



**SISTEMA EXPERTO PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DE
DEFORMACIÓN EN TUBERÍAS DE GAS: DISEÑO Y
VALIDACIÓN NUMÉRICA.**

Ing. WILMER ALEXIS SANDOVAL CÁCERES



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE INVESTIGACIÓN CEMOS
BUCARAMANGA
2010**



SISTEMA EXPERTO PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DEFORMACIÓN EN TUBERÍAS DE GAS: DISEÑO Y VALIDACIÓN NUMÉRICA.

Ing. WILMER ALEXIS SANDOVAL CÁCERES

Trabajo de Investigación presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería Electrónica.

Director

**RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA, PhD.
Profesor Titular**

Co_directores

**OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO, PhD.
Profesor Titular**

**LUIS EDUARDO MUJÍCA DELGADO, PhD.
Profesor Titular UPC**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE INVESTIGACIÓN CEMOS
BUCARAMANGA
2010**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por premiarme con un círculo familiar y de amistades, lleno de sencillez, lealtad y sabiduría. Quienes me han enseñado que el primer paso para lograr algo en la vida es soñar.

A mi señora madre Tilcia Cáceres de Sandoval por sus sacrificios y la dedicación a sus hijos. Por enseñarme a perseverar en mis metas sin importar que tan grande sea la adversidad, por inculcarme el verdadero sentido del valor de la amistad, por apoyarme en mis triunfos y en mis derrotas.

A mi hermana PhD. Ivonne Twiggy Sandoval Cáceres, por enseñarme que los grandes sacrificios siempre dan frutos. Que lo más importante en la vida no es acumular conocimientos para alimentar el ego, sino ser mejor persona y aumentar el grado de sencillez y humildad día a día.

A mis amigos y compañeros Alfredo Acevedo Picón, Álvaro Alyamani Triana, Daniel Ricardo Ojeda, Diana Marcela González, Herly Jhoana Lizcano, Hernando Gonzales Acevedo, Jabid Eduardo Quiroga, Javier Mauricio Reyes, Jhon Jairo Gil, Jhon Alexander Quiroga, Jorge Guillermo Díaz, José Jesús Gómez, León David Valderrama, Miguel Ángel Silva, Omar Leonardo Peña, Oscar Leonardo Cadena, Pablo Emilio Acevedo, Wilson Arley Barajas, Yizeth Angélica Acuña y Victoriano Vargas Montaña, por sus comentarios, apoyo moral y apreciaciones durante todo éste proceso de aprendizaje.

A mi novia María Eugenia Porras, por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante el tiempo de ejecución de ésta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, al grupo de investigación CEMOS, a mi director, PhD. RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA. A mis codirectores PhD. OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO y PhD. LUIS EDUARDO MUJÍCA DELGADO. A los profesores PhD. HERMMAN RAÚL VARGAS, PhD. GABRIÉL ORDOÑEZ PLATA y PhD(c) CESAR DUARTE GUALDRÓN. Por haber compartido sus conocimientos, sus apreciaciones, su dedicación, amistad y apoyo, necesarios para la ejecución de este trabajo de investigación.

El autor.

CONTENIDO

	PÁG.
1. INTRODUCCIÓN	20
1.1 MOTIVACIÓN.....	20
1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA.....	21
1.3 OBJETIVO DE LA TESIS	24
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS	25
2. MARCO CONCEPTUAL	26
2.1 MODELO ESTRUCTURAL	26
2.1.1 Ecuación dinámica	27
2.1.2 Análisis de vibración.	29
2.1.3 Modelado estructural por elementos finitos.	33
2.2 MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL.....	38
2.2.1 Daño estructural	38
2.2.2 Herramientas usadas en la inspección de tuberías.	39
2.2.3 Análisis de vibraciones en estructuras	41
2.2.4 Detección de daño a partir de la variación de las formas modales	42
2.3 RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS (CBR)	45
2.3.1 Redes neuronales tipo SOM (Self-organizing maps)	46
2.3.2 Transformada Wavelet	53
2.3.3 Correlación	56
2.3.4 Principio de operación del sistema de monitorización	57
3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	59
3.1. APLICACIONES.....	59
3.2. METODOLOGÍA DE REFERENCIA.....	63
4. MODELADO DE LA TUBERÍA	67
4.1 MODELO EN ELEMENTOS FINITOS.....	68
4.2 MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS	70
4.2.1 Representación en espacio de estados del modelo	71
4.2.2 Simulación de señales a partir de la representación en espacio de estados	73
4.3 VALIDACIÓN DEL CÓDIGO EMPLEADO PARA LA GENERACIÓN DE LAS MATRICES M Y K DEL MODELO.....	75
5. SISTEMA EXPERTO PARA LA EVALUACIÓN DE CAMBIOS DE RIGIDEZ	83
5.1. GENERACIÓN DE CASOS.....	85

5.1.1 Variación porcentual de la rigidez	85
5.1.2 Simulación de casos a partir del espacio de estados	86
5.1.3 Simulación de aceleraciones a partir de la representación en espacio de estados	86
5.2 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES	88
5.2.1 Correlación	89
5.2.2 Caracterización	93
5.2.3 Reducción de dimensionalidad	94
5.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EXPERTO CBR	96
5.3.1 Organización de la información	98
5.3.2 Entrenamiento del sistema.	99
5.3.3 Validación del sistema.	102
6. VALIDACIÓN NUMÉRICA	109
6.1 GENERACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN PARA LOS CASOS	109
6.2 SIMULACIÓN DE ACELERACIONES PROPAGADAS EN LA ESTRUCTURA	111
6.3 SELECCIÓN DE CASOS PARA ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN DEL SE	116
6.4 ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO.	118
6.5 PROCESAMIENTO DE SEÑALES.	1209
6.6 MODELOS DE GENERALIZACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO	122
6.7 ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL MODELO DE GENERALIZACIÓN.	122
6.8 LA BASE DE CASOS.	1233
6.9 VALIDACIÓN.	1254
6.10 INFERENCIA DEL SISTEMA EXPERTO	125
6.11 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO (GUI).	126
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	127
8. CONCLUSIONES, APORTES Y TRABAJOS FUTUROS	139
8.1 CONCLUSIONES	139
8.2 APORTES	143
8.3 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	144
BIBLIOGRAFÍA	145

ANEXO

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del sistema masa-resorte-amortiguador para múltiples grados de libertad.	29
Figura 2. Discretización de la estructura a analizar utilizando FEM.....	34
Figura 3. Grados de libertad asociados al elemento finito.	34
Figura 4. Estructura simulada en configuración apoyo simple.....	36
Figura 5. Daños estructurales comúnmente presentados en tuberías.....	39
Figura 6. Simulación en del tercer modo de vibración para viga en configuración simplemente apoyada mediante Ansys.	41
Figura 7. Metodología basada en Mapas Auto-organizables y CBR.....	45
Figura 8. Diagrama de Varonoi.....	48
Figura 9. Función de aprendizaje supervisado.	50
Figura 10. Optimización del error en el modo de entrenamiento supervisado.	51
Figura 11. Parámetros de dilatación y retardo en el tiempo de la TW.	54
Figura 12. Plano escala-tiempo.	54
Figura 13. Descomposición wavelet discreta.....	56
Figura 14. Esquema del principio de funcionamiento para un prototipo experimental.	58
Figura 15. Feeler pig.....	60
Figura 16. Detección de cambios de masa a partir de CBR.	64
Figura 17. Descripción metodológica de la etapa de modelado.	67
Figura 18. Diagrama en bloques para la representación de un sistema en el espacio de estados.....	71

Figura 19. Diagrama para la generación de señales basado en el espacio de estados.	74
Figura 20. Señal de excitación.....	75
Figura 21. Variación de frecuencias modales de acuerdo con la ubicación de daños para una estructura tipo viga.....	77
Figura 22. Variación de frecuencias modales de acuerdo con porcentaje de daños para una estructura tipo viga.....	77
Figura 23. Porcentaje de error existente entre frecuencias modales (ANSYS Vs FORTRAN).	78
Figura 24. Proceso de validación del modelo en elementos finitos implementado.	79
Figura 25. Proceso de validación para las matrices M y K generadas en FORTRAN.....	80
Figura 26. Detección de anomalías en un elemento, a partir del método de variación de curvatura.....	81
Figura 27. Detección de anomalías en dos elemento consecutivos, a partir del método de variación de curvatura.....	81
Figura 28. Etapas del sistema experto, según su funcionamiento.	83
Figura 29. Diagrama en bloques del SE CBR.....	84
Figura 30. Parámetros considerados para la simulación de escenarios de daño.....	86
Figura 31. Arreglo matricial de la información simulada.	87
Figura 32. Señales de aceleración simuladas para diferentes condiciones de daño.....	88
Figura 33. Etapas del procesamiento de las señales.....	89
Figura 34. Análisis de la correlación entre las señales sensadas.....	90
Figura 35. Correlación entre la señal de excitación sensada y la propagada.	92
Figura 36. Descomposición de señales mediante la DTW.....	93

Figura 37. Aplicación de descriptores a los coeficientes de descomposición de la DTW	94
Figura 38. Señales con alto grado de similitud, utilizadas para la caracterización.....	94
Figura 39. Varianza de las componentes principales.....	95
Figura 40. Varianza con respecto al número de componentes	96
Figura 41. Esquema general del SE.	97
Figura 42. Fases de operación del SE.....	98
Figura 43. Organización de la información.	98
Figura 44. Procesos inmersos en la fase de entrenamiento del SE.....	99
Figura 45. Patrones de entrenamiento similares.....	100
Figura 46. Esquema de entrenamiento del SE.	101
Figura 47. Procesos inmersos en la fase de evaluación del SE.	102
Figura 48. Esquema de evaluación del SE.	104
Figura 49. Selección de redes SOM relevantes en el proceso de inferencia del SE.	105
Figura 50. Selección BMU´s relevantes en el proceso de inferencia del SE.	106
Figura 51. Selección de casos relevantes en el proceso de inferencia del SE.	107
Figura 52. Esquema general de funcionamiento del sistema experto implementado	110
Figura 53. Esquema General del sistema.....	110
Figura 54. Diagrama de flujo simplificado, para la generación de señales de aceleración.....	114
Figura 55. Organización de la información generada.	116

Figura 56. Organización de grupos de entrenamiento y validación, a partir de MATLAB.	117
Figura 57. Entrenamiento y validación.....	119
Figura 58. Procesamiento de las señales que conforman la librería de casos.	120
Figura 59. Organización tipo colmena.	122
Figura 60. Organización de la información, para la generación de la base de casos.	123
Figura 61. Diagnóstico del sistema experto.	124
Figura 62. Interfaz gráfica.	126
Figura 63. Desempeño del sistema experto a partir de variación de los umbrales.	133
Figura A.3. 1. Frecuencias y formas modales características de la estructura seleccionada, en configuración de apoyo simple.....	162
Figura A.3. 2. Frecuencias y formas modales características de la estructura seleccionada, en configuración de apoyo simple.....	165
Figura A.5.1. 1. Zonas del cerebro humano.....	168
Figura A.5.1. 2. Mapa somatosensorial	169
Figura B. 1. Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS.....	174
Figura B. 2. Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS.....	177
Figura B. 3. Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS.....	180
Figura B. 4. Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS.....	183

Figura C. 1. Elementos de la estructura modificados.....	184
Figura F. 1. Selección de sensores de interés.....	216
Figura F. 2. Selección de listas de entrenamiento y validación	217
Figura F. 3. Selección de parámetros del procesamiento.....	218

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Momento de inercia para secciones transversales.	27
Tabla 2. Restricción en las condiciones de frontera según el tipo de apoyo.	32
Tabla 3. Configuraciones para vigas delgadas/ ilustración del valor del peso de las frecuencias naturales (β_{nl}) y forma de los modos de vibración.....	32
Tabla 4. Características de la estructura simulada.	69
Tabla 5. Características de la estructura tipo viga.	76
Tabla 6. Características de la tubería simulada.	82
Tabla 7. Características de los diferentes escenarios de daño considerados, para la generación de M y K.	112
Tabla 8. Características de entrenamiento de las redes SOM implementadas en MATLAB.....	121
Tabla 9. Tamaño de patrones utilizados en el entrenamiento y validación del sistema experto.....	128
Tabla 10. Patrones de entrenamiento obtenidos a partir de WT y WT+PCA.	130
Tabla 11. Medida de similitud entre los diferentes escenarios de daño simulados.....	131
Tabla 12. Efecto de la variación de umbrales en los resultados de evaluación del sistema experto implementado.	132
Tabla 13. Pruebas realizadas para la configuración del sistema experto basado en PCA.....	135
Tabla 14. Pruebas realizadas para la configuración del sistema experto basado en WT.....	137
Tabla 15. Pruebas realizadas para la configuración del sistema experto basado en WT+PCA	138

Tabla A 1. Restricción en las condiciones de frontera según el tipo de apoyo	157
Tabla A 2. Configuraciones adicionales de apoyo para vigas delgadas/ ilustración del valor del peso de las frecuencias naturales (β_{nl}) y forma de los modos de vibración.....	159
Tabla B.1. 1. Características de la estructura tipo viga.....	172
Tabla B.1. 2. Variación de frecuencias modales para diferentes escenarios de daño del modelo tipo viga, simulados en ANSYS.	173
Tabla B.2. 1. Variaciones del porcentaje de daño en E1.	176
Tabla B.3. 1. Parámetros de simulación de la estructura tipo tubería.....	178
Tabla B.3. 2. Variación de frecuencias modales para diferentes escenarios de daño del modelo tipo tubería, simulados en ANSYS.	179
Tabla B.4. 1. Variaciones del porcentaje de daño en E1 de la tubería.	182
Tabla C. 1. Validación de frecuencias modales “ANSYS vs FORTRAN”, para estructura en configuración Libre-Libre.....	185
Tabla C. 2. Validación de frecuencias modales “ANSYS vs FORTRAN”, para estructura en configuración Apoyo simple.	188
Tabla D.1. 1. Valores teóricos para la matriz K (Extendida), para viga simplemente apoyada.....	192
Tabla D.1. 2. Valores experimentales para la matriz K, para viga simplemente apoyada, obtenidos a partir de FORTRAN.	193
Tabla D.1. 3. Contraste entre los valores teóricos y experimentales de los parámetros de la matriz K.....	194
Tabla D.2. 1. Valores teóricos para la matriz M (Extendida), para viga simplemente apoyada.....	195
Tabla D.2. 2. Valores experimentales para la matriz K, para viga simplemente apoyada, obtenidos a partir de FORTRAN.	196
Tabla D.2. 3. Contraste entre los valores teóricos y experimentales de los parámetros de la matriz K.....	196

Tabla E.1. 1. Detección de daño para el elemento E1 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal	199
Tabla E.1. 2. Detección de daño para el elemento E5 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal	202
Tabla E.1. 3. Detección de daño para el elemento E10 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal	203
Tabla E.1. 4. Detección de daño para el elemento E18 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal	204
Tabla E.1. 5. Detección de daño para el elemento E22 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal	205
Tabla E.1. 6. Detección de daño para el elemento E31 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal	206
Tabla E.2. 1. Detección de daño para el elemento E1 afectado en 10% y E10 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal.....	207
Tabla E.2. 2. Detección de daño para el elemento E1 afectado en 10% y E31 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal.....	209
Tabla E.2. 3. Detección de daño para el elemento E5 afectado en 10% y E10 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal.....	210
Tabla E.2. 4. Detección de daño para el elemento E5 afectado en 10% y E31 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal.....	211
Tabla E.2. 5. Detección de daño para el elemento E10 afectado en 10% y E18 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal	212
Tabla E.2. 6. Detección de daño para el elemento E10 afectado en 10% y E22 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal	213
Tabla E.2. 7. Detección de daño para el elemento E18 afectado en 10% y E22 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal	214
Tabla E.2. 8. Detección de daño para el elemento E22 afectado en 10% y E31 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal	215

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A.....	156
TABLAS COMPLEMENTARIAS DE VIGAS Y TUBERÍAS, EMPLEADAS EN EL ANÁLISIS MODAL Y ESTRUCTURAL.....	156
ANEXO B	172
PRUEBAS PRELIMINARES PARA LA VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS PLANTEADA (ANSYS).....	172
ANEXO C	184
PRUEBAS DE VALIDACIÓN DE FRECUENCIAS Y FORMAS MODALES, PARA ESTRUCTURAS EN PRESENCIA DE DAÑO (ANSYS vs FORTRAN) 184	
ANEXO D.....	191
PRUEBAS DE VERIFICACIÓN A PARTIR DE LOS VALORES TEÓRICOS, PARA LAS MATRICES DE MASA Y RIGIDEZ ENSAMBLADA EN FORTRAN 191	
ANEXO E.....	197
DETECCIÓN DE DAÑOS SIMULADOS EN FORTRAN, A PARTIR DEL MÉTODO DE VARIACIÓN DE CURVATURA IMPLEMENTADO EN EXCEL 197	
ANEXO F.....	216
DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO, DISEÑADA PARA LA DETECCIÓN DE DEFORMACIONES GEOMÉTRICAS EN TUBERÍAS SIMULADAS A PARTIR DEL SE DE CBR.....	216

RESUMEN

TÍTULO: SISTEMA EXPERTO PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DEFORMACIÓN DE TUBERÍAS DE GAS: DISEÑO Y VALIDACIÓN NUMÉRICA.¹

AUTOR: SANDOVAL Cáceres. Wilmer Alexis.²

PALABRAS CLAVE: Deformaciones geométricas, Método de Elementos Finitos (FEM), análisis de componentes principales (PCA), Sistema Experto (SE), razonamiento basado en casos (CBR), redes neuronales tipo SOM, Transformada Wavelet (TW).

El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema experto para la detección de deformaciones geométricas en tuberías de gas “simuladas”, basado en el análisis de vibraciones bajo condiciones nominales y de daño.

En primer lugar, se realiza una introducción general de la investigación, su motivación, descripción, objetivos y estructura de la tesis.

Posteriormente, se aborda el marco conceptual que sustenta el trabajo de investigación, abarcando conceptos básicos como: modelado de sistemas dinámicos, espacio de estados, análisis vibracional, FEM, SE TW, SOM y CBR.

En tercera instancia, se presenta el estado del arte referente a aplicaciones y metodología de referencia. El capítulo posterior, comenta el modelado de la tubería utilizado para la generación de señales, que conforman la librería de casos del SE. Asimismo, se describe el proceso utilizado tanto para generación de la señal excitadora como de las señales propagadas en la estructura.

La quinta sección, explica la metodología utilizada en el proceso de validación de la herramienta empleada para la generación de las matices de rigidez, masa y amortiguamiento que caracterizan el sistema dado. Además, se describen las diferentes etapas que componen los proceso de entrenamiento y validación del SE.

El sexto apartado, está relacionado con la validación numérica del algoritmo implementado en MATLAB. Donde se comentan las diferentes pruebas realizadas durante la investigación, las cuales sustentan todo el proceso de validación.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de detección de daños simulados en diferentes puntos de la estructura y bajo diferente grado de severidad mediante el uso del SE.

Con el presente trabajo se logró generar un SE capaz de extraer y reducir las características de las señales simuladas, para su posterior clasificación según los casos, el tipo de daño y severidad; el cual permitió detectar y cuantificar daños en la tubería simulada.

¹ Tesis de Maestría, Trabajo de investigación

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomu Ingeniería Electrónica. Director: Rodolfo Villamizar Mejía (PhD). Co-directores: Oscar Javier Begam (PhD) y Luis Eduardo Mujica Delgado (PhD).

ABSTRACT

TITLE: EXPERT SYSTEM FOR ASSESSMENT OF STRAIN STATE ON GAS PIPELINES: DESIGN AND NUMERICAL VALIDATION³

AUTHOR: SANDOVAL Cáceres. Wilmer Alexis.⁴

KEYWORDS: Geometric deformations, finite element method (FEM), Principal Components Analysis (PCA), Expert System (SE), SOM neural networks, Wavelet Transform (WT).

This work describes the development of an expert system to detect geometric damage on simulated gas pipelines based on vibration analysis under operational and damage conditions.

The first chapter of this report presents a general overview of the research, its motivation, description, objectives and general structure of the thesis.

After that, the conceptual framework used on this research is explained, covering basic topics such as: dynamic system modeling, state space, vibrational analysis, FEM, SE TW, SOM and CBR.

In third place, the state of the art concerning applications and reference methodology are presented. Subsequently, the pipeline's model used to make up the case library for the SE is explained. Additionally, the excitatory signal generation and the simulation process used on structure's propagated signals measurement are described.

The fifth section of this book is dedicated to explaining the methodology used on the validation process for the generation of the stiffness, mass and damping matrices based on computational tools. Also, the different stages that make up both, the training and the validation process of the SE, are described.

Chapter six is dedicated to the validation of the numerical algorithm implemented in MATLAB describing different tests done during this research. Such tests support the whole validation's process.

Finally, the structural assessment's conclusions are presented based on the simulated damage detection in different points and different severity degrees of the structure.

A SE was generated in the present study which was able to extract and to reduce the characteristics of the simulated signals for subsequent classification, damage type, and severity. This outcome allowed us to detect and to quantify damage in the simulated pipeline.

³ Magister degree work.

⁴ Faculty of Physic-Mechanical Engineerings. Electrical, Electronic Engineering and Telecommunications' School, Electronic Engineering. Director: Rodolfo Villamizar Mejía (PhD). Co-directores: Oscar Javier Begambre Carrillo (PhD) y Luis Eduardo Mujica Delgado (PhD)

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En la actualidad, la monitorización de la salud estructural es un tema de interés común tanto para el sector académico como el industrial, y es aplicada en áreas del conocimiento relacionadas con la ingeniería civil, mecánica y aeroespacial entre otras. A nivel industrial, los fluidos usualmente son transportados a través de tuberías, cuya salud estructural se ve afectada por diferentes causas, que ocasionan la fatiga y posterior colapso de las mismas.

Por tanto, es necesario realizar labores de inspección periódicas que evalúen la integridad estructural de las tuberías, para la detección temprana de sus posibles anomalías o deterioros. Esta acción contribuye a aumentar el nivel de seguridad en la operación de transporte, minimizando así el riesgo de accidentes que afectan la calidad del servicio, el medio ambiente y la población civil.

