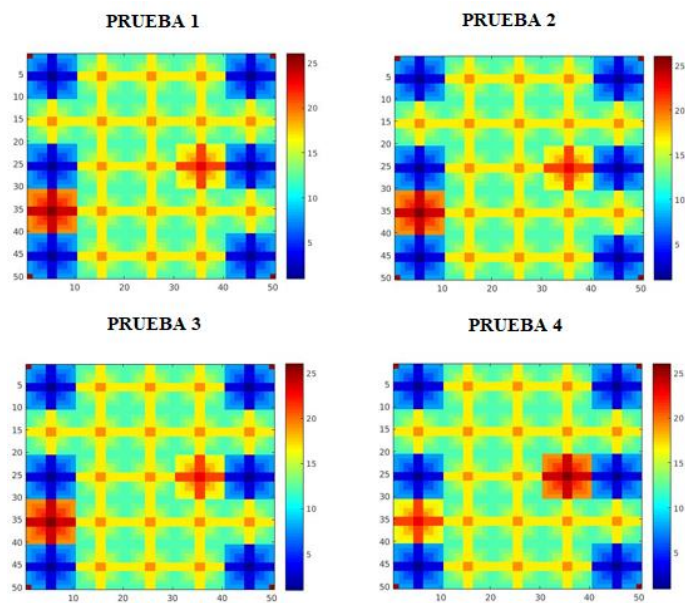


Figura 171.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 13, placa de 6 sensores

- Daño O ubicación 14

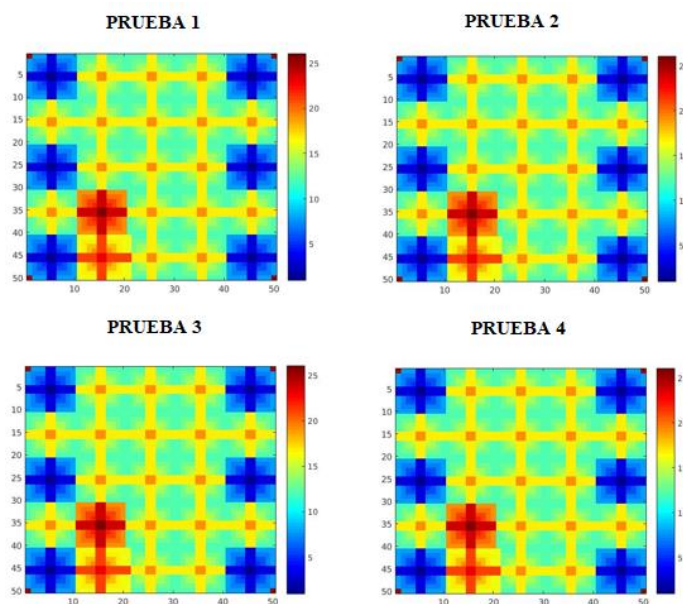


Figura 172.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 14, placa de 6 sensores

- Daño P ubicación 15

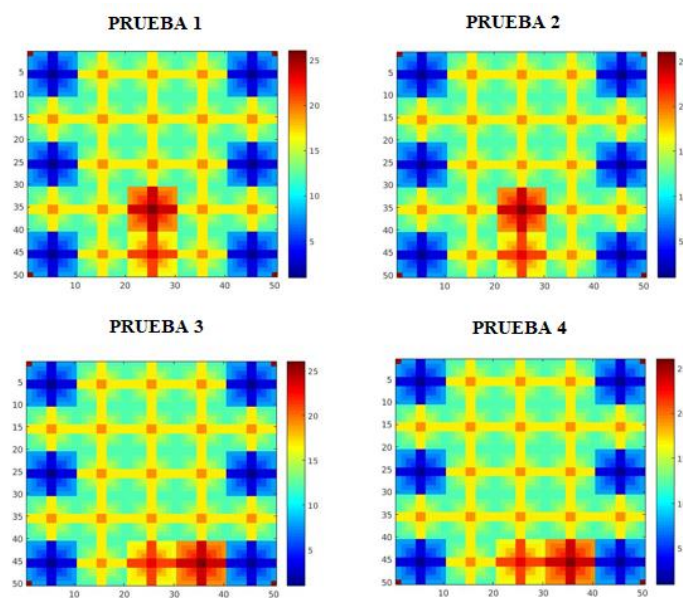


Figura 173.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 15, placa de 6 sensores