En las últimas décadas, los problemas más críticos a los se han enfrentado las empresas petroquímicas son los desastres de tipo tecnológico, tal como el ocurrido en Urengoy-Petrovsk GP el 9 de abril de 2003 causado por Bashtransgaz Ltd [1]. Tal incidente causó la ignición del gas natural transportado, afectando directamente a la población. En Rusia se experimentaron más de 18 accidentes en el periodo comprendido entre mayo del 2003 y junio de 2004. Así mismo en Estados Unidos ocurrieron dos accidentes trascendentales en el periodo comprendido entre Junio de 1999 y agosto de 2000, causados por las líneas de transmisión de gasolina de la compañía Olympic Pipe Line Co. y la tubería de la empresa El Paso Natural Gas, respectivamente. Estos dos accidentes arrojaron como saldo 14

personas muertas, grandes pérdida del producto y altos costos en la restauración de la red de transporte. En estos accidentes las principales causas son el envejecimiento de las tuberías y su uso prolongado, [1].

En consecuencia, las labores de mantenimiento y supervisión de tuberías, tanto de gas como de hidrocarburos, se han convertido en una prioridad para las empresas del sector, con el fin de reducir riesgos en la operación del sistema y evitar así grandes pérdidas económicas.

Usualmente las labores de monitorización estructural, son realizadas por herramientas de inspección en línea especializadas “intelligent pigs y geopics”, la cuales tienen un alto grado de fiabilidad en la detección de anomalías como corrosión, grietas y deformaciones geométricas entre otras. Sin embargo, sus altos costo de operación y baja disponibilidad, han impulsado la búsqueda de nuevas alternativas de inspección que data desde finales de los años 60’s.

Una solución alternativa es la detección de daños basado en vibraciones mecánicas inducidas, utilizada y validada en diversas aplicaciones. Sus aplicaciones van desde identificar averías en estructuras tales como ductos, obras civiles [2], hasta evaluación de materiales aeroespaciales [3]. Comprobando así, que esta solución no solo es viable desde el punto de fiabilidad, sino también desde el punto de vista económico.

1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA

talesó de, sotro tipotal queevalúe ye las. Tal acciónrá La inspección de los sistemas de transporte y distribución, tanto de gas como de hidrocarburos, se han convertido paulatinamente en la principal prioridad de las empresas de este ramo. Esto ultimo con el fin de evitar contingencias inesperadas y así

reducir el riesgo de pérdidas económicas por inoperación de su infraestructura.

Actualmente la mayoría de los sistemas utilizados por las empresas transportadoras y distribuidoras de gas, son inspeccionados mediante el uso de herramientas inteligentes denominadas “Intelligent pigs” y “Geopigs”. Tal tecnología siendo de un alto al momento de determinar el estado estructural de la tubería tal como nivel de corrosión, cracking, deformaciones geométricas, entre otras. Sin embargo su adquisición o contratación es bastante elevada (aprox. US\$2500/Km). Esta condición sumada a la diversidad de la topología del subsuelo colombiano y el movimiento continuo e impredecible de algunas zonas localizadas del terreno en el que se encuentran emplazadas las redes de transporte y distribución, hacen necesario realizar inspecciones rutinarias a intervalos de tiempo relativamente cortos. Lo anterior significa un aumento substancial de costos por concepto de operación en las labores de inspección. Adicionalmente, la disponibilidad de las herramientas de inspección anteriormente mencionadas es muy baja, dada la gran demanda en servicio de evaluación estructural de las tuberías a nivel mundial.

Las anteriores limitaciones hacen que la evaluación del estado estructural de las tuberías en los gasoductos colombianos, esté restringida a hacerse una vez por año en el mejor de los casos). En otras palabras, la posibilidad de que se presente una avería en ese lapso de tiempo es alta y difícilmente predecible, lo que conlleva a contingencias inesperadas y obviamente a la realización de reparación. TalActualmente, los gasoductos Colombianos presentan los problemas anteriormente mencionados, lo que ha llevado en algunas ocasiones a generar grandes pérdidas y problemas de continuidad en el servicio.

Uno de los problemas de las tuberías que más preocupa a las empresas colombianas, es la provocación de deformación geométrica hasta que están sufriendo algunos tramos localizados de sus gasoductos. Esto se debe a que no se cuenta con una herramienta de diagnóstico, que permita monitorizar a intervalos cortos de líneas (Diaria, Semanal, mensual o semestralmente), el estado del gasoducto que manifiesta deformación, su ; . Tal tipo de deformación se presenta debido a la sedimentación del terreno sin que se pueda predecir la ocurrencia de esta. En algunas ocasiones el sedimento puede llevar a que en muy poco tiempo la deformación sea tan alta que implica la ruptura inmediata de la tubería

de colapsos. Algunas soluciones a estos problemas se han planteado como son el corrimiento más frecuente de "Geopigs", la instalación paralela de gasoductos y la extensión a lo largo de la tubería de un filamento tensor manifestando un cambio en tensión al momento de producirse cambios geométricos en el ducto. Sin embargo tales soluciones resultan bastante costosas y algunas poco confiables. Hace necesario plantear nuevas alternativas de supervisión

Una solución viable, aplicada en problemas similares, es la detección de daños basado en la vibración [[2], [4]]. Estas aplicaciones se han hecho para identificar averías estructurales en ductos de estructuras y entre otras hasta la evaluación de los alerones utilizados por las aeronaves, en las que se ha reportado como viable tanto desde el punto de fiabilidad como económico.

Los beneficios obtenidos mediante el uso de estas nuevas herramientas pueden resumirse en:

- Disponibilidad de información diaria y en tiempo real.

- No intrusividad.
- Portabilidad
- Implementabilidad.Confiabilidad.
- Reducción de costos.

Con base en los resultados reportados en investigaciones realizadas en el campo de detección de fallas basada en vibraciones [[4]-[14]] y las ventajas anteriormente mencionadas, se plantea la posibilidad de utilizar esta técnica como una solución alternativa para la evaluación de cambios de rigidez basado en deformaciones geométricas en tuberías sin derivaciones (a nivel de simulación). Por ende, se plantea la siguiente hipótesis:

“Los cambios de rigidez en los elementos de una estructura, modifican los modos de vibración característicos de la misma, por tanto su respuesta dinámica ante ondas de vibración inducidas varía en tiempo y frecuencia, respecto a las condiciones nominales”. Lo que podría detectar mediante un análisis de las señales propagadas a lo largo de la estructura

1.3 OBJETIVO DE LA TESIS

El objetivo general de éste trabajo de investigación es validar numéricamente una técnica de inspección en línea, para la evaluación del estado de deformación geométrica de gasoductos.

Para el cumplimiento del mismo, se tuvo que efectuar la generación numéricamente, mediante software comercial de elementos finitos, casos de comportamiento dinámico de tuberías subterráneas sujetas a vibraciones, en condiciones de operación normal y de deformación; la aplicación de una metodología de evaluación de daño estructural fundamentada en Razonamiento Basado en Casos, para la evaluación de deformaciones geométricas de gasoductos y la validación numéricamente de la efectividad

de la metodología, usando la herramienta computacional Matlab, sobre modelos lineales unidimensionales de tuberías rectas sin derivaciones. el equipo de monitorización.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está organizada en seis capítulos. El presente capítulo incluye una introducción, motivación y los objetivos de la tesis. El Capítulo 2 presenta la revisión del estado del arte referente a monitorización de salud estructural, aplicada en campos de la ingeniería mecánica, civil y aeroespacial, entre otros, así como la metodología utilizada como base para el desarrollo de la tesis. El capítulo 3 presenta el marco conceptual de referencia para la construcción del sistema experto implementado en éste trabajo de investigación, el cual sustenta el desarrollo del mismo, abarcando los conceptos básicos de modelado de sistemas dinámicos, representación en espacio de estados, análisis vibracional de estructuras tipo viga, método de elementos finitos (FEM), sistemas expertos (SE), extracción de características mediante la transformada de wavelet (TW), reducción de dimensionalidad a partir del análisis de componentes principales (PCA), clasificación de señales mediante redes tipo SOM y finalmente, la detección de daños apoyada en el razonamiento basado en casos. El modelado de la tubería a partir del método en elementos finitos y el espacio de estados, utilizado para la generación de las señales que conforman la librería de casos del SE, es presentado en el capítulo 4. El capítulo 5 está dedicado a explicar la metodología utilizada para la generación de casos, procesamiento de señales y la implementación del sistema experto basado en el razonamiento de casos. En el capítulo 6 se explica la validación numérica tanto para la generación de casos como para la construcción del sistema experto y finalmente en el capítulo 7 se presenta el análisis de resultados efectuado para la monitorización de salud estructural en diferentes escenarios de daño.

2. MARCO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se abordarán los fundamentos teóricos básicos, relacionados con el modelado de tuberías, daño estructural y las herramientas matemáticas utilizadas en la implementación del sistema experto para la detección de daño estructural basado en la medición de deformaciones geométricas “aceleraciones”. Con el fin de facilitar, una mejor comprensión del trabajo de investigación realizado.

2.1 *MODELO ESTRUCTURAL*

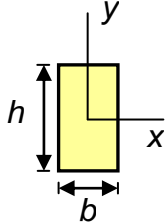
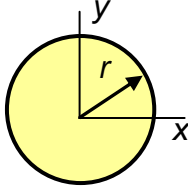
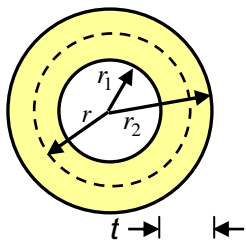
La obtención del modelo matemático simplificado, está basado en la aplicación de diversas teorías y métodos matemáticos necesaria para efectuar el análisis estructural de la tubería y simular su comportamiento dinámico. Para ello se utilizó en conjunto el método de elementos finitos y el análisis en espacio de estados.

Otro aspecto importante del modelo de la tubería utilizado, es la aproximación realizada al modelo de vigas. Esto último sustentado en el método de elementos finitos (FEM), donde las matrices estructurales ensambladas dependen de dos grandes factores. El primero de ellos, referente a las propiedades estructurales del material y el segundo a la geometría.

Teniendo en mente las consideraciones mencionadas y el supuesto de que se dispusiera dos estructuras para un análisis mediante FEM, una tipo viga y la otra tipo tubería, con las mismas características en cuanto a longitud, módulo de elasticidad, coeficiente de poisson y densidad del material, sería necesario disponer de parámetros que permitieran diferenciar las dos estructuras y por ende sus respectivos análisis.

En consecuencia, es necesario utilizar los parámetros inherentes a la geometría de la estructura observadas en la tabla 1, como son el área de la sección transversal y la inercia, para efectuar dicha distinción.

Tabla 1. Momento de inercia para secciones transversales.

Sección transversal	Inercia	Parámetros
	$I_x = \frac{h b^3}{12}; \quad I_y = \frac{b h^3}{12}$ $I_p = \frac{b h}{12} (h^2 + b^2)$	<i>b</i> : Base <i>h</i> : Altura <i>I_x</i> : momento de inercia respecto al eje x. <i>I_y</i> : momento de inercia respecto al eje y. <i>I_p</i> : momento de inercia polar
	$I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi d^4}{64}$ $I_p = \frac{\pi r^4}{2} = \frac{\pi d^4}{32}$	<i>d</i> : Diámetro <i>r</i> : Radio
	$I_p = \frac{\pi}{2} (r_2^4 - r_1^4) \cong \frac{\pi}{32} (d_2^4 - d_1^4)$ <p>Considerando <i>r</i> y <i>d</i>:</p> $I_p = \frac{\pi r t}{2} (r^2 + t^2) \cong \frac{\pi d t}{4} (r^2 + t^2)$ <p>Considerando <i>r</i> >> <i>t</i></p> $I_p = \frac{\pi d^3 t}{4}$	<i>d₁</i> : Diámetro interno <i>d₂</i> : Diámetro exterior <i>r₁</i> : Radio interno <i>r₂</i> : Radio externo <i>d</i> : Diámetro promedio <i>r</i> : Radio promedio <i>t</i> : Espesor de la pared <i>I_p</i> = Inercia polar

Fuente: El autor basado en tablas tomadas de [49]

2.1.1 Ecuación dinámica

Dado que para el presente proyecto se requiere analizar la vibración respectiva de la estructura en puntos específicos de la misma, y considerando que su comportamiento es lineal, el modelo matemático se basó en el modelo clásico del sistema masa-resorte-amortiguador de un

grado de libertad, cuya dinámica está gobernada por la ecuación 2-1. [[2], [41]-[45]].

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad \mathbf{2-1}$$

Donde:

- $f(t)$ simboliza la fuerza aplicada al sistema dada en [N/m].
- m corresponde a la masa del cuerpo dada en [Kg].
- k es la constante de rigidez del resorte
- c es la constante del coeficiente de fricción viscosa.
- $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $\ddot{x}(t)$ corresponden al desplazamiento, la velocidad y la aceleración del sistema respectivamente.

No obstante, cabe aclarar que la dinámica de este tipo de sistemas mecánicos se da en varias dimensiones como son la translación (o desplazamiento x), la rotación (o giro \emptyset) ó sus diferentes combinaciones [[2], [43], [46], [47]]. Sin embargo, para efectos de análisis y aplicación del sistema de monitorización se consideran solamente los desplazamientos de tipo transversal.

Teniendo en cuenta que para el caso específico del modelo de la tubería, el sistema es simulado con múltiples sistemas masa-resorte-amortiguador en cascada (ver figura 1), y que cada uno de ellos tiene asociados dos grados de libertad (desplazamientos y giros), el comportamiento dinámico del nuevo sistema, quedara descrito por la ecuación 2-2 [[2], [41]-[45], [48]].

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = BF(t) \quad \mathbf{2-2}$$

Donde:

- $\ddot{X} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix}$, $\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}$, $X = \begin{bmatrix} x \\ \phi \end{bmatrix}$ y $F = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix}$, son los vectores asociados a las aceleraciones, velocidades, desplazamientos y fuerzas presentes en el sistema.
- M , C y K son las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento de los elementos que conforman el sistema.
- B corresponde a la matriz de fuerzas aplicadas en cada uno de los grados de libertad del sistema (Según sea el caso ej.: $B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$).

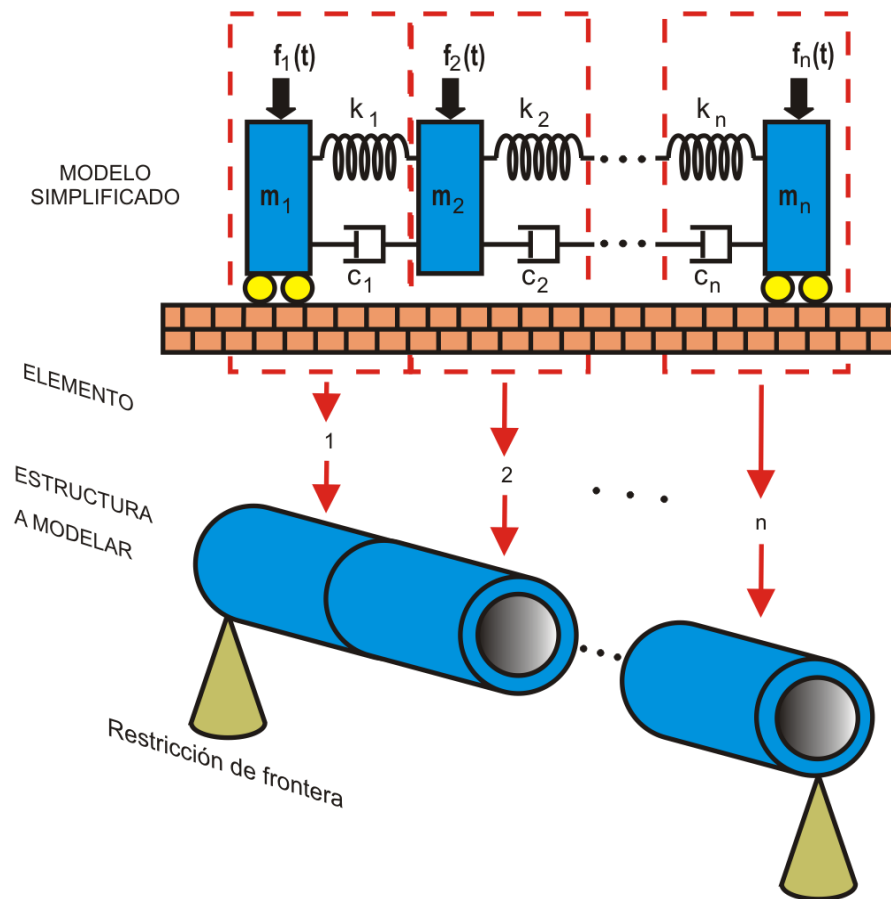


Figura 1. Esquema del sistema masa-resorte-amortiguador para múltiples grados de libertad.

2.1.2 Análisis de vibración.

Dado que el modelo dinámico de la tubería es equivalente al modelo de vibración de la viga y teniendo en cuenta las consideraciones referidas en la parte inicial de la sección 2.1, se revisará la teoría correspondiente al segundo modelo mencionado.

La vibración de una viga está gobernada por la ecuación 2-3 [[2], [45]].

$$\rho A(x) \frac{\partial^2 \omega(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 \omega(x,t)}{\partial x^2} \right) = f(x,t) \quad \mathbf{2-3}$$

Donde:

$A(x)$ es la sección transversal.

ρ , es la densidad del material

E , es el módulo de Young ó coeficiente de elasticidad.

I , es el momento de inercia de la sección transversal (Ver tabla 1).

$\omega(x,t)$, es la deflexión de la viga.

$f(x,t)$, es la fuerza externa aplicada.

Considerando que $f(x,t)=0$, y asumiendo que $EI(x)$ y $A(x)$ son constantes, la ecuación se simplifica, de tal forma que la vibración libre estará gobernada por la ecuación 2-4 [45].

$$\frac{\partial^2 \omega(x,t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial^4 \omega(x,t)}{\partial x^4} = 0 \quad \text{Donde, } C = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad \mathbf{2-4}$$

Según la expresión anterior, son necesarias las respectivas condiciones de frontera para calcular la solución. La presencia de dos derivadas con respecto al tiempo, sugiere la presencia de dos condiciones iniciales para el sistema. Una debido al desplazamiento y la otra debida a la velocidad.

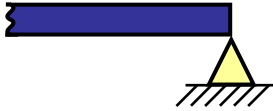
La solución de la ecuación 2-4, se obtiene mediante el análisis de los siguientes parámetros en el cada uno de los extremos de la viga:

- La deflexión, $\omega(x,t)$
- La variación de la deflexión, $\frac{\partial\omega(x,t)}{\partial t}$
- El momento flexionante, $EI \frac{\partial^2\omega(x,t)}{\partial x^2}$
- El esfuerzo cortante $\frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2\omega(x,t)}{\partial x^2} \right)$

Para efectuar el análisis de los modos de vibración para una estructura determinada “como es el caso de la tubería”, es necesario conocer las condiciones de frontera (ó restricciones) impuestas según el tipo de apoyo seleccionado para cada extremo de la misma [[2], [45], [50]], los cuales permite restringir dos de los cuatro parámetros analizados en cada extremo [45], como se observa en la tabla 2 para el caso de apoyo simple y en la tabla 1 del anexo1 para las demás consideraciones de apoyo.

Por lo tanto, existen diferentes configuraciones de acuerdo a las condiciones de frontera impuestas para el modelo de la viga y son denominados según sea la condición del apoyo utilizado en cada uno de los extremos del modelo como se observa en la tabla 2 y posteriormente en la tabla 1 del anexo 1, las configuraciones restantes.

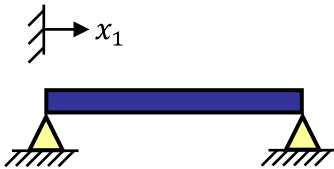
Tabla 2. Restricción en las condiciones de frontera según el tipo de apoyo

Condición del extremo de la viga en vibración transversal	Parámetros de la viga en ese extremo			
	Deflexión	Variación de la deflexión	Momento	Esfuerzo cortante
 Simplemente soportado	$w = 0$	Sin restricción	$EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$	Sin restricción

Fuente: El autor basado en tablas tomadas de [45]

Así mismo, en la Tabla 3, se reportan los valores de los pesos de las frecuencias naturales y la expresión para determinar la forma del modo de vibración de la configuración seleccionada. Donde Cada uno de los pesos de la frecuencia natural $\beta_n l$, está relacionado con la frecuencia natural ω_n , por medio de la expresión $\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{EI/\rho A}$.

Tabla 3. Configuraciones para vigas delgadas/ ilustración del valor del peso de las frecuencias naturales ($\beta_n l$) y forma de los modos de vibración.

Configuración	Valor de $\beta_n l$ y ecuación característica	Forma del Modo	σ_n	
			Valor	Formula
 Apoyado-Apoyado	3.92660231 7.06858275 10.21017612 13.35176878 16.49336143 $\frac{(n+1)^2 \pi}{4}$ para $n > 5$ $\sin(\beta l) = 0$	$\frac{\sin(n \pi x)}{l}$	Ninguno	Ninguno

Fuente: El autor basado en tablas tomadas de [45]

Otro aspecto a tener en cuenta del modelo matemático de la estructura, está relacionado con las condiciones de frontera y el modelo de la viga, referidos con respecto a las ecuaciones Euler-Bernulli [[2], [45], [49]]. Por consiguiente

se asume una serie de restricciones para este modelo, es decir, que la viga posee las siguientes características de la viga para el modelo en estudio:

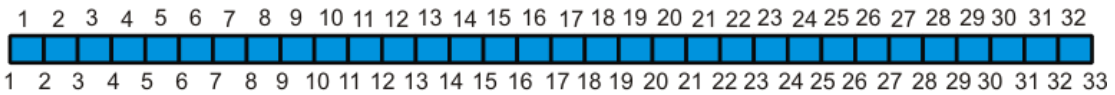
- Es uniforme a lo largo de toda su luz (longitud) y las dimensiones de su sección transversal son considerablemente menores con respecto a su longitud "característica propia en un gasoducto".
- Composición lineal, homogénea, material elástico isotrópico y sin cargas axiales
- La sección transversal plana permanece plana durante la flexión
- Como el plano de simetría de la viga es además el plano de vibración entonces la rotación y la traslación están desacopladas.
- Tanto la inercia rotacional como la deformación cortante pueden ser despreciadas

2.1.3 Modelado estructural por elementos finitos.

El método de elementos finitos (FEM) se ha convertido en una herramienta muy utilizada en campos de la ingeniería civil, eléctrica y mecánica entre otras, para determinar la solución numérica de un problema dado [[14], [31], [33], [35], [39], [45], [46], [48], [50], [51]].

En el caso específico de estructuras, es aplicado para el análisis de esfuerzos, flujo de calor, deformaciones y análisis modal entre otros. Esta herramienta permite analizar problemas complejos de una forma muy versátil, para lo cual se discretiza la estructura en un número dado de secciones denominadas elementos finitos y cuyos extremos son denominados nodos como se observa en la figura 2. A su vez, las propiedades del material ($A(x)$, I , E y ρ) y las relaciones gobernantes del sistema, son aplicadas sobre cada una de las componentes discretas de la estructura [[45], [50]].

Elementos



Nodos

Figura 2. Discretización de la estructura a analizar utilizando FEM.

Cada uno de los elementos (e) del sistema, tiene asociados dos grados de libertad (el desplazamiento V y la rotación ϕ) [[2], [45], [46], [50]], en cada uno de los nodos (N) de la estructura como se observa en la figura 3. Por tanto, el comportamiento dinámico en forma global de la misma, está basado en el ensamble de las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento asociadas a cada uno de los elementos del sistema ($M_{elemento}$, $K_{elemento}$ y $C_{elemento}$).

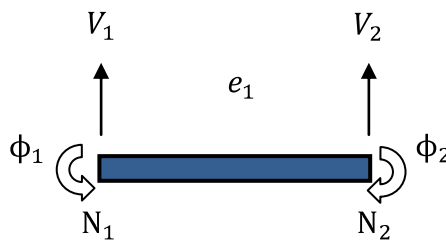


Figura 3. Grados de libertad asociados al elemento finito.

En consecuencia, la matriz de rigidez de cada elemento está definida por la ecuación 2-5 [[2], [45], [47]]. Donde $a = 12$, $b = 6L$, $c = 2L^2$, $d = 2c = 4L^2$ y $L = \text{Longitud del elemento finito}$

$$k_{elemento} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} a & b & -a & b \\ b & d & -b & c \\ -a & -b & a & -b \\ b & c & -b & d \end{bmatrix} \begin{matrix} V1 \\ \phi1 \\ V2 \\ \phi2 \end{matrix} \quad \text{2-5}$$

Por otra parte y considerando que la masa de cada uno de los elementos están concentradas en un punto dado (en los nodos de la estructura), la

matrices de masa asociada a cada uno de los elementos de la estructura estarán descritas por la ecuación 2-6 [[2], [45]]. Donde, $a = 1$.

$$M_{elemento} = \frac{\rho AL}{2} \begin{bmatrix} V1 & \phi1 & V2 & \phi2 \\ a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} V1 \\ \phi1 \\ V2 \\ \phi2 \end{matrix} \quad \mathbf{2-6}$$

Finalmente, la matriz de amortiguamiento para cada elemento puede ser escrita como una combinación lineal de las matrices reducidas de rigidez y de masa [[45], [52], [53]] como se observa en la ecuación 2-7, donde α y β son constantes. Este tipo de amortiguamiento es conocido como “Amortiguamiento proporcional o amortiguamiento de Raleigh” [[2], [45], [48]].

$$C = \alpha M + \beta K \quad \mathbf{2-7}$$

De forma alternativa, la matriz C puede ser calculada a partir de los valores (λ) y vectores propios (Φ), obtenidos al efectuar la operación $M^{-1}K$ y aplicando la ecuación 2-8 [44]. Donde, $(2\pi f) = \sqrt{\lambda}$.

$$C = M\Phi \text{diag}(2\zeta(2\pi f))\Phi^T \quad \mathbf{2-8}$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta las ecuaciones 2-2, 2-5, 2-6, 2-7, 2-8, las condiciones de frontera impuestas por la configuración de apoyo seleccionada (como se observa en la figura 4) y el número de elementos elegidos para el análisis 32, se obtienen las matrices de ensamble que conforman el modelo matemático de la estructura seleccionada. No obstante y debido al tamaño de las matrices ensambladas del sistema considerado (64x64), dicho proceso se ilustra para una viga de 3 elementos.

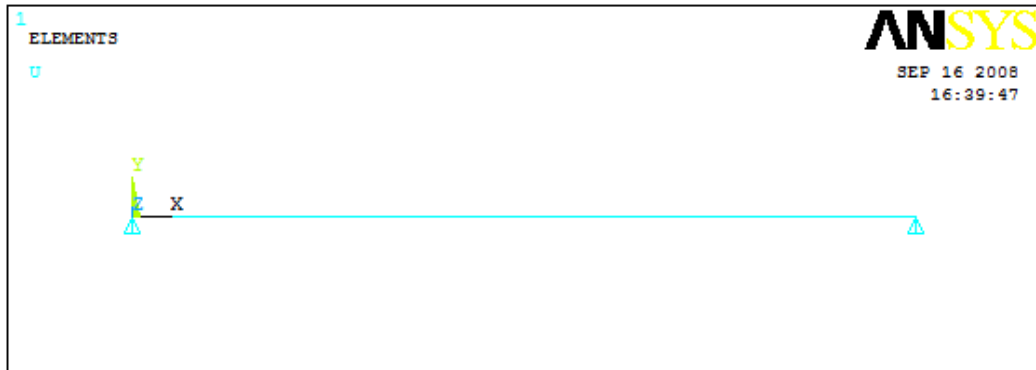


Figura 4. Estructura simulada en configuración apoyo simple.

En primera instancia, se realiza ensamble de la matriz de masas ($M_{ensamblada}$), partiendo de la ecuación 2-6 (como se observa en la ecuación 2-9).

$$M_{ensamblada} = \begin{bmatrix}
 m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & m_1 + m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 + m_3 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \begin{matrix}
 V_1 \\
 \phi_1 \\
 V_2 \\
 \phi_2 \\
 V_3 \\
 \phi_3 \\
 V_3 \\
 \phi_4
 \end{matrix} \quad 2-9$$

Considerando que las masas de los elementos son iguales ($m_1 = m_2 = m_3 = m$) y reorganizando los elementos de la matriz, se obtiene la ecuación 2-10.

$$M_{ensamblada} = \begin{bmatrix} V1 & V2 & V3 & V4 & \phi1 & \phi2 & \phi3 & \phi4 \\ m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \boxed{M_{11}} & 0 & 0 & \boxed{M_{12}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \boxed{M_{21}} & 0 & 0 & \boxed{M_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \\ \phi1 \\ \phi2 \\ \phi3 \\ \phi4 \end{matrix} \quad \mathbf{2-10}$$

Donde, $M_{11} = \begin{bmatrix} 2m & 0 \\ 0 & 2m \end{bmatrix}$; $M_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $M_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$;

$$M_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

En segunda instancia, los valores teóricos para la matriz K (ensamblada) están dados por la matriz observada en ecuación 2-11, a partir de la ecuación 2-5.

$$K_{ensamblada} = \begin{bmatrix} V1 & \phi1 & V2 & \phi2 & V3 & \phi3 & V4 & \phi4 \\ a_1 & b_1 & -a_1 & b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & d_1 & -b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_1 & -b_1 & a_1 + a_2 & -b_1 + b_2 & -a_2 & b_2 & 0 & 0 \\ b_1 & c_1 & -b_1 + b_2 & d_1 + d_2 & -b_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_2 & -b_2 & a_2 + a_3 & -b_2 + b_3 & -a_3 & b_3 \\ 0 & 0 & b_2 & c_2 & -b_2 + b_3 & d_2 + d_3 & -b_3 & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & -b_3 & a_3 & -b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_3 & c_3 & -b_3 & d_3 \end{bmatrix} \begin{matrix} V1 \\ \phi1 \\ V2 \\ \phi2 \\ V3 \\ \phi3 \\ V4 \\ \phi4 \end{matrix} \quad \mathbf{2-11}$$

Considerando, que la rigidez de cada uno de los elementos puede variar ($a_1 \neq a_2, b_1 \neq b_2, d_1 \neq d_2, a_2 \neq a_3, b_2 \neq b_3, d_2 \neq d_3$) y reorganizando la matriz, se obtiene la ecuación 2-12.

$$K_{ensablada} = \begin{array}{cccc|cccc} V1 & V2 & V3 & V4 & \phi1 & \phi2 & \phi3 & \phi4 \\ \hline a_1 & -a_1 & 0 & 0 & b_1 & b_1 & 0 & 0 \\ -a_1 & \boxed{K_{11}} & 0 & 0 & \boxed{K_{12}} & & & \\ 0 & & & -a_3 & & & & \\ 0 & 0 & -a_3 & a_3 & 0 & 0 & -b_3 & -b_3 \\ \hline b_1 & \boxed{K_{21}} & 0 & 0 & \boxed{K_{22}} & & & \\ b_1 & & & 0 & & & & \\ 0 & & & -b_3 & & & & \\ 0 & & & -b_3 & & & & \end{array} \begin{array}{l} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \\ \phi1 \\ \phi2 \\ \phi3 \\ \phi4 \end{array} \quad \mathbf{2-12}$$

Donde,

$$K_{11} = \begin{bmatrix} a_1 + a_2 & -a_2 \\ -a_2 & a_2 + a_3 \end{bmatrix}; K_{12} = \begin{bmatrix} -b_1 & -b_1 + b_2 & b_2 & 0 \\ 0 & -b_2 & -b_2 + b_3 & 0 \end{bmatrix};$$

$$K_{21} = \begin{bmatrix} -b_1 & 0 \\ -b_1 + b_2 & -b_2 \\ b_2 & -b_2 + b_3 \\ 0 & b_3 \end{bmatrix}; K_{22} = \begin{bmatrix} d_1 & c_1 & 0 & 0 \\ c_1 & d_1 + d_2 & c_2 & 0 \\ 0 & c_2 & d_2 + d_3 & c_3 \\ 0 & 0 & c_3 & d_3 \end{bmatrix}$$

2.2 MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL

Éste tipo de diagnóstico, involucra varios procesos como son: la identificación del daño, su localización, el tipo y su cuantificación. Rytter define cuatro niveles de monitorización de daños [[2], [3]]:

Nivel 1: Determinar la existencia del daño estructural.

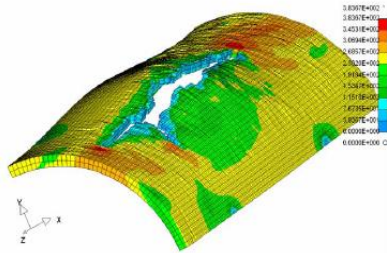
Nivel 2: Nivel 1 más la localización del daño.

Nivel 3: Nivel 2 más cuantificación de la gravedad del daño.

Nivel 4: Nivel 3 más predicción de vida útil de la estructura.

2.2.1 Daño estructural

En la actualidad, el diagnóstico de daños estructurales (ver figura 5), se ha convertido en una prioridad de investigación tanto para el sector académico como el industrial, con el fin de minimizar el riesgo de accidentes ocasionados por el deterioro de la vida útil de los materiales [[1], [3]].



Tomado de [18].

Figura 5. Daños estructurales comúnmente presentados en tuberías.

Su campo de acción va desde la ingeniería aeroespacial, civil y mecánica, hasta el análisis de tuberías, utilizadas el transporte y distribución de fluidos de la industria petroquímica entre otras [[1]-[8], [10], [12], [13], [15]-[23], [25]-[27], [29], [30], [34], [39], [40], [44], [54]-[56]].

Existen múltiples causas que afectan la salud estructural de las tuberías, como son: la corrosión “tanto interna como externa”, la pérdida del espesor, anomalías de tipo geométricas “como abolladuras arrugas y variación de curvatura”, las grietas y la pérdida de masa entre otras. Las cuales son monitorizadas mediante herramientas especializadas en la detección, cuantificación y ubicación de daños de tipo estructural.

2.2.2 Herramientas usadas en la inspección de tuberías.

Actualmente existen herramientas utilizadas en la inspección de tuberías que son de tipo no destructivo. Estas permiten detectar en línea anomalías tanto internas como externas y determinar fallas en el material, las cuales pueden ser clasificadas a partir de sus correspondientes normas y estándares de calidad. [[1], [3]-[5], [7], [12], [15]-[23], [25]-[27], [29], [30], [34], [39], [40], [54]-[56]].

En dichas herramientas las técnicas están basadas en: la óptica, el ultrasonido, los rayos X, el campo térmico, las corrientes de Eddy, la holografía y el análisis de la impedancia, entre otras [[15], [25]].

En la actualidad, la detección de daños mecánicos en tuberías es efectuada por las denominadas herramientas de inspección en línea (ILI) [[1], [6], [12], [15], [17]-[23], [25]-[27], [29], [30], [40], [54], [55]], comúnmente conocidas como “geopics e intelligent pigs”, los cuales están dotados con sistemas de sensores, comunicaciones y de locomoción, de tal forma que al ser colocados en la tubería se desplacen de un lugar a otro a lo largo de ella [[1], [55]]. Sin embargo, su uso en Colombia es aún costoso y de operación compleja.

Este tipo de herramienta evalúa y almacena información punto a punto del ducto con un alto grado de fiabilidad. Sin embargo, sus elevados costos de adquisición y operación hacen que su uso sea restringido y con una periodicidad baja, lo cual conlleva a tener una alta incertidumbre sobre el estado de deterioro de los ductos durante una inspección y otra.

En consecuencia, a nivel mundial tanto las industrias del sector como las universidades han apoyado el desarrollo de alternativas de detección de daños a un bajo costo y fiables, mediante técnicas NDT. Esta tendencia global es compartida por investigadores en diversos campos de la ingeniería [[2], [3], [5], [7], [10], [30], [41], [54]].

Una de las primeras alternativas aplicadas fue el razonamiento estructural mediante métodos analíticos y semi-empíricos, dando como resultando soluciones demasiado complejas para su análisis. Posteriormente y con la aparición de herramientas computacionales, se dio paso al uso de métodos numéricos para facilitar el análisis estructural mediante el uso de simuladores

especializados basados en elementos finitos [[1], [14], [31], [33], [35], [45], [46], [48], [50], [51]].

Otra de las alternativas ampliamente difundida tanto en el mundo académico como en la industria desde la década de los 60's [[1], [2], [3]], es el uso de la técnica basada en análisis de vibraciones. Esta última ha demostrado su fiabilidad y economía en cuanto a la detección y cuantificación de daños estructurales que van desde ductos, obras civiles hasta materiales aeroespaciales [[4], [12]].

2.2.3 Análisis de vibraciones en estructuras

Una técnica NDT utilizada en la actualidad, es el análisis de vibraciones [[2]-[4], [6], [12], [35], [45], [57]-[59]], fundamentada en los modos de vibración estructural, para lo cual se debe tener conocimiento de la ecuación dinámica del sistema y condiciones de frontera establecidas por los tipos de apoyo sobre el cual esta soportada la misma, como se explicó en la sección 1.1.2.

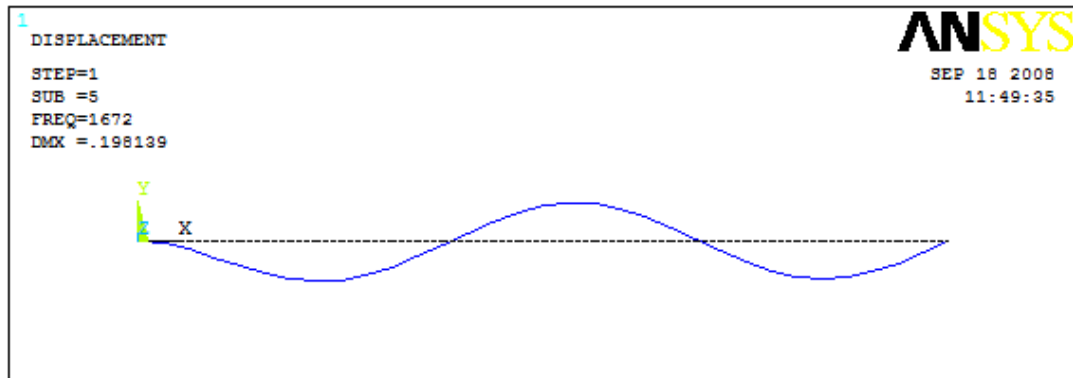


Figura 6. Simulación en del tercer modo de vibración para viga en configuración simplemente apoyada mediante Ansys.

A continuación se presenta un método clásico y otro alternativo, para la detección de daños basado en el análisis vibraciones. El primero de ellos, se fundamenta en la variación de los vectores propios o formas modales de la

estructura (como la observada en la figura 6) y el segundo se basa en el uso de sistema experto.

2.2.4 Detección de daño a partir de la variación de las formas modales

Este método dinámico es una forma rápida y computacionalmente económica para la detección de daños estructurales a partir de datos experimentales. Esta técnica utiliza la comparación de las formas modales para indicar la localización del daño [2].

En primera instancia, se hace uso del método de variación de las formas modales, basado en los parámetros de las diferencias relativa (DR) y directa (DD), cuyos argumentos de entrada son los valores de las formas modales de la estructura tanto en ausencia como en presencia del daño. Dichos parámetros se calculan a partir de la ecuación 2-13, donde $q_{SD}^{(i)}$ es la i-ésima forma modal sin daño y $q_D^{(i)}$ es la i-ésima forma modal en presencia de avería.

$$\begin{aligned} DR &= \frac{q_{SD}^{(i)} - q_D^{(i)}}{q_{SD}^{(i)}} & 2-13 \\ DD &= \frac{q_{SD}^{(i)} - q_D^{(i)}}{q_D^{(i)}} \end{aligned}$$

El parámetro DR proporciona la información referente a la variación de escala en amplitud de la forma modal [2].

En segunda instancia, esta técnica toma en cuenta la variación de la diferencia absoluta de la curvatura (DC) de las formas modales. En el caso específico de daños estructurales donde la viga presenta fisuras o deterioros de su integridad, dicha condición se ve reflejada en reducciones de rigidez de los elementos directamente afectados. Es decir, que un cambio en el módulo de elasticidad o del momento de inercia de la estructura de un elemento, produce un aumento significativo en la amplitud de la curvatura $\left(\frac{d^2}{dx^2} \right)$ de la

sección de dicho elemento, como se deduce en la expresión clásica 2-14 de resistencia de materiales, donde M es el momento flector de la sección afectada [[2], [45], [49]].

$$V'' = \frac{M}{EI} \quad \mathbf{2-14}$$

Dado que las variaciones de las curvaturas son localizadas y dependen en forma directa de EI, ellas pueden ser utilizadas para detectar, localizar y cuantificar daños estructurales. Por lo tanto, la DC de las formas modales entre las estructuras con y sin daño, presenta un máximo en la región damnificada [2].

Las curvaturas son calculadas a partir de la longitud del elemento de la viga (l), el i -ésimo elemento del i -ésimo vector de curvatura $\{V_{ij}''\}$ y el i -ésimo elemento de la j -ésima forma modal (q_{ij}), como se observa en la ecuación 2-15 [[2], [59]].

$$V_{ij}'' = \frac{q_{(i+1)j} - 2q_{ij} + q_{(i-1)j}}{l^2} \quad \mathbf{2-15}$$

En este método, la diferencia absoluta de la curvatura se calcula a partir de dos parámetros como se observa en 2-16. El primero de ellos es la curvatura de la forma modal de la estructura sin daño $\{V_k''\}$ y el segundo corresponde a la curvatura de la forma modal de la estructura [[2], [58], [59]].

$$DC = \left| V_k'' - V_k^{D''} \right| \quad \mathbf{2-16}$$

Para tener en cuenta el número de modos (n) calculados, se determina el factor de diferencia absoluta de curvatura (FDC), que es una media aritmética de la diferencia de curvatura obtenidos a partir de los datos de la

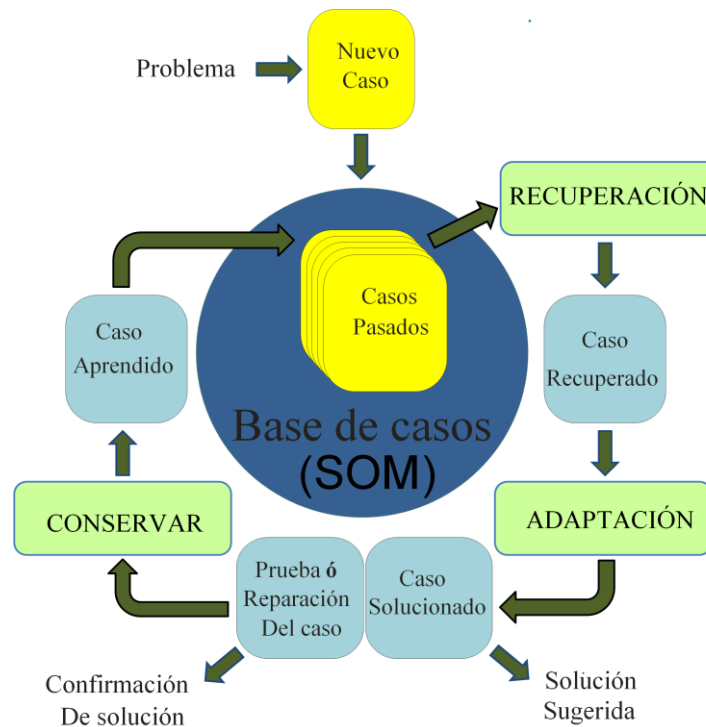
estructura con y sin daño [2]. Esta relación está definida en la ecuación 2-17.

$$FDC = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| V_k^H - V_k^{HD} \right| \quad \mathbf{2-17}$$

2.3 RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS (CBR)

Los sistemas expertos (SE) o comúnmente denominados sistemas basados en conocimiento, son complejos programas computacionales fundamentados en el análisis estadístico o en sistemas de inteligencia artificial (IA), que buscan imitar el comportamiento humano para la resolución de problemas, mediante la reproducción de una base de conocimiento codificada, que contiene información referida a expertos humanos [[60]-[64]]. Según la naturaleza del problema, los sistemas expertos se pueden clasificar en deterministas “ó basados en reglas” y en estocásticos “o basados en el principio de incertidumbre” [[62], [63]].