- Daño Q ubicación 16

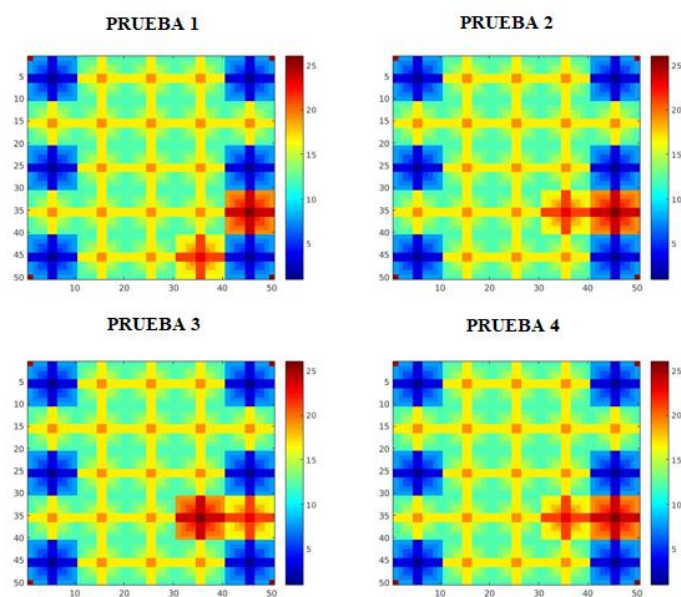


Figura 174.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 16, placa de 6 sensores

- Daño R ubicación 17

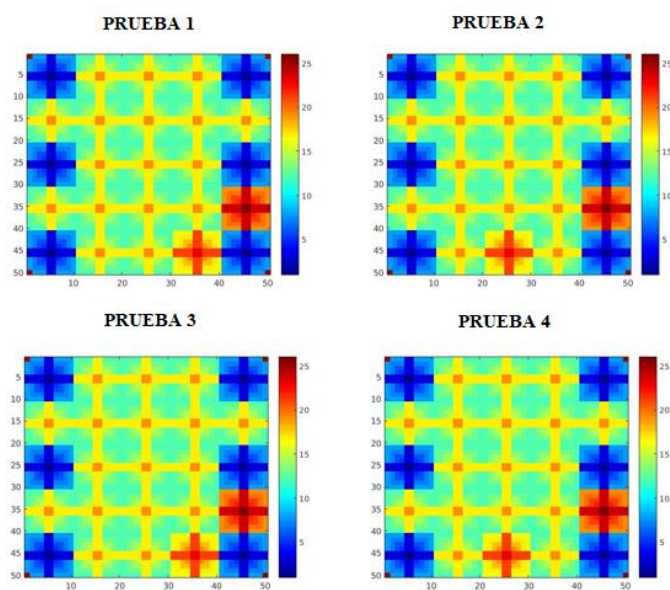


Figura 175.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 17, placa de 6 sensores