Este tipo de sistema es un modelo del razonamiento humano. Si se basara en una, específica sus soluciones también lo son [[4], [6]]. En la figura 7, se observa un esquema fundamentado en el razonamiento basado en casos, para de daños su a partir de cambios de masa en la estructura [4].



Fuente: El autor basado en [3].

Figura 7. Metodología basada en y CBR.

El ciclo CBR consiste básicamente en retener casos (escenarios de daño) para utilizarlos en el análisis “diagnóstico” de casos futuros. Los casos retenidos son posteriormente recuperados para ser reutilizados en la solución de un problema dado, a partir de la analogía con casos similares (los recuperados).

Una vez realizado el diagnóstico se revisa si la solución sugerida fue correcta o no, de ser acertada, el sistema almacena el caso respectivo dentro de su librería de casos, de lo contrario el sistema adapta los casos recuperados para brindar la nueva solución y se repite nuevamente el ciclo de revisión.

A continuación, en esta sección se abordarán tópicos referentes a herramientas matemáticas y computacionales utilizadas para implementación del Sistema Experto, sus conceptos básicos y su funcionamiento.

2.3.1 Redes neuronales tipo SOM (Self-organizing maps)

A principio de la década de los 80's, el físico Finlandés Teuvo Kohonen creó una arquitectura de redes neuronales no supervisadas y de aprendizaje competitivo, denominadas mapas auto-organizativos (SOM), basado en el principio biológico del funcionamiento del cerebro humano (Ver anexo A).

Desde entonces, esta herramienta ha tenido gran acogida en diferentes áreas del conocimiento relacionada con la extracción de características, control de calidad, el modelado financiero y económico, la minería de datos, el reconocimiento de voz, procesos de optimización, robótica, procesos de control, aplicaciones médicas y el reconocimiento de imágenes entre muchas otras. Su popularidad se debe a que este tipo de redes neuronales permite reducir la dimensionalidad de los datos de entrada, efectuando su proyección usualmente sobre una malla bidimensional manteniendo propiedades de los mismos [[61], [65]-[74]].

2.3.1.1 Funcionamiento

El funcionamiento de los mapas auto-organizativos de Kohonen se puede dividir en dos procesos fundamentales, uno de entrenamiento o aprendizaje que se realiza off-line y otro de ejecución ó evaluación. La finalidad de este tipo de red, es establecer la similitud entre los rasgos característicos del vector de entrada y los modelo m_i mapeados en la capa de salida (es decir, la correlación entre sus vectores de pesos).

Dicha medida de similitud espacial, está basada usualmente en la distancia euclidiana (d), sin embargo, existen otros tipos de mediciones de similitud como son las distancias de Minkowski, Manhattan, chebychev y Mahalanobis entre otras. La distancia euclidiana puede ser calculada a partir de la ecuación 2-18 [66].

$$c = \|x - m_i\| = \min_i \{\|x - m_i\|\} = \arg \min_i \{\|x - m_i\|\} \quad \mathbf{2-18}$$

Donde, c es el mejor modelo encontrado del mapa bidimensional, el cual corresponde a la distancia mínima entre el vector de entrada x y el vector de pesos (W) de la neurona m_i , ubicada espacialmente en la posición (I, J) . Por tanto, la distancia euclidiana para n número de neuronas de la capa de salida, puede ser expresada como se observa en la ecuación 2-19 [[61], [66]].

$$d(X, m_i) = \sqrt{\sum_{K=1}^n (X_K - m_{ik})^2} = \sqrt{\sum_{K=1}^n (X_K - W_{IJK})^2} \quad \mathbf{2-19}$$

Un aspecto importante del funcionamiento de de las SOM, es la competitividad entre las neuronas (m_i) para activarse ante los datos de entrada. En este proceso, pueden activarse múltiples neuronas, sin embargo, solamente una de ellas será la neurona ganadora (m_c) también conocida como BMU (Best-matching-unit) y su respuesta está influenciada tanto por función de vecindad (h_{ci}), como por su topología en función del tiempo $N_c(t)$.

2.3.1.2 Proceso de entrenamiento

El proceso de aprendizaje de una red neuronal SOM, se puede realizar tanto de modo supervisado, como no supervisado [[66], [75]].

El proceso de entrenamiento no supervisado de la red SOM, está dividido en dos etapas. La primera de ellas, está dedicada a la sintonización u ordenamiento global de los datos mediante la partición del espacio sensorial en el cual se encuentran ubicados. Para ello, se efectúa una clasificación en categorías o clases mediante el uso de diagramas de Varonoi como se observa en la figura 8 [[65], [66]].

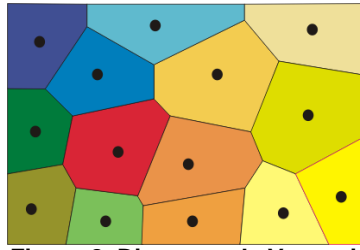


Figura 8. Diagrama de Varonoi.

En este tipo de diagramas, cada una de las regiones tiene asociado un vector de referencia o codebook, el cual está representado por un punto correspondiente al centróide o vecino más cercano a todo el grupo de datos pertenecientes a la misma partición.

La segunda etapa del entrenamiento, está dedicada a efectuar un ajuste fino del mapa generado mediante los diagramas de Varonoi, de tal forma que el codebook modele lo mejor posible los datos de entrada.

Existen varios parámetros asociados al proceso de entrenamiento de la SOM. El primero de ellos está relacionado con la actualización de los pesos sinápticos (W), los cuales pueden ser calculados mediante la ecuación 2-20 [66].

$$m_i(t + 1) = m_i(t) + \alpha * h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)] \quad \therefore i = 1,2,3,\dots,k \quad \mathbf{2-20}$$

Donde, $m_i(t + 1)$ corresponde al valor actualizado del vector W , m_i es el valor inicial de W , t es la variable de tiempo discreto, i corresponde a la ubicación de la neurona, α es el factor de velocidad de aprendizaje de la red y h_{ci} es la función de vecindad predefinida.

En una red SOM, se pueden definir diferentes tipos de h_{ci} como se observan en las ecuaciones 3-21, 3-22, 3-23, 3-24, las cuales corresponden a funciones tipo pulso (burbuja), gaussiana, gaussiana-truncada y ep [[66], [76]].

$$h_{ci} = 1 * (\sigma(t) - \|r_c - r_i\|) \quad \mathbf{2-21}$$

$$h_{ci} = e^{-\frac{\|r_c - r_i\|^2}{2\sigma^2(t)}} \quad \mathbf{2-22}$$

$$h_{ci} = e^{-\frac{\|r_c - r_i\|^2}{2\sigma^2(t)}} * 1 * (\sigma(t) - \|r_c - r_i\|) \quad \mathbf{2-23}$$

$$h_{ci} = \max\{0, 1 - (\sigma(t) - \|r_c - r_i\|)^2\} \quad \mathbf{2-24}$$

Donde, r_c y r_i corresponden a las ubicaciones de la neuronas c e i respectivamente, $\sigma(t)$ es el radio del vecindario o N_c , $\|r_c - r_i\|$ es la distancia entre las neuronas c e i , $\sigma^2(t)$ corresponde a la varianza la cual controla el ancho de la vecindad y $1(x)$ corresponde a una función tipo escalón la cual está definida por la ecuación 2-25.

$$1(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } x \geq 0 \end{cases} \quad \mathbf{2-25}$$

Un segundo parámetro de interés es el factor de velocidad de aprendizaje de la red $\alpha(t)$, el cual decrece monótonicamente entre 1 y 0, con respecto al número de iteraciones del entrenamiento t . Este parámetro puede ser lineal, exponencial o inverso al tiempo como se observa en las ecuaciones 2-26, 2-27 y 2-28 respectivamente [76].

$$\alpha(t) = \alpha_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad \mathbf{2-26}$$

$$\alpha(t) = \alpha_0 \left(\frac{0.005}{\alpha_0}\right)^{\frac{t}{T}} \quad \mathbf{2-27}$$

$$\alpha(t) = \alpha_0 \left(1 + \frac{100t}{T}\right) \quad \mathbf{2-28}$$

Donde, α_0 corresponde al valor inicial de velocidad de aprendizaje ($0 < \alpha_0 < 1$), t es el número de la iteración evaluada y T corresponde al número total de iteraciones.

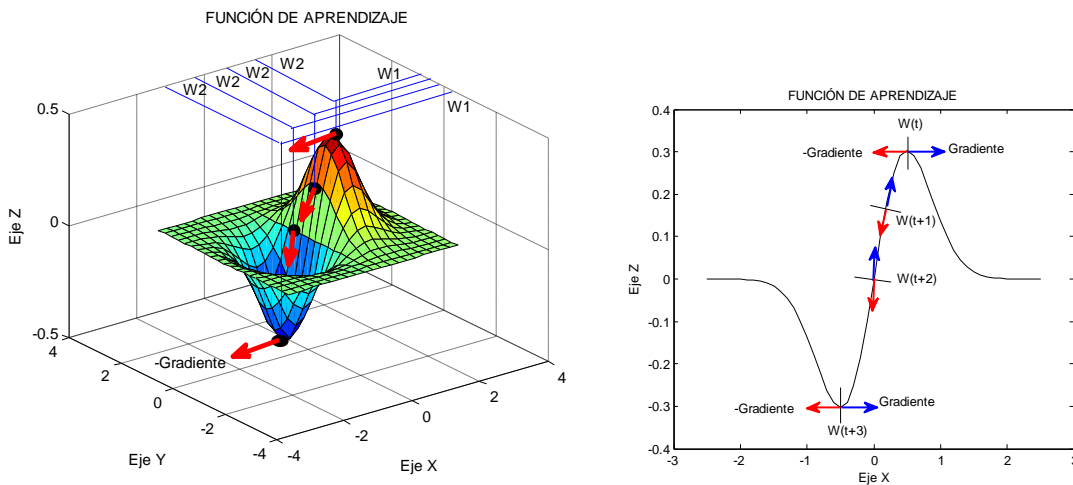


Figura 9. Función de aprendizaje supervisado.

El segundo modo de aprendizaje corresponde al entrenamiento supervisado, el cual se sustenta en procesos de optimización que buscan minimizar el valor de una función E de error (coste u objetivo) propuesta, mediante la configuración de sus pesos sinápticos W , como se observa en la figura 9.

Usualmente el procedimiento de optimización utilizado es el denominado método de descenso por el gradiente, donde la máxima variación de la función $E(W)$, está dada por el valor máximo del gradiente de la función $\nabla E(W)$, por lo tanto, la modificación de los valores de W se realizan en dirección contraria de la función $\nabla E(W)$ con el fin de alcanzar el mínimo local de $E(W)$ mediante procesos iterativos hasta encontrarlo como se observa en la figura 10 [61].

Es decir que las variaciones de W , dependen tanto del valor del gradiente como del tamaño infinitesimal del paso de cada iteración, comúnmente conocido como coeficiente o factor de velocidad de aprendizaje α .

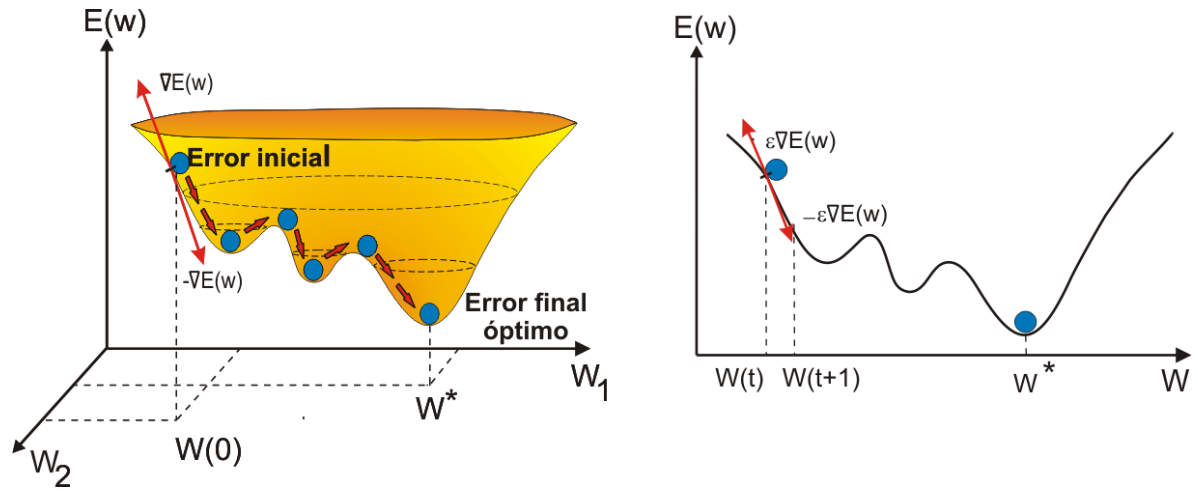


Figura 10. Optimización del error en el modo de entrenamiento supervisado.

2.3.1.3 Medidas de calidad del mapa

Una vez terminada la etapa de entrenamiento de la SOM, es necesario cuantificar la calidad del mapa generado a partir de los datos suministrados a la red. Para ello existen dos tipos de medidas. La primera de ellas, es error de cuantización el cual determina la precisión de las proyecciones del mapa y corresponde a la distancia mínima entre el vector de datos de entrada x y los vectores de referencia más cercanos m_i , como se describe en la ecuación 2-29. Donde, m_c corresponde a la neurona ganadora (BMU) [[61], [65], [66], [76], [77]].

$$d(x, m_c) = \min_i \{(x, m_i)\} = \min_i \{\|x - m_i\|^2\} \quad \mathbf{2-29}$$

Así mismo, durante la etapa de entrenamiento, el proceso de adaptación del mapa está influenciado por la función h_{ci} y la topología de su enmallado, quienes definen la interacción entre los vectores m_i , y m_c en función del

tiempo. Una vez terminado dicho proceso, se establece una medida de distorsión e del mapa a partir de la ecuación 2-30 [[66], [74]]. Donde, L corresponde al grupo de neuronas ubicadas dentro del enmallado de la vecindad de m_c .

$$e = \sum_{i \in L} h_{ci} * d(x, m_i) = \sum_{i \in L} h_{ci} \|x - m_i\|^2 \quad \mathbf{2-30}$$

Esta medida de distorsión también es conocida como el error de cuantización y su expresión se define numéricamente a partir de procesos de optimización estocástica como se observa en la ecuación 2-31. Donde M es el número de neuronas y N es el número de iteraciones del entrenamiento [76].

$$e = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M h_{(BMU(i), j)} \|x_i - m_j\|^2 \quad \mathbf{2-31}$$

A partir de las ecuaciones 2-30 y 2-31 se define la medida de distorsión promedio esperada del mapa generado (E), como se observa en la ecuación 2-32 [[66], [78]]. Donde, $p(x)$ es la probabilidad de la función de densidad del vector x .

$$E = \int e * p(x) dx = \int \sum_{i \in L} h_{ci} \|x - m_i\|^2 * p(x) dx \quad \mathbf{2-32}$$

La segunda medida de calidad está relacionada con la preservación de la topología del mapa. Esta medida es conocida como el error topográfico t_e , cuya expresión se observa ecuación 2-33. Así mismo, la mejor preservación de la topología de la SOM ocurre con el menor t_e , es decir, cuando los vectores de la primera y segunda BMU no son adyacentes [[78], [79]].

$$t_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u(\vec{x}_i), \quad u(\vec{x}_i) = \begin{cases} 1, & \text{si el 1}^{\text{er}} \text{ y } 2^{\text{do}} \text{ BMU no son adyacentes} \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad \mathbf{2-33}$$

Donde, N es el número de vectores de datos y $u(\vec{x}_i)$ corresponde a una función dependiente de las ubicaciones de la primera y segunda BMU [[80], [81]].

2.3.2 Transformada Wavelet

Usualmente, en el análisis de señales es utilizada la transformada de Fourier (FFT), sin embargo esta teoría es aplicable a señales de tipo estacionario [82]. Por lo tanto, para una señal no estacionaria, al efectuar la transformación del dominio del tiempo a la frecuencia, se pierde información referente al tiempo en que ocurre un evento específico o el instante en que está presente una frecuencia determinada [[83]-[85]]. Esta desventaja fue minimizada por Denis Gabor, quien propuso analizar la señal por secciones, mediante pequeñas ventanas temporales con un ancho de tiempo predefinido [83]. Esta mejora de la transformada de Fourier es conocida como STFT (Transformada de Fourier de tiempo corto) y su precisión está limitada por el tamaño de la ventana seleccionada [[82], [83]].

En consecuencia, para superar las limitaciones de tiempo-frecuencia de la STFT, surge la transformada de Wavelet (TW). Esta transformada permite efectuar un mapeo con capacidad de intercambiar resolución de tiempo por resolución de frecuencia y viceversa, mediante el uso de ventanas con regiones de tamaño variables [[82], [83]].

En contraste con la FFT, la cual utiliza un único conjunto de funciones base (Senos y cosenos), la TW utiliza diferentes familias de funciones base (denominadas Wavelet madre) para efectuar el análisis de una señal dada $x(t)$ [82]. Así mismo, la descomposición de la señal se efectúa a partir de las funciones denominadas Wavelets, que corresponden a prototipos escalados y trasladados en el tiempo de la wavelet madre " $\Psi(t)$ ", como se observa en la figura 11.

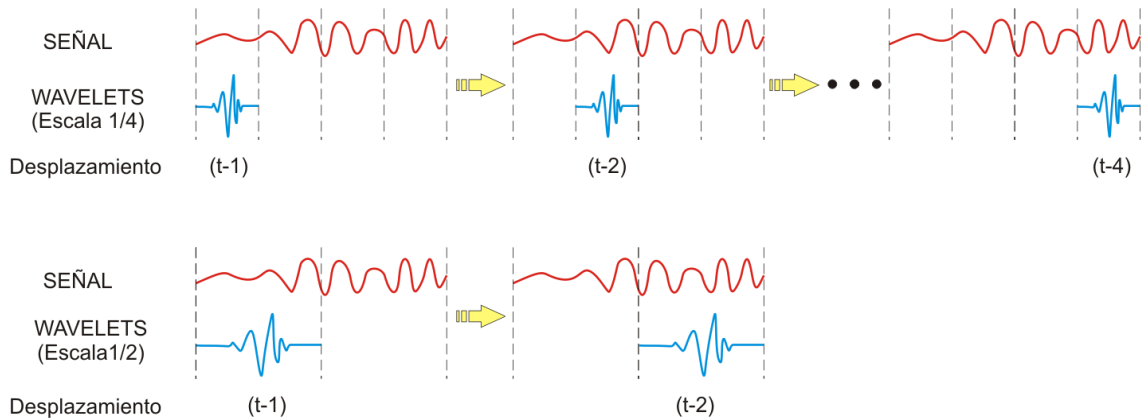


Figura 11. Parámetros de dilatación y retardo en el tiempo de la TW.

El resultado de la TW, son los denominados coeficientes wavelets, organizados por niveles de descomposición en coeficientes de aproximación (CA) “de baja frecuencia o alta escala” y coeficientes de detalle (CD) “de alta frecuencia o baja escala”. Su representación se realiza en un plano denominado tiempo-escala de acuerdo al nivel de descomposición, como se observa en la figura 12.

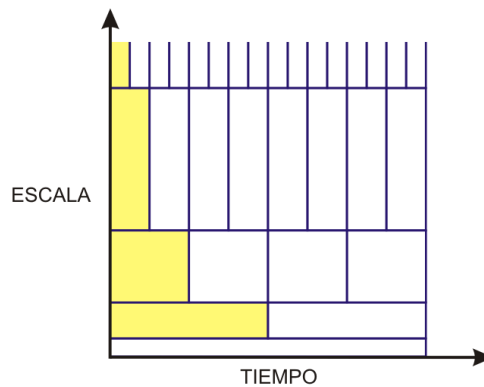


Figura 12. Plano escala-tiempo.

Por otra parte, de forma análoga a la FFT, la TW está definida tanto para el tiempo continuo (CTW) como para el discreto (DTW) [[86], [87]].

La transformada de wavelet continua está definida por la expresión 2-34 [[83], [86]-[88]].

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi * \left(\frac{t-u}{2^j} \right) dt \quad \mathbf{2-34}$$

Donde s y u son los parámetros de escala y traslación respectivamente y $Wf(u, s)$ son los coeficientes de $f(t)$ en el espacio de funciones definido por la función denominada wavelet madre $\Psi(t)$ o función de enventanado, la cual se denota en la ecuación 2-35 [[86], [87]].

$$\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi \left(\frac{t-u}{s} \right) , \text{ donde } s \neq 0 \quad \mathbf{2-35}$$

Existen tres transformaciones básicas las cuales son utilizadas para efectuar el cálculo de la transformada de wavelet [83]:

- La traslación definida por la expresión: $\Psi(t - u)$
- El cambio de escala denotada como: $\frac{1}{\sqrt{s}} \Psi \left(\frac{t}{s} \right)$
- La traslación y cambio de escala definido por: $\frac{1}{\sqrt{s}} \Psi \left(\frac{t-u}{s} \right)$

La DTW o wavelet diádica [[86], [87], [89]], está definida por la ecuación 2-36 y 2-37, a partir de la discretización del parámetro de escala s en secuencias diádicas ($\{2^j, j \in \mathbb{Z}\}$) para simplificar su cálculo computacional a partir del uso de bancos de filtros pasa bajos (PB) y pasa altos (PB) dispuestos en cascada y un submuestreo por un factor de 2 [86], como se observa en la figura 13.

$$Wf(u, 2^j) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{2^j}} \Psi \left(\frac{t-u}{2^j} \right) dt * \overline{\Psi}_{2^j}(u) \quad \mathbf{2-36}$$

$$\overline{\Psi}_{2^j}(t) = \Psi_{2^j}(-t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \Psi \left(\frac{-t}{2^j} \right) \quad \mathbf{2-37}$$

Cada banco de filtros [[86], [89]], calcula los coeficientes wavelet ortogonales para cada nivel de descomposición, los cuales no poseen información redundante y representan a la señal analizada de una forma univoca. Así mismo, a partir de los coeficientes wavelet se puede obtener la señal original mediante la transformada inversa de wavelet (IDTW).

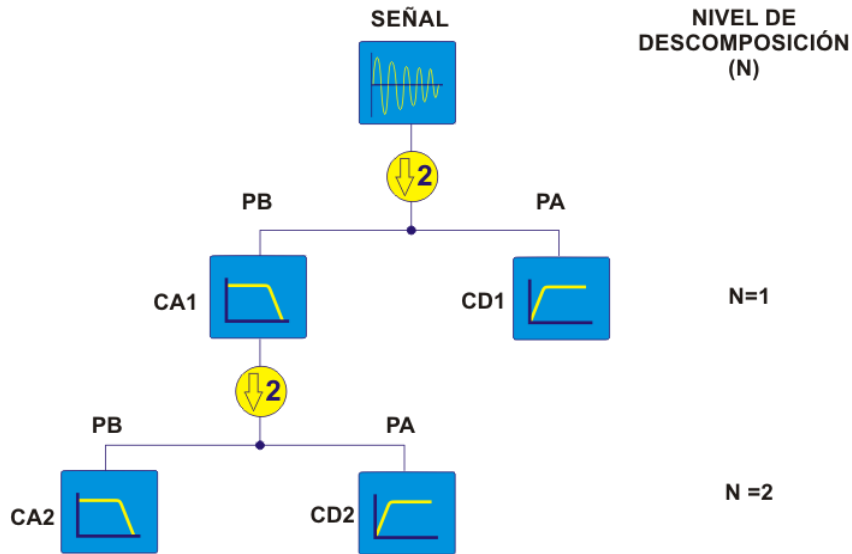


Figura 13. Descomposición wavelet discreta.

El uso de la DTW, se ha popularizado en gran medida en áreas del conocimiento relacionadas con el procesamiento de señales, debido a su versatilidad de uso. Sus aplicaciones van desde el análisis de señales de tipo biológico, el procesamiento de voz, las comunicaciones, el análisis estructural hasta el procesamiento de imágenes entre otras [[4], [6], [12], [13], [83]-[85], [88], [89]].

2.3.3 Correlación

La correlación es una medida de similitud entre dos señales $x(t)$ y $y(t)$ [[89], [90], [91]]. Esta operación es similar a la convolución (exceptuando el proceso de reflexión) y está definida por las ecuaciones 2-37, 2-38 y 2-39 [90].

$$r_{xx}(t) = x(t) ** x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\lambda)x(\lambda - t)d \lambda \quad \mathbf{2-37}$$

$$r_{xy}(t) = x(t) ** y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\lambda)y(\lambda - t)d \lambda \quad \mathbf{2-38}$$

$$r_{yx}(t) = y(t) ** x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\lambda)x(\lambda - t)d \lambda \quad \mathbf{2-39}$$

Donde: t es la variable de retraso, $r_{xx}(t)$ corresponde a correlación entre dos señales iguales o auto correlación y r_{xy} ó r_{yx} corresponden a la correlación entre dos señales diferentes o correlación cruzada [[90], [92]-[94]].

Esta operación matemática también está definida para señales de tipo discreto y su medida de similitud es usualmente utilizada en aplicaciones de comunicaciones digitales, geología, radar, sonar entre otras. En consecuencia, la correlación cruzada de dos secuencias $x(n)$ y $y(n)$ está definida por la ecuación 2-40, 2-41, 2-42 [92].

$$r_{xx}(l) = x(l) ** x(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)x(n - l) \quad \mathbf{2-40}$$

$$r_{xy}(l) = x(l) ** y(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n - l) \quad \mathbf{2-41}$$

$$r_{yx}(l) = y(l) ** x(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n)x(n - l) \quad \mathbf{2-42}$$

Donde: $l = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

2.3.4 Principio de operación del sistema de monitorización

La investigación realizada se baso en la siguiente hipótesis: “La interacción de ondas de vibración con cambios estructurales del material, modifican los modos vibración característicos de la estructura”. Por tanto, los cambios en

las frecuencias de los modos de vibración de la estructura permiten detectar cambios en la geometría de la misma. Esto último, fundamentado en los conceptos abordados en las secciones 2.1, 2.2 y 2.3

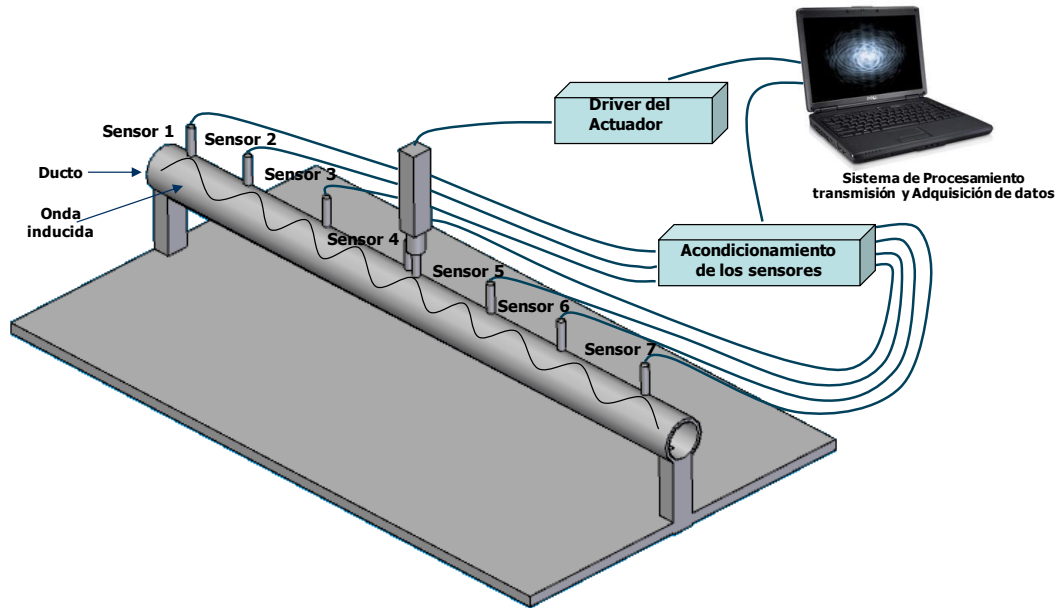


Figura 14. Esquema del principio de funcionamiento para un prototipo experimental.

El esquema general de funcionamiento del sistema, está basado en la inducción de una onda de tipo mecánica en la estructura mediante un actuador, para posteriormente sensar la onda propagada en puntos específicos de la misma, tanto en condiciones nominales como de falla. Posteriormente las señales propagadas son adquiridas y procesadas para su posterior análisis mediante el sistema experto en el PC como se observa en la figura 14, el cual se explica de forma detallada en el capítulo 4.

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, la monitorización de la salud estructural se ha convertido en una prioridad tanto para el sector industrial, como el académico. Sus aplicaciones van desde estructuras, civiles y aeroespaciales, hasta la evaluación de tuberías, utilizadas para el transporte y distribución de fluidos de la industria petroquímica.

A continuación se presentan algunas investigaciones realizada a nivel mundial, relacionadas con la detección de anomalías de tipo estructural. Posteriormente se presenta una metodología de detección de daño basada en el análisis de vibraciones.

3.1 APLICACIONES

Una inspección exhaustiva de los ductos mediante herramientas diseñadas para tal fin, permite prever contingencias inesperadas y en consecuencia evitar accidentes [1], que generarían pérdidas cuantiosas para la empresa operadora, por reparación e inoperatividad de su red de transporte. Usualmente dicha inspección es realizada en línea mediante herramientas conocidas en el medio como “intelligent pigs” [[15]-[22]] y “geopigs” [[15], [23]-[29]]. Su inspección es punto a punto con un alto grado de fiabilidad, sin embargo, debido a sus elevados costos y restricciones de uso, las empresas del ramo han optado por apoyar investigaciones en convenio con universidades sobre el desarrollo de herramientas alternativas de evaluación. Tal es el caso del “Feeler pig” (ver figura 15) desarrollado por PETROBRAS y la Universidad Católica de Rio de Janeiro [30].



Fuente: Tomado de [30]

Figura 15. Feeler pig

Pese a la eficiencia de los "intelligent pigs", desde mediados del siglo XX, se han buscado nuevas metodologías que permitan detectar los defectos que comúnmente se presentan en los sistemas de tuberías, para no depender exclusivamente del uso de pigs. Como resultado de lo anteriormente expuesto, en la actualidad se cuentan con algunos sistemas de evaluación fiables, económicos y que permiten detectar determinados problemas que preocupan a la industria petroquímica, tales como pérdida de masa de sus tuberías [5], deformaciones geométricas [25] y corrosión [23] entre otros.

Una de las alternativas que ha sido ampliamente documentada desde su primera publicación en 1969 hasta la fecha, es la técnica conocida como VBDI (Vibration-Based Damage Identification) [6]. Ésta se basa en el principio de excitación del material a evaluar, mediante ondas de tipo acústico [[5], [7], [8]], mecánico [[4], [6], [9]-[13]] ó ultrasónico [[5], [14], [18]]. El posterior análisis de propagación de la onda inducida permite realizar la identificación de defectos en el material o estructura evaluada. Este principio ha sido aplicado en investigaciones en países como China [7], Corea del Sur [14], España [[6], [9], [11]-[13]], Estados Unidos [28] y Japón [14] demostrando así su fiabilidad.

Por otra parte, el uso de herramientas de simulación basadas en métodos numéricos se ha incrementado de forma notoria, debido a su alto nivel de confiabilidad y exactitud en el análisis detallado e integrado de las redes de transporte, aumentando así sus niveles de seguridad y eficiencia. Estas técnicas están siendo aplicadas con éxito en múltiples problemas de tipo industrial relacionados con redes de transporte de productos químicos, gas, petróleo y energía [1]. En la actualidad, el modelado por el Método de Elementos Finitos (FEM) [[1], [5], [25], [27], [31]-[36]], ha sido utilizado en investigaciones relacionadas con el análisis de tuberías. Universidades como Sun Yat-Sen University de Taiwan [5] y University of Alberta de Canadá [[25], [27]], han realizado diversos estudios acerca del tema, con excelentes resultados. Adicionalmente, empresas dedicadas a la evaluación de ductos mediante “intelligent pig”, utilizan métodos numéricos para el análisis de los datos obtenidos por sus herramientas de inspección en línea. En consecuencia, se ha incrementado el uso de programas especializados como ANSYS [[1], [14], [23], [33]-[35]] y ABACUS [[31], [32]] en el modelado de los sistemas de transporte. Sin embargo, algunas empresas han optado por desarrollar sus propias aplicaciones para el análisis de sus datos como es el caso de la empresa mexicana PEMEX y su sistema de información geográfico (GIS) [29].

Igualmente existen técnicas de procesamiento de señales implementables que permiten realizar el análisis detallado de los datos de una forma rápida, económica y segura. Una de ellas se basa en la transformada de Wavelet [[4], [9], [11], [23], [37], [38]]. Su grado de confiabilidad han sido comprobado por estudios de investigación realizados en países como China [37] y España por las universidades de Shenyang University of Technology y Universitat de Girona [[4], [9], [11]], respectivamente.

Para la clasificación de las averías detectadas, se han aplicado técnicas de inteligencia artificial como son las redes neuronales [[4], [9], [11]-[13], [39], [40]] y la lógica difusa, usando bases de datos obtenidas a partir de evaluaciones previas. Estas técnicas, han sido evaluadas en la detección de averías tales como: craking cambios de masa y corrosión, en investigaciones realizadas por universidades como Universiti Sains Malaysia [39], Universitat de Girona [[4], [9], [11], [13]] y la COPPE/UFRJ-Federal University of Rio de Janeiro en asociación con PETROBRAS [40], obteniendo excelentes resultados en dicho proceso.

Sin embargo, las técnicas mencionadas se aplican de forma individual, para resolver algunos problemas de interés por parte de los grupos de investigación, principalmente en temas como la detección de corrosión, cracking y cambio de masa. Pese a la información disponible, no se han observado en la literatura consultada, estudios basados en vibración aplicados a la detección de los cambios de deformación en las tuberías de gas. En consecuencia, se busca aplicar las técnicas mencionadas para dar solución a un problema existente en algunos tramos localizados de las empresas colombianas.

El punto de partida establecido para la ejecución de la investigación se fundamenta en un trabajo previo (Tesis doctoral), realizado en la universidad de Girona (España), el cual formó parte del proyecto Europeo denominado PIEZODIAGNOSTIC [6]. El objetivo principal de dicho proyecto fue desarrollar un prototipo de monitorización para la detección de procesos de degradación estructural en instalaciones industriales (corrosión), basado en vibraciones. En consecuencia, se desarrolló una metodología para la detección y evaluación de cambios de masa, con excelentes resultados comprobando así tanto la efectividad de la técnica de detección de averías basada en el análisis de vibraciones, como el uso de herramientas

matemáticas y computacionales en procesos de clasificación (redes neuronales y razonamiento basado en casos) y caracterización (Transformada de wavelet) de anomalías de tipo estructural.

El problema a resolver con el presente proyecto, es la detección de cambios en el estado de deformación de la tubería de gas usando la técnica de detección de daños basada en vibraciones mecánicas. La técnica consiste en introducir una señal predefinida, mediante el uso de un excitador mecánico en un punto determinado la tubería y sensar la onda propagada a lo largo de la misma a través de sensores piezoeléctricos. Las señales sensadas serán caracterizadas usando la transformada de Wavelet. La información extraída de las señales se usará para comparar el estado actual de la tubería, con casos previamente almacenados. La forma de comparación estará fundamentada en el principio de Razonamiento Basado en Casos (CBR) usando técnicas de “*soft computing*” tales como las redes neuronales. A partir de dicho razonamiento, se inferirá sobre puntos o zonas de la tubería inspeccionada que han sufrido deformaciones sustanciales.

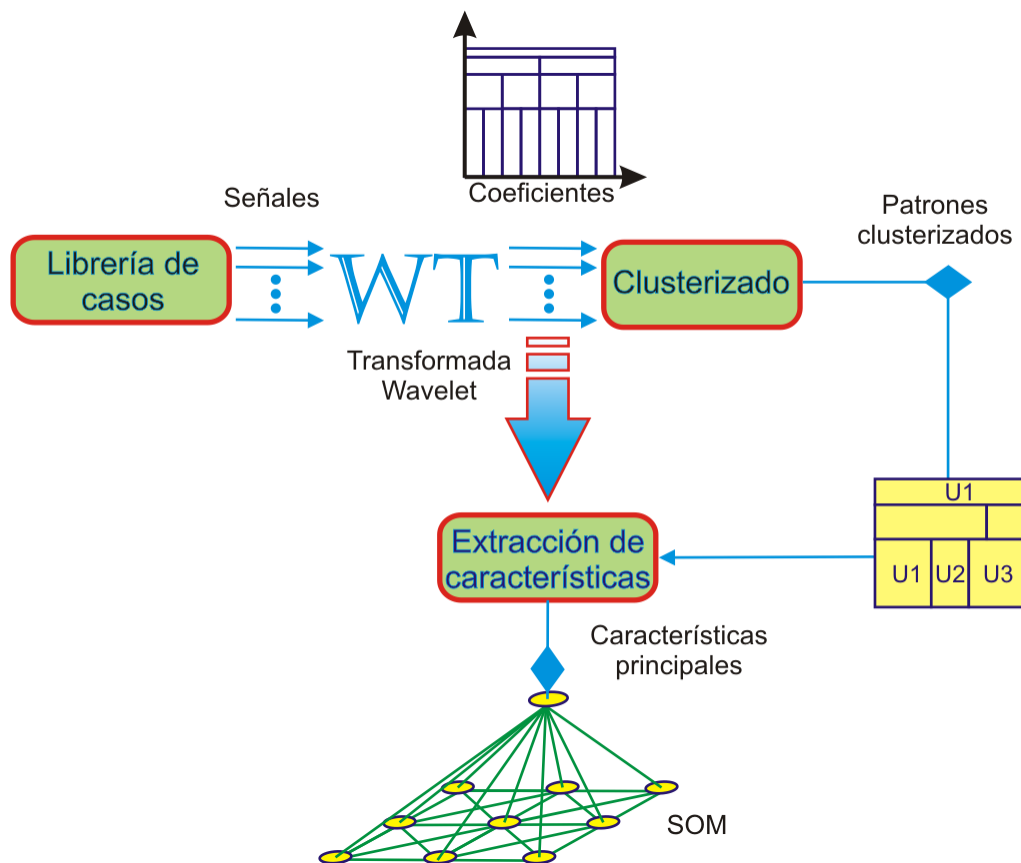
La metodología a implementar será pionera no sólo en Colombia sino a nivel internacional, dado que sólo en países como España, Francia, China, Estonia y Canadá han utilizado la técnica mencionada para detectar fallas estructurales tales como deformaciones o averías, con excelentes resultados, pero ninguno la ha utilizado para detectar cambios en la deformación de tuberías.

3.2. METODOLOGÍA DE REFERENCIA

En la actualidad existen sistemas expertos implementados a partir del razonamiento basado en casos, para la evaluación de la salud estructural en áreas de la ingeniería civil, mecánica y aeroespacial entre otras [[3], [4], [12]].

El punto de referencia para investigación realizada, fue la metodología (observada en la figura 7), diseñada, implementada y validada para la detección de cambios de masa en estructuras civiles y aeroespaciales [3], resumidas en las figuras 7 y 16. Dicha metodología se adaptó e implementó a nivel de software, para la monitorización de deformaciones de tipo geométrico en tuberías como se describe en el capítulo 5.

El sistema experto consta de dos (2) modos de funcionamiento, denominados: aprendizaje y validación



Fuente: El autor basado en [3].

Figura 16. Detección de cambios de masa a partir de CBR.

En el modo de aprendizaje se utilizó un modelo de la estructura para simular la respuesta dinámica a partir de daños “variaciones de masa” en diferentes puntos de dicho modelo, generando así la librería de casos.

Posteriormente, las señales obtenidas en cada punto de sensado son procesadas inicialmente con la transformada wavelet. Los coeficientes resultantes de dicha transformación son clusterizados a partir del teorema del límite central.

Cada patrón de clusterización contiene la información relevante de cada una de las señales procesadas. Luego, se extraen características de cada uno de los coeficientes clusterizados, a partir de la raíz cuadrada de la energía wavelet.

Una vez terminada la extracción de características, la información es clasificada a partir del uso de las redes SOM “una por cada sensor”, compuestas por n neuronas de entradas “una por cada patrón característico”. Finalmente, la base de casos es construida a partir de la información resultante del proceso de aprendizaje de las redes neuronales y de la información correspondiente a elementos dañados y su severidad.

El modo de operación, está compuesto por dos etapas, aplicadas a la respuestas dinámicas del caso de análisis, cuyas señales han sido previamente capturadas y procesada hasta obtener sus características principales como se observa en la figura 16.

La primera etapa, está directamente relacionada con la recuperación de características de casos similares a las del caso analizado y su información referente a elementos averiados y la severidad del mismo. Donde la menor

distancia euclidiana corresponde al caso almacenado con mayor grado de similitud al nuevo caso.

La segunda etapa es la de adaptación, donde a partir de la información recuperada se selecciona tanto los sensores como el número de casos utilizados para la estimación de la localización del daño estructural. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, los elementos averiados correspondientes al mayor número de repeticiones, tiene la mayor probabilidad de ser el caso ganador “de mayor similitud al caso analizado”. Dicha probabilidad es calculada para cada elemento averiado, a partir de un factor que corresponde a la suma de los inversos de las distancias euclidianas respectivas a cada uno de los casos recuperados.

Posteriormente, con base en la información de distancia euclidiana, dimensión y daño perteneciente a los casos recuperados, se efectúa el diagnóstico en cuanto a ubicación y severidad del daño correspondiente al caso de análisis.

Finalmente, la metodología contempla la posibilidad de retener la información correspondiente al diagnóstico del sistema experto, a partir de la comparación de la información del daño real y el detectado.

4. MODELADO DE LA TUBERÍA

La metodología utilizada en la etapa correspondiente al modelado matemático de la estructura, está dividida en tres secciones. Las dos primeras, están dedicadas a la implementación de dicho modelado y la última, a la validación del código de generación de las matrices M y K de la estructura seleccionada.

En primera instancia se efectuó el proceso de modelado de la tubería, con base en el método de elementos finitos, teniendo en cuenta las restricciones preestablecidas por la configuración de apoyos considerada (Apoyo simple).

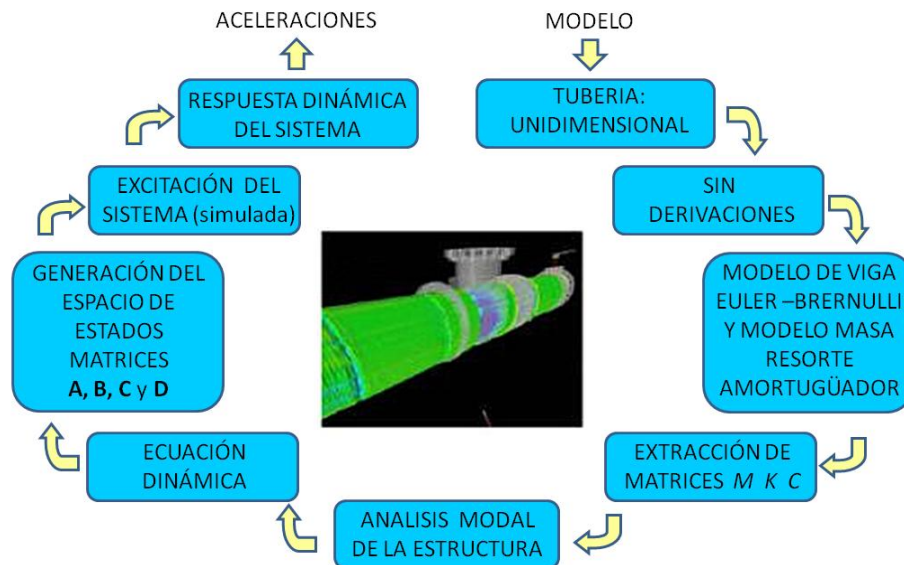


Figura 17. Descripción metodológica de la etapa de modelado.

Posteriormente, se llevo a cabo la sección correspondiente al análisis dinámico del modelo seleccionado, a partir del espacio de estados. Esto último teniendo en cuenta las consideraciones de la figura 17, las cuales

permitieron simular las señales de aceleración en cada uno de los elementos pertenecientes a la estructura analizada.