- Daño S ubicación 18

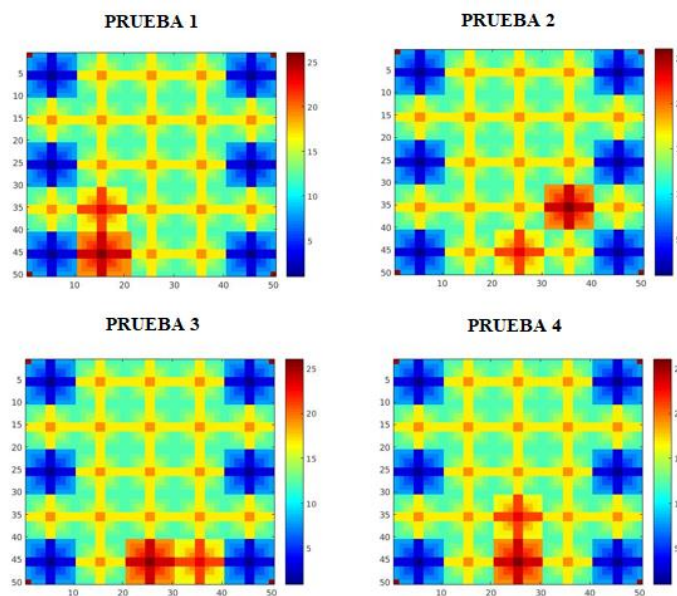


Figura 176.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 18, placa de 6 sensores

- Daño T ubicación 19

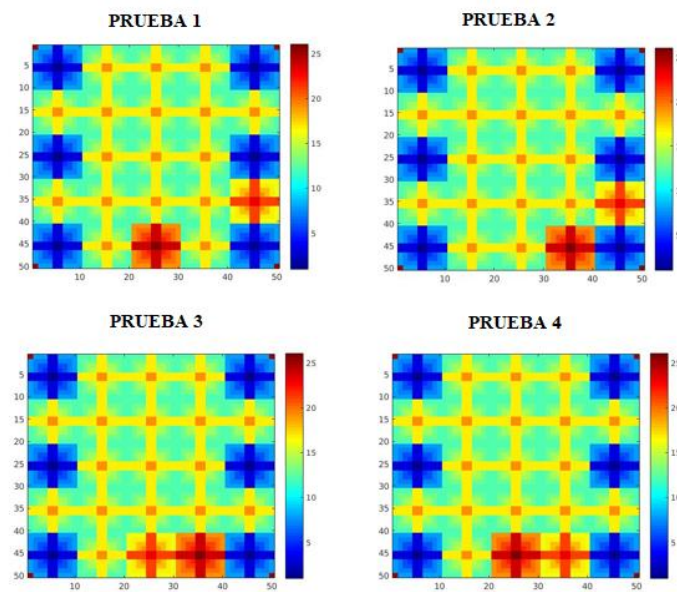


Figura 177.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 19, placa de 6 sensores

- Daño U ubicación 20

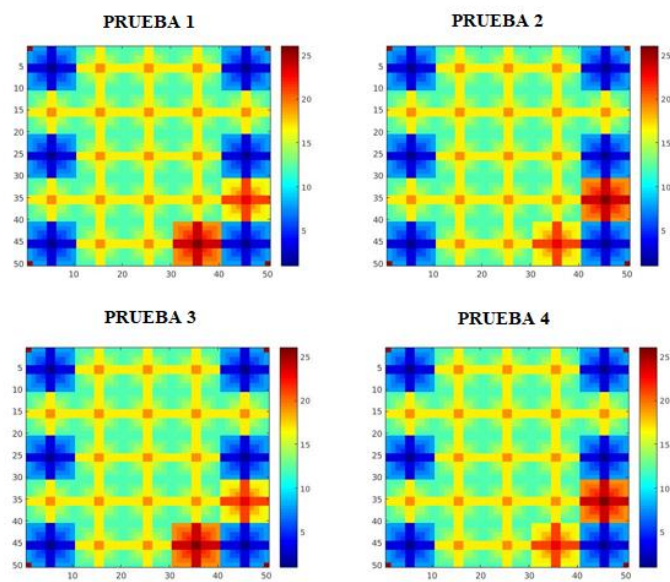


Figura 178.(MT) para predicción con filtro Golay, daño en la ubicación 20, placa de 6 sensores