Finalmente, en la sección de validación se justificó de forma experimental, la validez de la hipótesis planteada como punto de referencia para la investigación trazada “la interacción de las ondas de vibración con cambios estructurales del material, modifican los modos de vibración característicos de la estructura”.

A continuación se describe de forma detallada cada una de las secciones anteriormente mencionadas.

4.1 MODELO EN ELEMENTOS FINITOS

La construcción del modelo de la tubería mediante elementos finito, se realizó con el fin de extraer las matrices M (masa), K (Rigidez) y C (Amortiguamiento), las cuales son punto de partida para el análisis de la estructura, mediante su ecuación dinámica como se explico en el capítulo 1. Adicionalmente, se estableció como punto de partida trabajar con el modelo simplificado, teniendo en cuenta la teoría clásica de vigas “Euler-Bernulli”, aplicada a una tubería unidimensional, sin derivaciones dispuesta en configuración de apoyo simple, con las características observadas en la tabla 4, calculadas con base en la información de tabla 1.

Teniendo en cuenta lo anterior, las simulaciones de los daños para el modelo considerado, se generaron a partir de variaciones en la rigidez de los elementos afectados. Esto último teniendo como punto de referencia las ecuaciones correspondientes tanto a la dinámica de la estructura, como a la variación de la curvatura de las formas modales ocasionada por la presencia de daños y su correspondiente efecto sobre la frecuencia modal.

Tabla 4. Características de la estructura simulada.

Nombre del parámetro	Símbolo	Unidades
Número de elementos	E	Elemento
Módulo de Young	E	N/m^2
Longitud	L	m
Coefficiente de poisson	V	Adimensional
Área transversal	A	m^2
Inercia	I	m^4
Densidad	ρ	kg/m^3

Partiendo de la ecuación 4-1, la cual corresponde a la ecuación dinámica de la estructura en la transformada de laplace, se puede verificar la relación existente entre la rigidez y la frecuencia (ω_n) de los modos de vibración de la estructura, como se indica en la ecuación 4-2.

$$MS^2X(S) + CSX(S) + KX(S) = BF(S) \quad \mathbf{4-1}$$

$$\frac{F(S)}{X(S)} = \frac{\frac{1}{M}}{S^2 + \frac{C}{M}S + \frac{K}{M}} \quad \mathbf{4-2}$$

Donde: $\omega_n^2 = KM^{-1}$.

De forma similar, retomando la ecuación 1-5, se puede observar en la ecuación 4-3, que la matriz de rigidez, depende tanto de la longitud del elemento (L) “que es un parámetro constante”, como del módulo de elasticidad (E) y la inercia (I) del elemento “que son variables”.

$$k_{\text{elemento}} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{4-3}$$

Adicionalmente, teniendo como referencia la ecuación 2-14, se puede concluir que la variación de E o I, afectan la curvatura de las formas modales (v'') de la estructura, como se observa en la ecuación 4-4. En otras palabras, tanto la amplitud de los vectores propios “formas modales” del sistema, como los valores propios “frecuencias” en los cuales se presentan los modos de vibración, son alterados mediante las variaciones mencionadas.

$$v'' = \frac{M}{EI} \quad \mathbf{4-4}$$

En consecuencia, a partir de las verificaciones referidas anteriormente, la variación de rigidez “que es un efecto de la variación geométrica”, puede ser simulada mediante la alteración de una de las variables mencionadas “I o E”.

Finalmente, teniendo en cuenta lo anteriormente citado, los diferentes escenarios de daño son recreados a partir del método de elementos finitos y las ecuaciones de la sección 1.1, obteniendo así, las matrices M , K y C del sistema, las cuales permiten efectuar el análisis dinámico de la tubería bajo condiciones nominales y de avería según sea el caso.

4.2 MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS

En esta sección, se referencia las ecuaciones de estado y su correspondiente diagrama en bloques de simulink, utilizados para la simulación de la respuesta dinámica del modelo de tubería.

4.2.1 Representación en espacio de estados del modelo

El comportamiento dinámico se simuló a partir de la representación del sistema mediante las ecuaciones de estado, definidas por las expresiones 4-5 y 4-6, correspondientes a la figura 18.

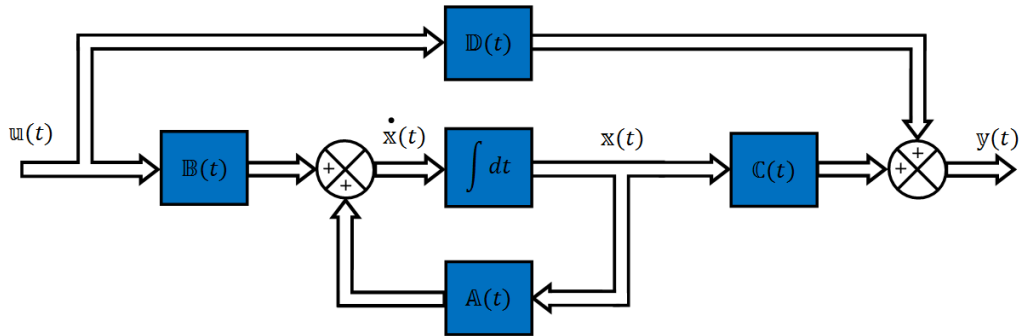


Figura 18. Diagrama en bloques para la representación de un sistema en el espacio de estados.

Donde, " x " es el vector de estado, " \dot{x} " corresponde a la derivada del vector de estado con respecto al tiempo, " y " representa el vector de salida, " u " simboliza el vector de entradas, " A " es la matriz de estado o transición del sistema, " B " representa la matriz de entrada, " C " simboliza la matriz de salida y " D " corresponde a la matriz de transmisión directa ó pre-alimentación.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \mathbf{4-5}$$

$$y = Cx + Du \quad \mathbf{4-6}$$

Por otra parte, teniendo como punto de referencia, que la ecuación dinámica del sistema es de segundo orden " $M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = BF(t)$ " y que el grado de dicha ecuación indica tanto el número de integradores presentes en sistema, como la cantidad de variables a definir para efectuar la representación del modelo matemático en el espacio de estados, se

estipularon dos variables de estado " $x_1(t) = x(t)$ " y " $x_2(t) = \dot{x}(t)$ ". En consecuencia, se obtuvieron las ecuaciones de estado del sistema 4-7 y 4-8.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad \mathbf{4-7}$$

$$\dot{x}_2 = -M^{-1}K x_1 - M^{-1}C x_2 + M^{-1}BF(t) \quad \mathbf{4-8}$$

Ahora bien, reescribiendo las expresiones definidas anteriormente en términos de vectores y matrices involucrados en la expresión 1-2, el sistema de ecuaciones queda descrito mediante la expresión 4-9.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{4-9}$$

Posteriormente, se extrapolan las matrices \mathbb{A} y \mathbb{B} del sistema por analogía entre las ecuación 2-5 y 2-9, en función de las fuerzas aplicadas como se indica en 4-10 y 4-11.

$$\mathbb{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad \mathbf{4-10}$$

$$\mathbb{B} = M^{-1} \quad \mathbf{4-11}$$

De forma similar a las ecuaciones de estado del sistema, se define la variable de salida " $y(t) = \ddot{X}(t)$ " correspondiente a las aceleraciones en los diferentes puntos de la estructura. Adicionalmente, teniendo en cuenta la variable de estado " $x_2(t)$ " previamente definida, junto con las ecuaciones 4-10 y 4-11, se obtiene la ecuación 4-12 que corresponde a la salida del sistema. Por lo tanto, utilizando la analogía con la ecuación 4-6, se obtienen las matrices \mathbb{C} y \mathbb{D} observadas en las expresiones matemáticas 4-13 y 4-14

$$y(t) = \ddot{X}(t) = \dot{x}_2(t) = [-M^{-1}K - M^{-1}C] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + M^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{4-12}$$

$$C = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C] \quad \mathbf{4-13}$$

$$D = [M^{-1}] \quad \mathbf{4-14}$$

Asumiendo que la matriz de prealimentación “ D ” es igual a cero, la representación en espacio de estados del modelo matemático del sistema en términos de giros “ ϕ ”, desplazamientos “ x ” y fuerzas aplicadas “ $f(t)$ ”, “ $f_2(t)$ ”, queda descrita por las ecuaciones 4-15 y 4-16.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{4-15}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad \mathbf{4-16}$$

4.2.2 Simulación de señales a partir de la representación en espacio de estados

Como se mencionó en la sección 1.3.4, la detección de daños basada en el análisis de vibraciones, se fundamenta en la excitación del sistema mediante una señal inducida y el estudio correspondiente de su respuesta dinámica “señales propagadas. Por lo tanto, ambos tipos de señales pueden ser obtenidos a partir de métodos experimentales o numéricos. Sin embargo, la investigación trazada se realizó con base en el último método mencionado.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores y la ecuación dinámica del sistema en variables de estado de las ecuaciones 4-15 y 4-16, se implemento el modelo matemático correspondiente en diagramas de

bloques, utilizando la herramienta “Simulink” de Matlab, como se observa en la figura 19.

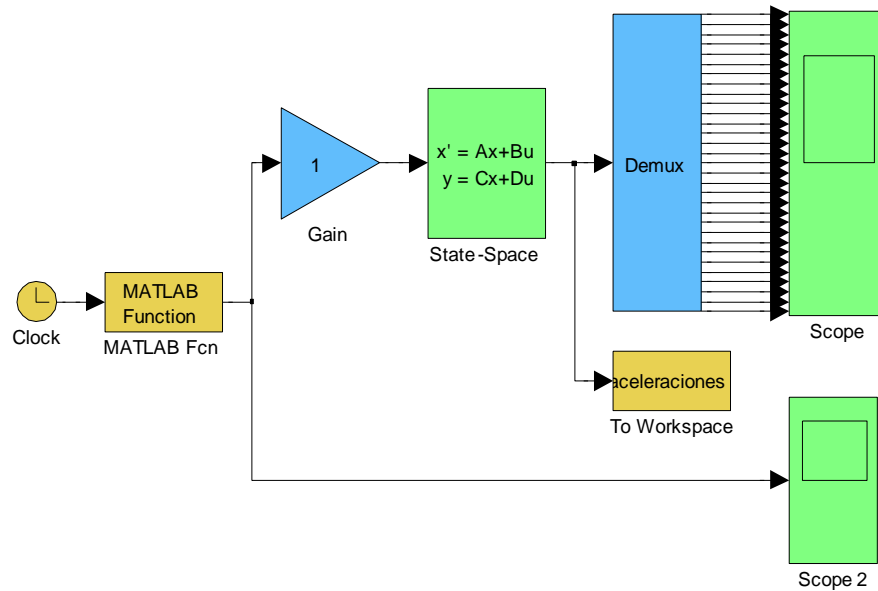


Figura 19. Diagrama para la generación de señales basado en el espacio de estados.

En otras palabras, el esquema utilizado, permitió simular y extraer la información referente a las señales propagadas en cada uno de los elementos de la estructura, partiendo de una señal de excitación predefinida e inducida en el sistema.

Por lo tanto, un aspecto relevante en el proceso de simulación, es la generación de la señal de excitación, la cual fue recreada a partir de la ecuación 4-17 [3], que corresponde a la señal senoidal enventanada (como se observa en la figura 20), diseñada para excitar los modo de vibración de la estructura.

$$Exc(t) = n * \arcsin \left(\sin \left(\frac{1}{n} 2\pi ft \right) \right) \sin (2\pi ft) \quad \mathbf{4-17}$$

Donde, n son los medios ciclos de la señal senoidal y f es la frecuencia de excitación.

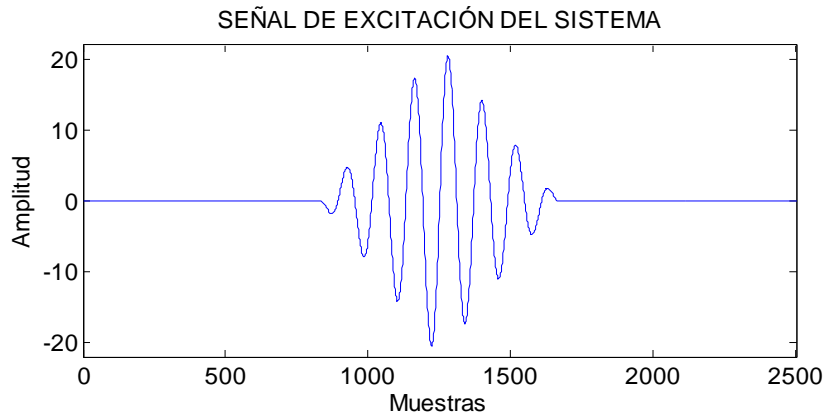


Figura 20. Señal de excitación.

4.3 VALIDACIÓN DEL CÓDIGO EMPLEADO PARA LA GENERACIÓN DE LAS MATRICES M Y K DEL MODELO.

El proceso de simulación del modelo estructural utilizado para la generación de los diferentes escenarios de daño “bajo condiciones nominales y de falla”, se basó inicialmente en el uso del software ANSYS MULTIPHYSICS V.10, el cual permitió realizar el análisis del comportamiento modal de una estructura seleccionada a partir de la implementación del respectivo modelo mediante el método de elementos finitos y bajo las diferentes condiciones de apoyo mencionados en el capítulo 1 y en el ANEXO A.

El primer paso en el procedimiento de validación para el modelo implementado en ANSYS, fue simular diferentes escenarios de daño, variando la rigidez de elementos específicos “predefinidos”, ubicados en diversas posiciones y afectados con distintos porcentajes de daño. Este tipo de pruebas preliminares, se efectuó con el fin de observar el efecto de averías de tipo estructural “variación de rigidez”, sobre el valor de las frecuencias en los cuales se presentan cada uno de los modos de vibración. Para ello, se realizaron las simulaciones a partir de una estructura conocida, utilizada en investigaciones previas [2] y con las características que se observan en la tabla 5.

Tabla 5. Características de la estructura tipo viga.

NOMBRE DEL PARÁMETRO	VALOR NUMÉRICO
Número de elementos	32
E	199.95E+09 [N/m^2]
L	2.44 [m]
V	0.3
A	0.00304 [m^2]
I	4.29E-05 [m^4]
ρ	7837.1 [Kg/m^3]

En consecuencia, a partir de las simulaciones de estructuras y escenarios de daños recreados “referenciados en el anexo B”, se corrobora de forma experimental la hipótesis planteada inicialmente “La interacción de ondas de vibración con cambios estructurales del material, modifican los modos vibración característicos de la estructura”.

Un ejemplo de dicha suposición, se observa en la figura 21, donde E0 corresponde al valor de frecuencia bajo condiciones nominales “Sin daño” para una viga en apoyo simple con las características de la tabla 5. De igual manera, (E1-E32) está relacionado con cada uno los elementos averiados “reducidos en un 10% de rigidez nominal” y su correspondiente valor de frecuencia.

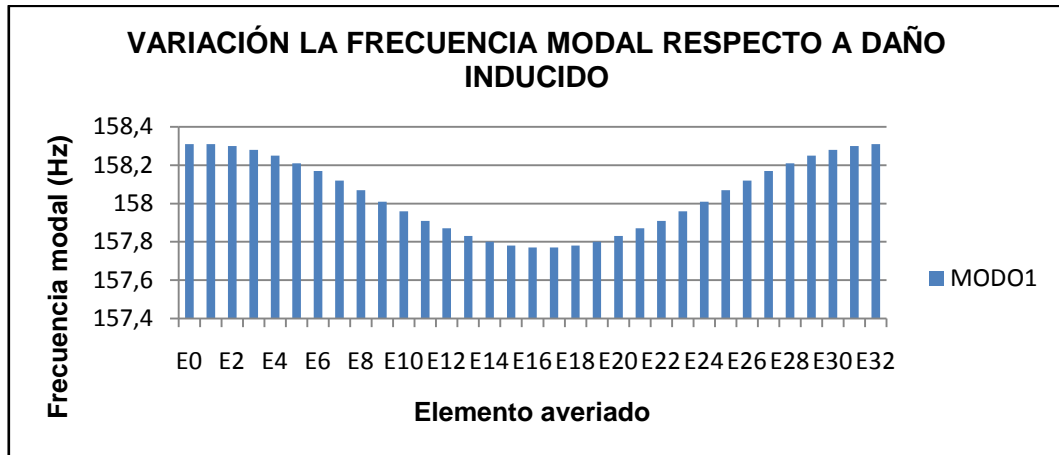


Figura 21. Variación de frecuencias modales de acuerdo con la ubicación de daños para una estructura tipo viga.

Por otra parte, se efectuaron pruebas de variación en el porcentaje de avería para un elemento específico de la estructura seleccionada, tal y como se observa en la figura 22. Las cuales permitieron comprobar que la introducción de averías en una estructura “variaciones en rigidez” bajo condiciones nominales, modifican las frecuencias de cada uno de los modos de vibración característicos de dicha estructura. Cada una de pruebas realizadas, se encuentran reportadas en el ANEXO B.

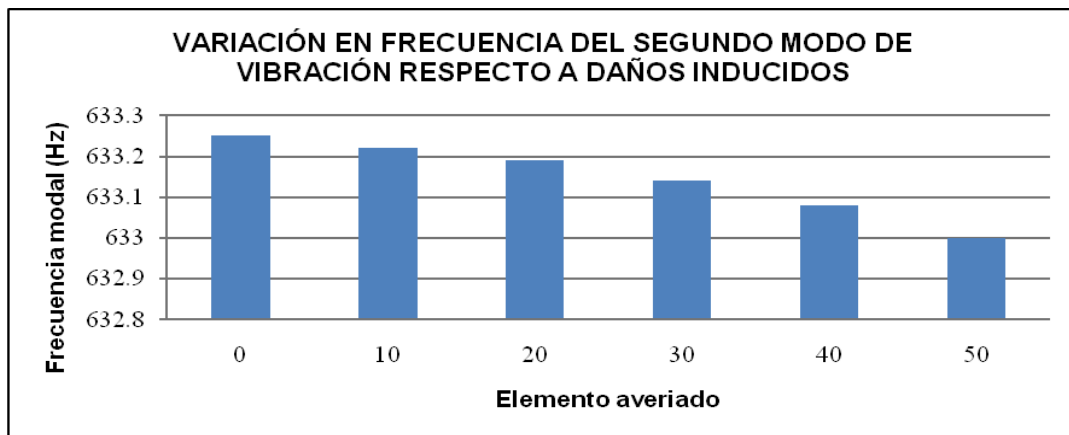


Figura 22. Variación de frecuencias modales de acuerdo con porcentaje de daños para una estructura tipo viga.

Sin embargo, pese a los resultados obtenidos y las fortalezas de ANSYS en el análisis estructural y modal, fue necesario implementar el modelo seleccionado en un software alternativo “FORTRAN”. Esto último debido a la restricción en cuanto a la disponibilidad de las matrices de rigidez, masa y amortiguamiento del modelo simulado en ANSYS, necesarias para realizar el análisis dinámico de la estructura mediante la representación en espacio de estados.

Por consiguiente, el paso posterior correspondió a simular en FORTRAN, los diferentes escenarios de daño recreados inicialmente en ANSYS. Los resultados obtenidos a partir de la nueva herramienta de simulación, fueron validados, al contrastar sus valores de frecuencias y formas modales características de la estructura simulada, con sus correspondientes estimaciones en ANSYS, de forma tal como se evidencia en el ejemplo de la figura 23 y en las pruebas pertinentes, reportadas en el ANEXO C.

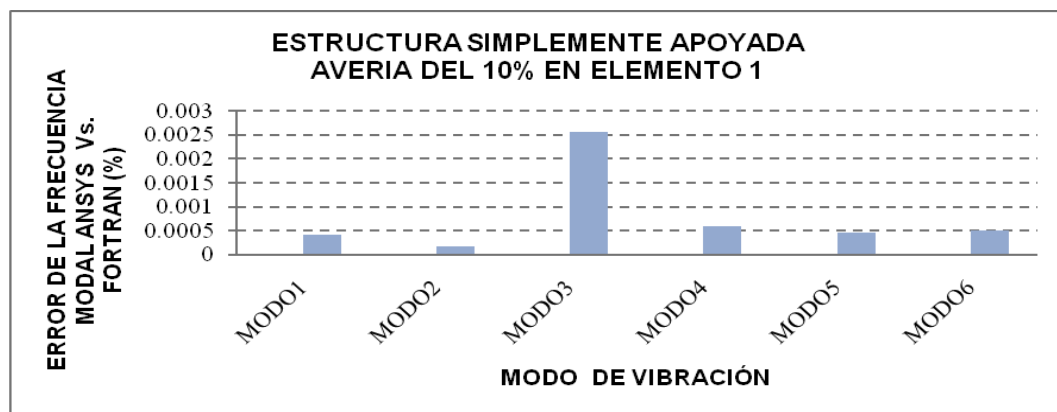


Figura 23. Porcentaje de error existente entre frecuencias modales (ANSYS Vs FORTRAN).

Teniendo en cuenta lo anterior y el esquema de validación de la figura 24, se comprobó que las matrices de rigidez y masa utilizadas por la aplicación simulada en FORTRAN, son equivalentes a las manipuladas internamente por ANSYS, dado que los resultados obtenidos del análisis modal, con ambas herramientas de simulación también lo son.

Una vez efectuada la primera prueba de validación de las matrices M y K generadas por FORTRAN, se verificaron sus correspondientes valores teóricos, a partir de las matrices de ensamble descritas en el capítulo 1 y sus correspondientes cálculos “programados en EXCEL” referenciados en el ANEXO D. Los resultados de la segunda pruebas de verificación se observan en la figura 25. Donde se corrobora la fiabilidad de software de simulación alternativo.

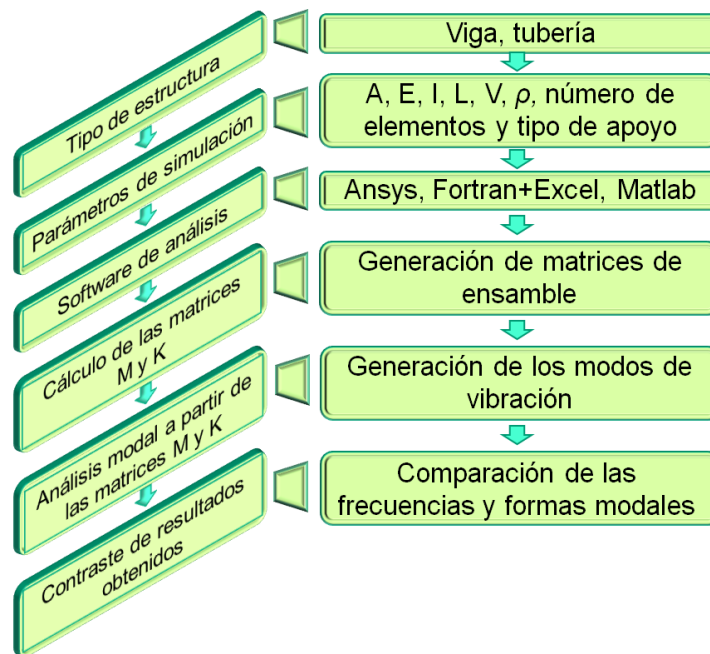


Figura 24. Proceso de validación del modelo en elementos finitos implementado.

Otro aspecto relevante para la verificación del funcionamiento del código implementado para la simulación de los diferentes escenarios de análisis considerados en la tabla 4, fue la monitorización de las averías simuladas mediante el método clásico de diagnóstico “variación de curvatura”, tal y como se observa en el ejemplo de la figura 26.

En consecuencia, se efectuaron pruebas piloto de contraste entre las ubicaciones de los daños inducidos en la estructura mediante variaciones en

la matriz de rigidez en los elementos seleccionados “utilizando el método de elementos finitos” y el diagnóstico de daños “ubicaciones de anomalías detectadas” realizado mediante el método expuesto en la sección 2.2.4.

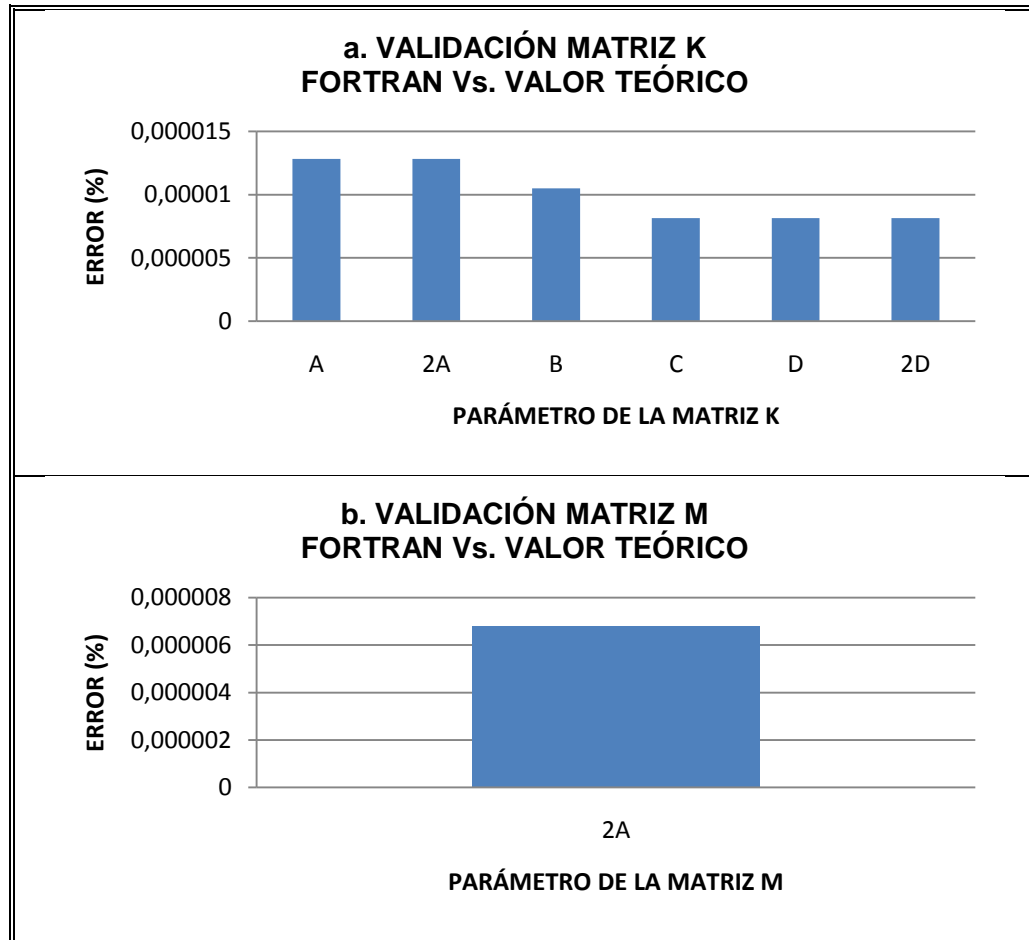


Figura 25. Proceso de validación para las matrices M y K generadas en FORTRAN.

Sin embargo, dada la robustez “Nivel de monitorización” de la técnica utilizada para el diagnóstico, el proceso de detección se limitó a identificar la presencia de los daños inducidos y su ubicación como se relaciona en el ANEXO E. No obstante, en cuanto a la severidad de las averías simuladas, el método no es concluyente como se observa en la figura 27.

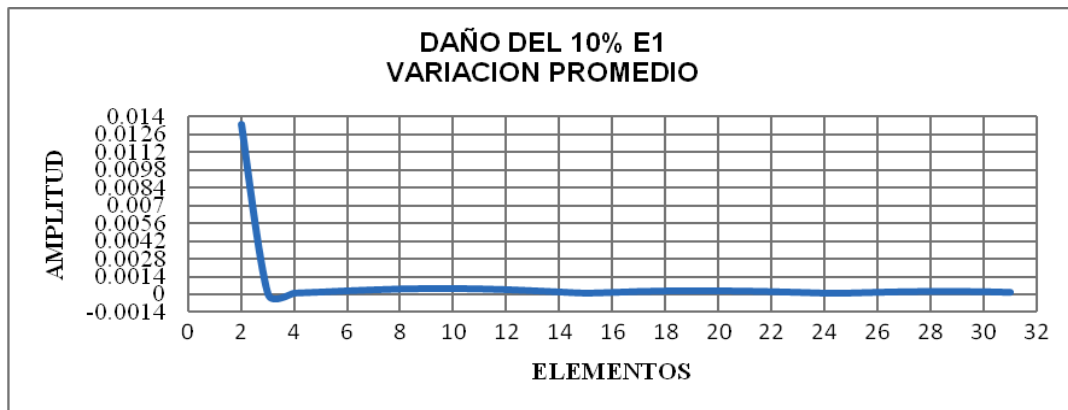


Figura 26. Detección de anomalías en un elemento, a partir del método de variación de curvatura.

La siguiente etapa en éste proceso, fue la implementación en MATLAB del código respectivo para el análisis en elementos finitos de la estructura seleccionada. A continuación, se recrearon en MATLAB los mismos escenarios de daño utilizados en las pruebas realizadas a partir de FORTRAN y ANSYS. Una vez terminadas las pruebas respectivas, los resultados simulados con la nueva herramienta, fueron contrastados con los obtenidos con base en ANSYS y FORTRAN, confirmando así su funcionamiento para el análisis de vigas en diferentes condiciones de apoyo.

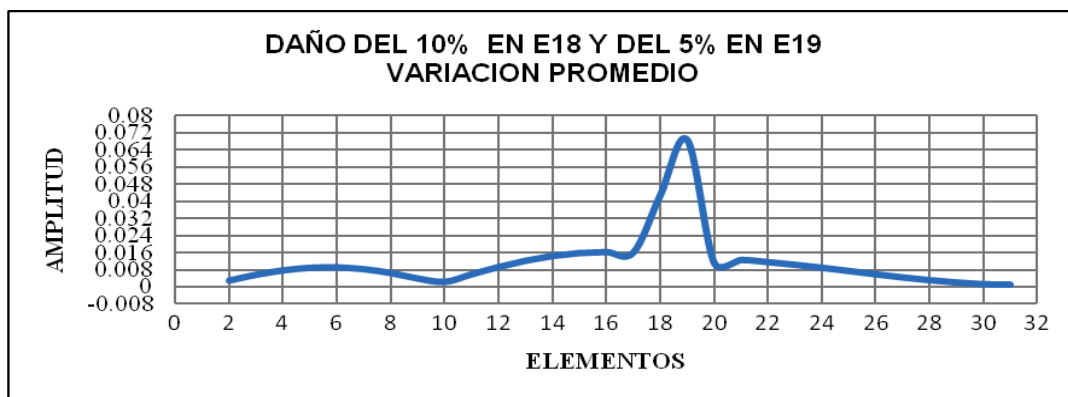


Figura 27. Detección de anomalías en dos elemento consecutivos, a partir del método de variación de curvatura.

Finalmente, se replicó todo el proceso de verificación descrito en la figura 23, para una estructura tipo tubería “Recta y sin derivaciones” en configuración

apoyo simple con las características observadas en la tabla 6, teniendo en cuenta las especificaciones de la tabla 1.

Tabla 6. Características de la tubería simulada.

NOMBRE DEL PARÁMETRO	VALOR NUMÉRICO
Número de elementos	32
Radio exterior del tubo	0.042 [m]
Radio interior del tubo	0.040 [m]
E	210E+09 [N/m ²]
L	4.28 [m]
V	0.28
A	1.2874E-04 [m ²]
I	2.7066E-08 [m ⁴]
ρ	7800 [Kg/m ³]

En síntesis, se validó el proceso implementado en MATLAB, para la generación de las matrices M y K, tanto de vigas como de tuberías, empleando para ello el método de elementos finitos.

5. SISTEMA EXPERTO PARA LA EVALUACIÓN DE CAMBIOS DE RIGIDEZ

En el presente trabajo de investigación se adaptó la metodología expuesta en el capítulo 3 al problema de detección de deformaciones de tipo geométrico. Ésta se fundamenta en el uso de un sistema experto (SE) de razonamiento basado en casos (CBR), que consta de dos etapas fundamentales, el entrenamiento y la validación, las cuales aplican el mismo esquema de procesamiento de señales de la figura 28 para la librería de casos.

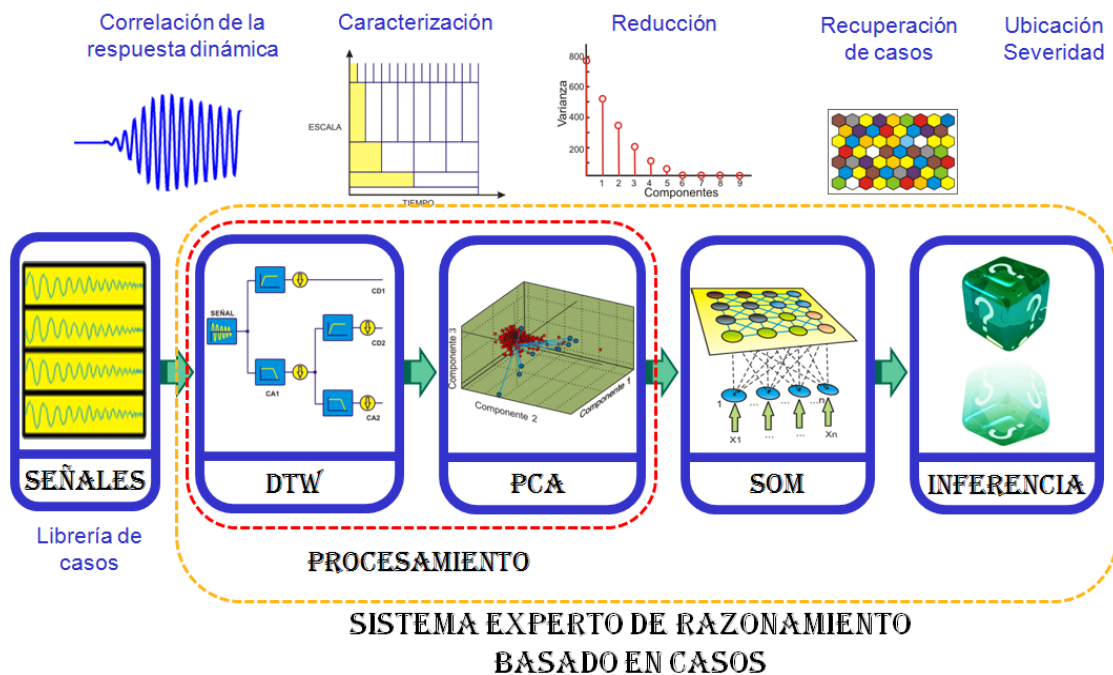


Figura 28. Etapas del sistema experto, según su funcionamiento.

La forma en que opera en línea el SE para la evaluación de cambios de daño estructural, se basa en el procesamiento de la señal correlacionada a partir de la DWT y PCA, posteriormente se recuperan los casos similares al analizado previamente clasificados por la SOM, los cuales son utilizados por

el mecanismo de inferencia del sistema, para calcular la ubicación y severidad del daño evaluado.

El entrenamiento del sistema experto se realiza fuera de línea, teniendo como referencia un conjunto de datos preseleccionados de la librería de casos, los cuales son procesados a partir de herramientas matemáticas especializadas en los procesos de caracterización, reducción y clasificación. La información resultante de dichos procesos, es almacenada para su posterior uso en la evaluación de daños.

El procedimiento en línea, utilizado para la etapa de validación del sistema, se realiza a partir del conjunto de datos “de la librería de casos”, complementarios a los utilizados en el entrenamiento.

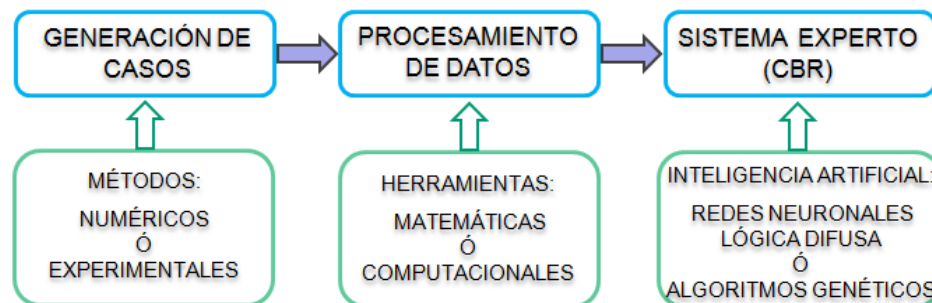


Figura 29. Diagrama en bloques del SE CBR.

El funcionamiento general del SE CBR tanto en la etapa de entrenamiento como la de validación, se basa en el procesamiento de datos de entrada del sistema, el cual es realizado a partir de herramientas matemáticas especializadas para efectuar los procesos de caracterización, reducción y clasificación de los casos seleccionados, como se observa en el diagrama de bloques de la figura 29.

A continuación, se explican de forma detallada los procesos inmersos en cada una de las etapas mencionadas e implementadas, para efectuar la

detección de deformaciones geométricas en tuberías simuladas, utilizando el análisis basado en vibraciones.

5.1. GENERACIÓN DE CASOS

La generación de casos “escenarios de daño considerados”, está basada en el método de elementos finitos y el análisis en espacio de estados de la estructura seleccionada. Su operación conjunta, permitió obtener la respuesta dinámica del modelo a partir de una señal de excitación. En consecuencia, se simularon las señales de aceleración en los diferentes elementos de la estructura, consolidando así la librería de casos a utilizar en las etapas de aprendizaje y validación del SE CBR.

5.1.1 Variación porcentual de la rigidez

La variación de rigidez puede darse modificando las variables mencionadas “I o E”. En el caso específico del modelo, se efectuaron reducciones de E en porcentajes de daño “PDAN” múltiplos de un número dado para una estructura compuesta por un número de elementos “NE” previamente definido.

Los daños simulados, fueron acotados a un conjunto de casos, cuyo límite del rango inferior está determinado por el caso en ausencia de daños o caso nominal y el límite superior está condicionado por el daño más drástico sufrido por la estructura.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente citadas, se generan los escenarios de daño correspondientes a averías “DAN” para un número determinado de elementos de la estructura afectados “NED”, localizados en puntos específicos de la misma y asociados a un porcentaje de daño definido “PDAÑO”. Como se observa en el ejemplo de la figura 30.

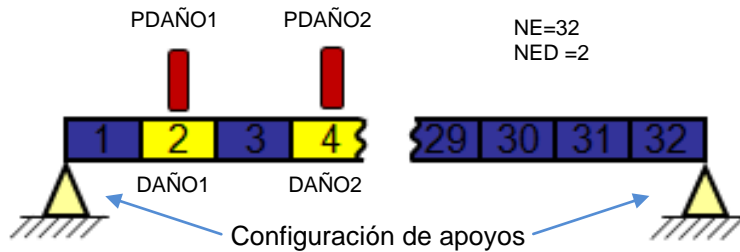


Figura 30. Parámetros considerados para la simulación de escenarios de daño.

Finalmente, se obtienen las matrices M , K y C del sistema, con base en el método de elementos finitos y las ecuaciones de la sección 4.1

5.1.2 Simulación de casos a partir del espacio de estados

Otro aspecto importante en la generación de los casos, es la representación de las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento del modelo utilizado, en términos de las variables del espacio de estados “ A , B , C y D ”. La cual se efectúa a partir de las ecuaciones referidas en la sección 4.2.1. Esto último teniendo en cuenta que la ecuación de salida del sistema, corresponde a las aceleraciones del modelo, en los diferentes elementos que conforman la estructura.

5.1.3 Simulación de aceleraciones a partir de la representación en espacio de estados

Una vez obtenida la representación del modelo en espacio de estados, a partir de las modificaciones de la matriz de rigidez (usando el método de elementos finitos y la herramienta SIMULINK de MATLAB), se simularon los diferentes casos como se explicó en la sección 4.2.2. (Ver figura 19).

Teniendo en mente la ecuación 4-17 correspondiente a la señal excitadora y el esquema de la figura 19, se simula la respuesta dinámica de la estructura para cada escenario de daño considerado.

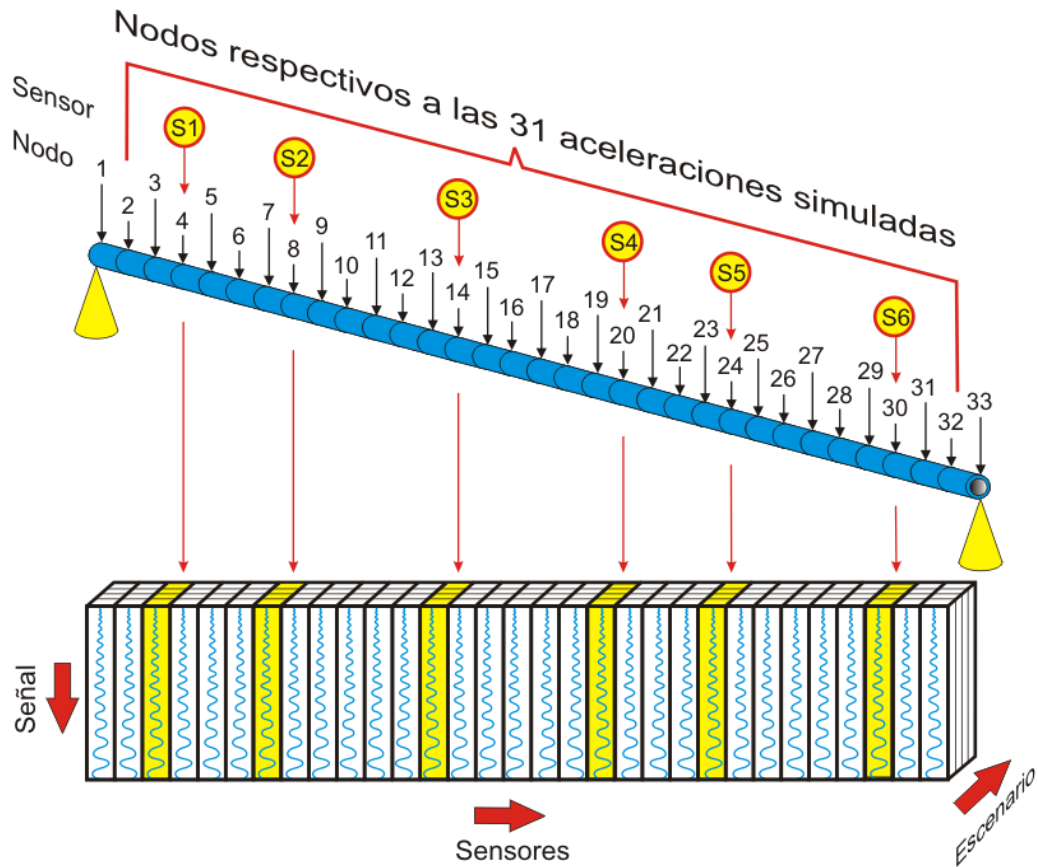


Figura 31. Arreglo matricial de la información simulada.

Posteriormente, la información referente a las señales propagadas para cada uno de los escenarios recreados, es organizada matricialmente en tres dimensiones, como se describe en la figura 31. Donde, el eje X corresponde a la señal simulada “Respuesta dinámica en un punto específico de la estructura”, las coordenadas Y están relacionadas con los nodos o posibles puntos de sensado y Z concierne a cada una de las situaciones de avería simulada.

Finalmente, la librería de casos es generada a partir de la ubicación del daño, su severidad y las respectivas señales propagadas, correspondientes entre sí a cada uno de las situaciones de daño simuladas.