8. Referencias

- [1] Aptean (2012). *Una nueva aproximación a viejos Problemas en la Industria de Proceso. Las seis grandes pérdidas*, Artículo. [Online] Available at:
http://www.aptean.com/es/assets/pdfs/resources/documents/APT%20Factory_WhitePaper%20%20Las%206%20grandes%20perdidas%20Parte%201_ES.pdf
- [2] Ramírez, D., Gomez, I. D., & Quiroga Mendez, J. (2010). *Detección de danos en estructuras utilizando la técnica de optimización PSO*. *Ingeniería y Desarrollo*, (28), 89-101. Retrieved from
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85217321007>
- [3] Vargas Palomino, L., Steffen, V., Jr, & Finzi Neto, R. M. (2011). *Monitoreo de salud estructural de aeronaves basado en mediciones de impedancia electromecánica*. *Revista Avances Investigación en Ingeniería*, 8(2), 18.
- [4] Artés Gómez, M. (2002). *DEPARTAMENTO DE MECÁNICA I*. Retrieved from
http://teleuned.uned.es/realaudiocemav/2002_2003/2002_11/20021109_10b.rm
- [5] Han, Y., Misra, A. K., & Mateescu, D. (2005). *A method for crack detection in structures using piezoelectric sensors and actuators*. Paper presented at the 353-354.
 doi:10.1109/ICMENS.2005.1
- [6] Ospina Dávila, Y. M. (2009). *Monitoreo de salud estructural empleando filtros kalman*. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/2090/>
- [7] Yu, L., Zhu, J, & Liu-jie Cheri. (2010). *Parametric study on PCA-based algorithm for structural health monitoring*. Paper presented at the 1-6. doi:10.1109/PHM.2010.5413428
- [8] Alessan Perelli, Sevan Harput, Luca De Marchi. (2013). *Frequency*
WCaorpmipnrgessSievnesing forStructMuornailtoroifnAgircrWaifntg
- [9] Jacobs, L. J. (2016). *Nonlinear ultrasonics for material state awareness*. Paper presented at the 1-3. doi:10.1109/ULTSYM.2016.7728709
- [10] Cita tomada de:
<http://facultadingenieriaelectronica.usta.edu.co/index.php/ingenieriaelectronica/docentes-directivos-pregrado#jaime-vitola-oyaga>

[11] Cita tomada de:

<http://facultadingenieriaelectronica.usta.edu.co/index.php/ingenieriaelectronica/docentes-directivos-pregrado#javier-enrique-gonzález-barajas>

[12] Ambher Monitoring Systems. (2017). *Monitoreo de la Salud Estructural*. [online] Available at: <http://www.ambher.com/monitoreo-de-la-salud-estructural/> [Accessed 27 Mar. 2017].

[13] Anon, (2017). [online] Available at: <http://www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf> [Accessed 27 Mar. 2017].

[14] Redyseguridad.fi-p.unam.mx. (2017). *Reconocimiento de patrones*. [online] Available at: <http://redyseguridad.fi-p.unam.mx/proyectos/biometria/basesteoricas/reconocimiento.html> [Accessed 27 Mar. 2017].

[15] A. Luna Aviles1, ' L. H. Hernandez' Gomez1, ' G. Urriolagoitia Calderon1, ' G. Urriolagoitia Sosa1, J. A. Beltran' Fernandez, ' Analisis' de las ondas de Lamb generadas por impacto en placas compuestas

[16] Bermúdez Mejía, C. A. (2005). *Curso básico de estructuras metálicas Universidad Nacional de Colombia*. Retrieved from: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5923/>

[17] Coursera. (2017). *Acondicionamiento y filtrado de señales*. [online] Available at: <https://es.coursera.org/learn/electrones-en-accion/lecture/a42CD/acondicionamiento-desenales-amplificacion-y-filtrado> [Accessed 27 Mar. 2017].

[18] Bourke Paul. (1996). *Cross Correlation*. Retrieved from: <http://paulbourke.net/miscellaneous/correlate/>

[19] Kelmansky M. Diana. (2010). *Aspectos Estadísticos de microarrays*. Available at: http://www.dm.uba.ar/materias/optativas/aspectos_estadisticos_de_microarreglos/2010/1/teoricas/Clase8.pdf