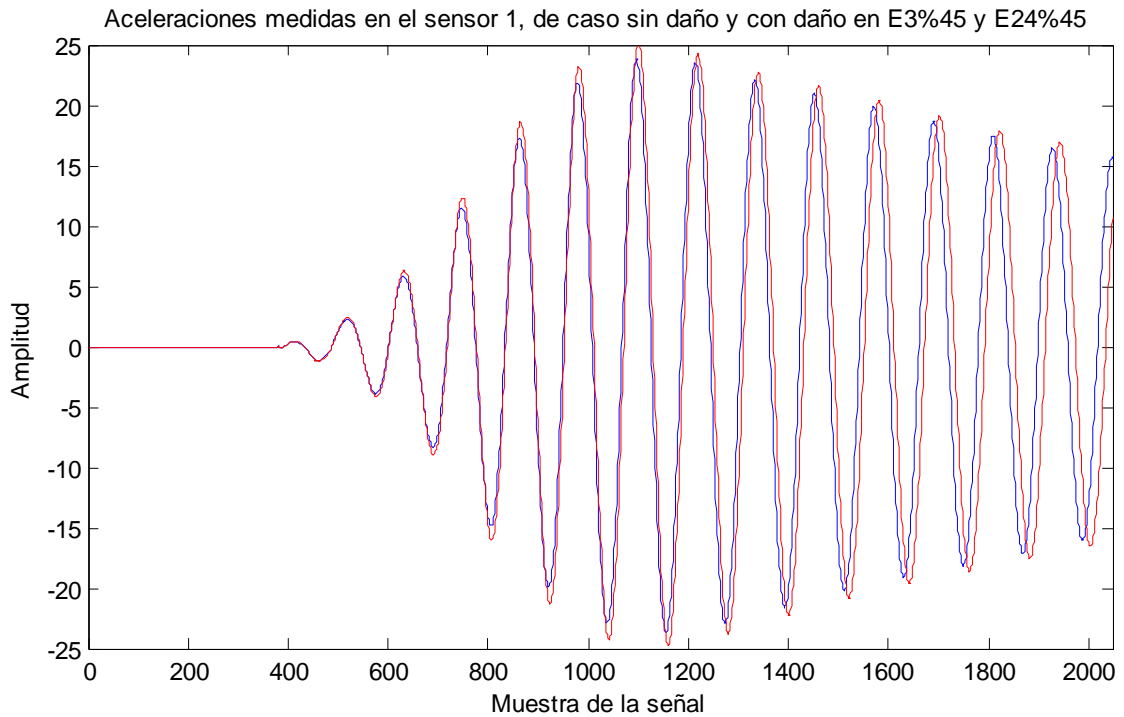


Figura 32. Señales de aceleración simuladas para diferentes condiciones de daño.

En síntesis, la generación de casos provee la información necesaria para el aprendizaje y operación del SE CBR. Donde, las variaciones en las ondas propagadas “simuladas”, están directamente relacionadas con la ubicación del daño estructural simulado y su severidad. En la figura 32, se observa un ejemplo de dicha situación, en la cual dos señales son sensadas “simuladas” en un punto “Nodo” específico de la tubería, para dos escenarios de daño diferentes, en interacción con misma señal de excitación.

5.2 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Ésta etapa, está dedicada a compactar el volumen de la información a introducir en el sistema experto, reduciendo así el costo computacional de la aplicación implementada. Por lo tanto, la longitud de las señales originalmente simuladas, es sintetizada mediante el uso de herramientas matemáticas y computacionales, especializadas en los procesos de caracterización y reducción de dimensionalidad.

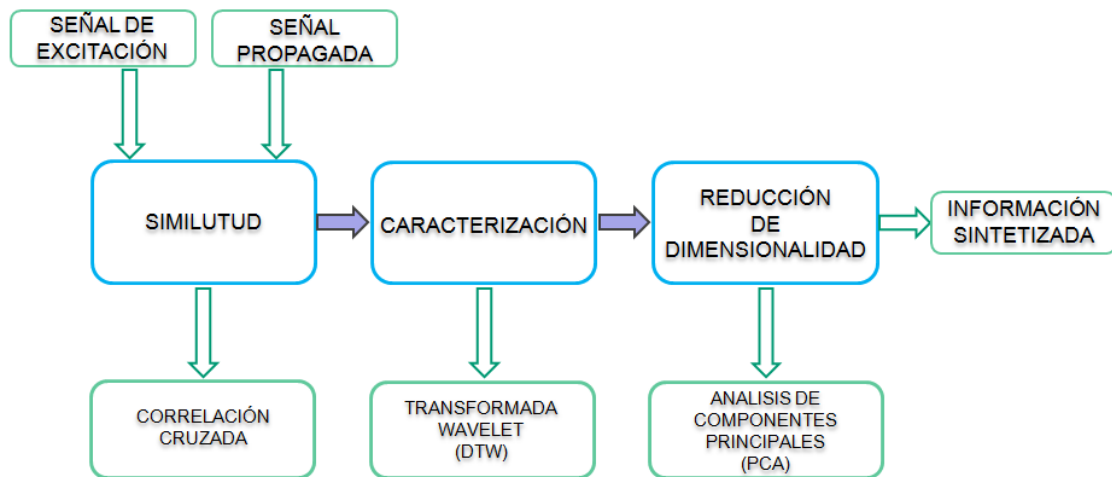


Figura 33. Etapas del procesamiento de las señales.

De acuerdo con lo anterior y teniendo como punto de referencia la señal del actuador “inducida y sensada en el mismo punto de actuación mediante simulación” y la señal propagada en un punto dado de la estructura, el procesamiento de la información se organizó sistemáticamente en tres fases fundamentales como se observa en la figura 33.

A continuación se explica cada una de las tres fases utilizadas en el procesamiento de los datos.

5.2.1 Correlación

La correlación cruzada se requiere para eliminar componentes de perturbación “ p ” y para establecer el grado de similitud entre la señal inducida en la estructura (sensada “ a_1 ”) y las propagadas “ a_n ” en los diferentes elementos de la misma como se observa en la figura 34. Donde “ a_r ” es la señal de excitación.

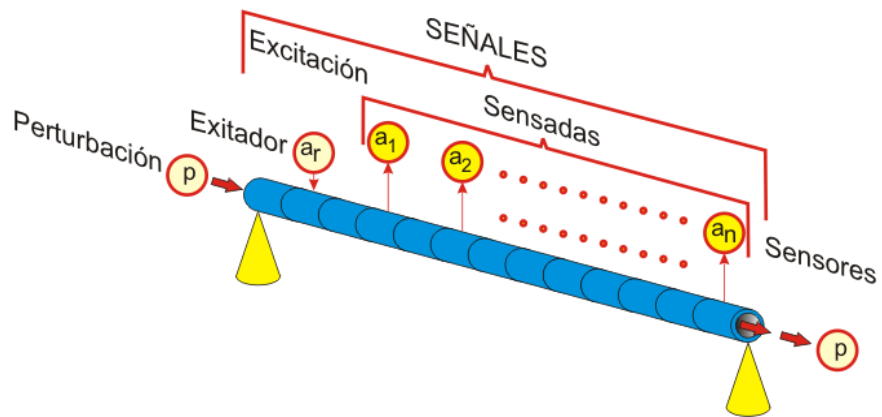


Figura 34. Análisis de la correlación entre las señales sensadas.

De acuerdo a [45] se debe realizar la correlación cruzada “ $R_{xf}(\tau)$ ”, dado que las mediciones de vibración a efectuar contienen señales de ruido. Su expresión matemática aplicada a vibraciones está definida por la ecuación 5-1, donde $x(t)$ es la medida de la vibración en un punto de la estructura a una excitación forzada medida $f(t)$.

$$R_{xf}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)f(t + \tau) dt \quad 5-1$$

Donde, τ es el retraso de tiempo de muestreo de la señal $x(t)$.

Por otra parte la transformada de Fourier de la función de la correlación cruzada define la densidad de potencia espectral cruzada “PSD”, denotada por $S_{xf}(\omega)$ y descrita por la ecuación 5-2.

$$S_{xf}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xf}(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau \quad 5-2$$

Reescribiendo la ecuación 5-2, en función de la respuesta en frecuencia “ $H(j\omega)$ ” de un sistema amortiguado, se obtiene la ecuación 5-3, donde la PDS de $F(t)$ esta denotada por S_{ff} .

$$S_{xf}(\omega) = H(j\omega)S_{ff}(\omega) \quad \mathbf{5-3}$$

Por tanto, la función de respuesta en frecuencia puede ser relacionada con la función de densidad espectral por medio de la ecuación 5-3 y 5-4, donde la función de autocorrelación de la PDS es denotada por $S_{xx}(\omega)$.

$$S_{xx}(\omega) = H(j\omega)S_{xf}(\omega) \quad \mathbf{5-4}$$

Lo anterior se cumple sí al excitar la estructura con una señal $f(t)$, se produce una respuesta $x(t)$.

A partir de las ecuaciones 5-3 y 5-4, se puede determinar la función de coherencia “ γ^2 ”, la cual es una medida del ruido presente en la señal y cuyo valor esta acotado en un rango entre cero y uno. Dicha función está definida por la ecuación 5-5.

$$\gamma^2 = \frac{|S_{xf}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{ff}(\omega)} \quad \mathbf{5-5}$$

Siendo $\gamma^2 = 1$, cuando las señales $x(t)$ y $f(t)$ no están contaminadas con ruido. No obstante, para valores de $\gamma^2 = 0$, la medida es un ruido puro.

En la práctica, cuando aparecen valores de coherencia de uno, significa que los valores de ω están muy cercanos a la frecuencia de resonancia de la estructura y por lo tanto la calidad de las mediciones es alta, debido a que son poco afectadas por el ruido. Sin embargo, las mediciones con valores de coherencia por debajo de 0.75, no son tenidas en cuenta y en consecuencia se recomienda repetir la medición.

En síntesis, la función de correlación cruzada, contiene información tanto de magnitud como de fase de la función de transferencia para la estructura masa-resorte-amortiguador, descrita a partir de las ecuaciones 5-6 y 5-7.

$$G(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad \mathbf{5-6}$$

$$G(j\omega) = H(\omega) = \frac{1}{k - m\omega^2 + csj} \quad \mathbf{5-7}$$

Finalmente, se debe tener en cuenta que el resultado de la correlación de las dos señales de " N " número de muestras da como resultado una señal de longitud " $2N - 1$ " muestras, como se observa en la figura 35.

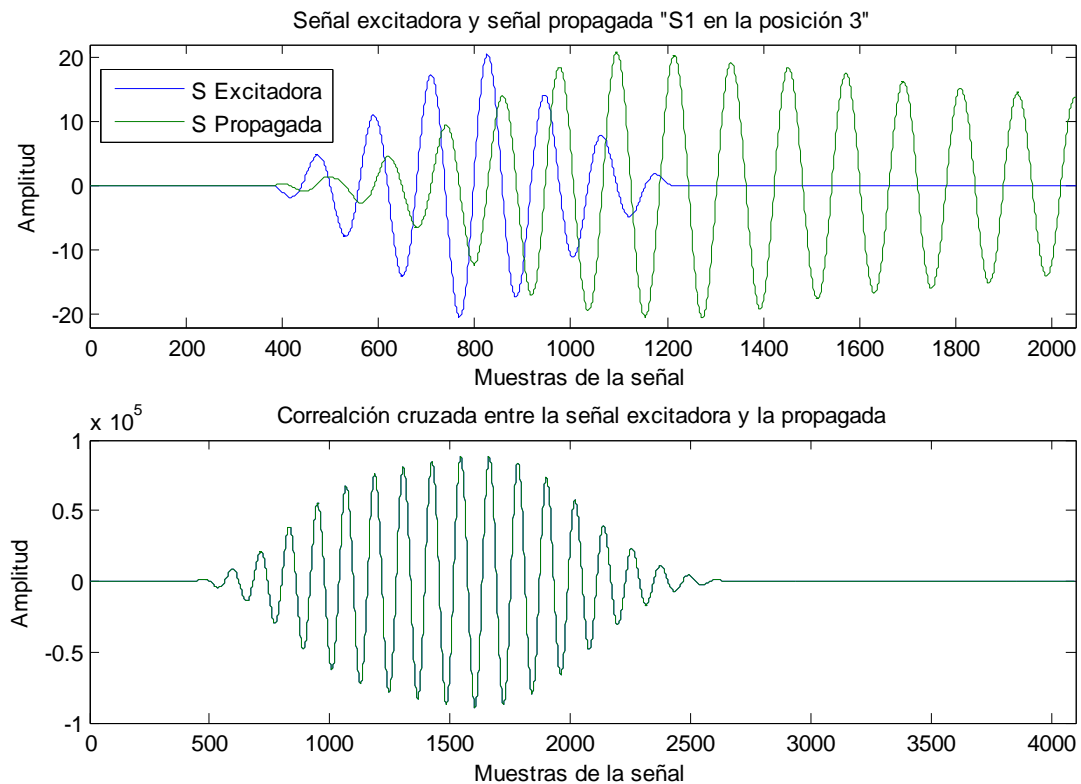


Figura 35. Correlación entre la señal de excitación sensada y la propagada.

5.2.2 Caracterización

Esta fase de procesamiento, se realiza con el fin de caracterizar las señales de aceleración correlacionada, a partir de un análisis multiresolución (MRA) mediante la DTW, su resultado son los coeficientes de detalle y de aproximación, donde A_n son los coeficientes de aproximación y D_n corresponde a los de detalle, asociados a una longitud “L”, como se observa figura 36.

Un aspecto a tener en cuenta es que la longitud “L” puede ser igual o mayor a la de la señal original, dependiendo tanto de la wavelet madre como de la subfamilia seleccionada.

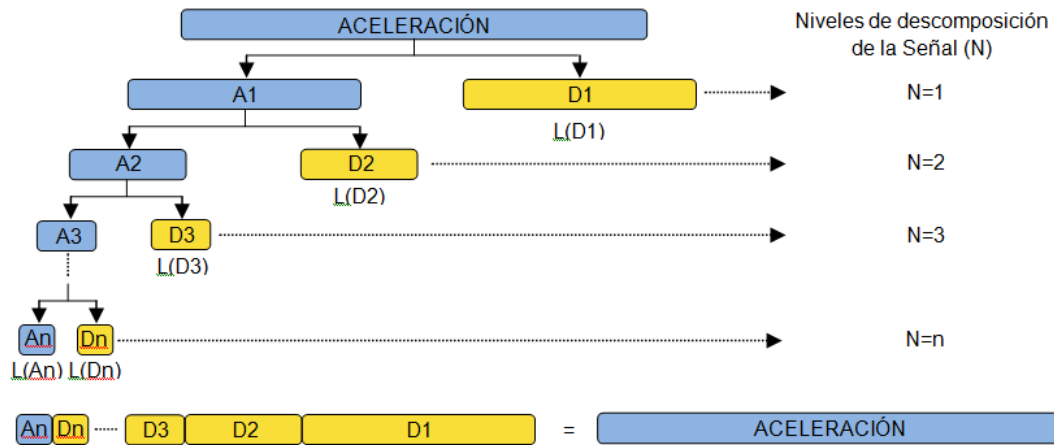


Figura 36. Descomposición de señales mediante la DTW

De los coeficientes D_n y A_n se obtiene un descriptor de dichas señales, lo que permite condensar información en un vector de características reducido. Los descriptores pueden ser, entre otros: el valor RMS, la energía wavelet (EW), la $\sqrt{\text{energía wavelet}}$, la varianza, la desviación estándar, la media, la moda, el valor máximo y el valor mínimo.

La figura 37 presenta un ejemplo de vector de características de apelación correlacionada para niveles de descomposición.

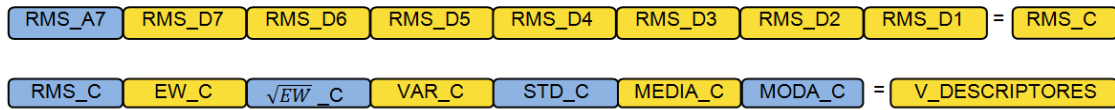


Figura 37. Aplicación de descriptores a los coeficientes de descomposición de la DTW

Finalmente, se deben aplicar varios descriptores al mismo grupo de coeficientes, generando así un vector de características de la señal, dado que al establecer diferencias entre señales se puede tener un alto grado de similitud como las observadas en la figura 38.

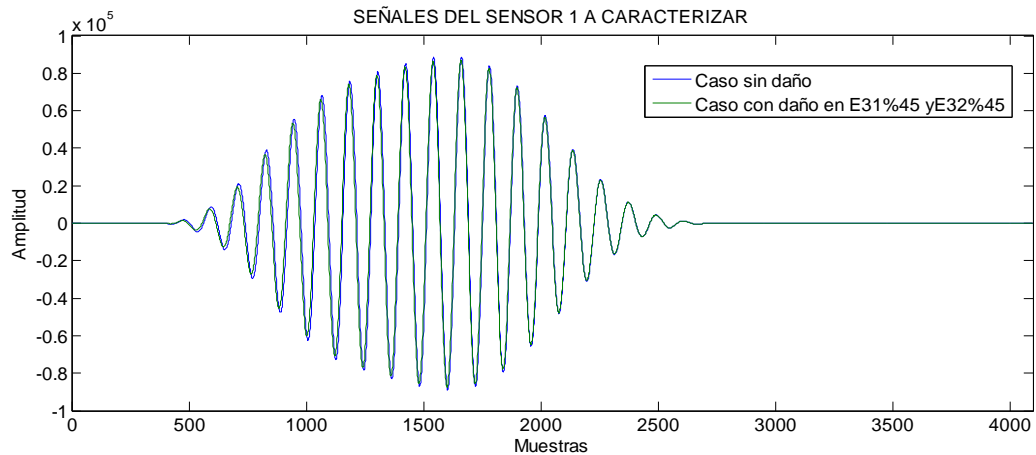


Figura 38. Señales con alto grado de similitud, utilizadas para la caracterización

5.2.3 Reducción de dimensionalidad

La última fase del procesamiento, tiene como función reducir la dimensionalidad de las señales caracterizadas, eliminando la información redundante a partir del análisis de componentes principales (PCA). [70].

En primera instancia, esta herramienta matemática convierte el conjunto de los datos de entrada a un nuevo espacio vectorial, conservando la mayor cantidad de información procedente de los datos originales en los denominados “componentes principales”.

Posteriormente, la componentes son organizados de acuerdo a su nivel de importancia o variabilidad, de mayor varianza a menor como se observa en la figura 39. Esto último teniendo en cuenta que el componente de mayor varianza contiene la mayor cantidad de información.

El número de componentes seleccionados, se realiza usualmente con base en los criterios de Kaiser, el cual sugiere tomar las componentes cuyo valor propio esté por encima del promedio y el criterio de Jolliffe, que propone conservar las que estén por encima del 70% del valor propio.

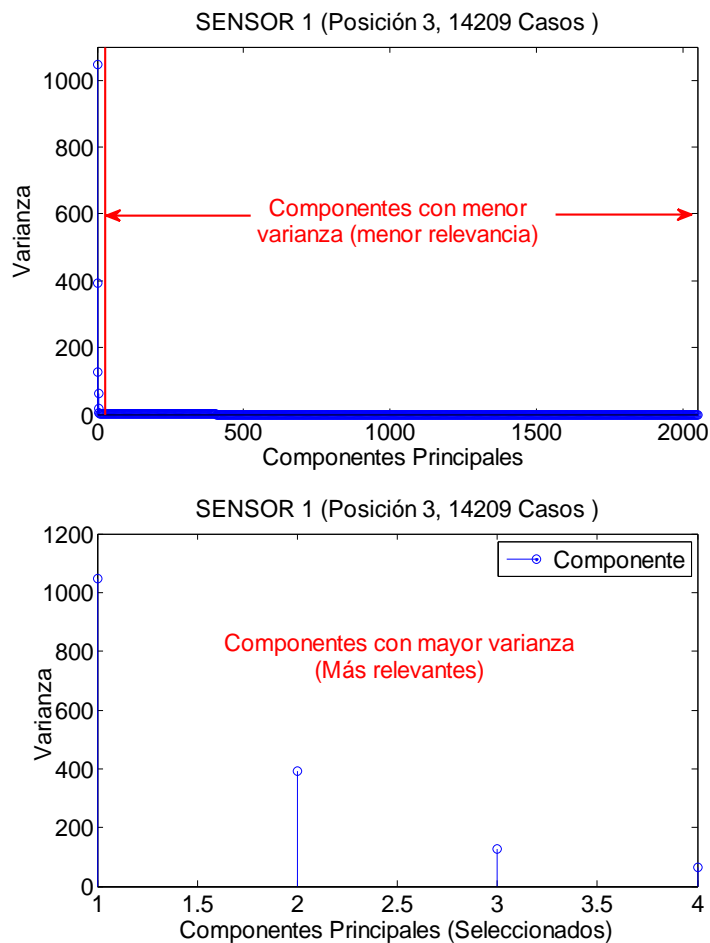


Figura 39. Varianza de las componentes principales

Sin embargo, existen otros criterios para la selección del número de componentes principales, entre los cuales está el del 98% [84]. El cual considera que las componentes con mayor varianza “que no decaen por debajo del 2% de la varianza máxima”, contienen la mayor parte de la información de los datos analizados, como se observa en la figura 40. Éste criterio es también usado comúnmente en la teoría de control, el cual sugiere que la respuesta de un sistema ante una excitación se considera estable al alcanzar una brecha del 2%, es decir, el 98% de su valor final.

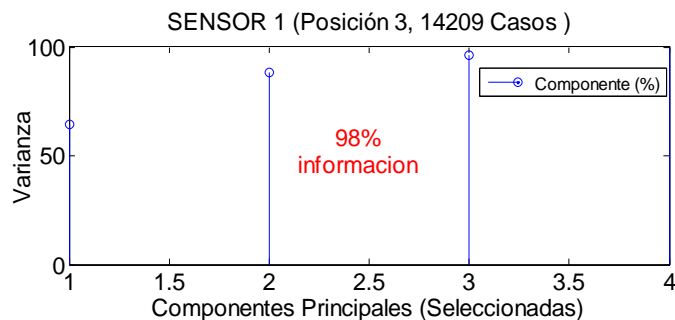


Figura 40. Varianza con respecto al número de componentes

En conclusión, se determinó utilizar el último criterio mencionado, como punto de referencia para el cálculo del número de componentes principales a tener en cuenta, en el proceso de reducción de dimensionalidad de las diferentes señales de entrada previamente caracterizadas.

5.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EXPERTO CBR

El propósito del SE es la detección, ubicación y estimación de cambios de rigidez estructural a partir del análisis de la respuesta dinámica de la estructura en puntos específicos de interés o sensado “[s_1, s_2, \dots, s_6]”, cuando se ha excitado la estructura en un determinado punto, como se observa en la figura 41.

Cada punto de sensado debe tener en cuenta que tiene asociado su correspondiente red neuronal " $[R_1, R_2, \dots, R_6]$ ". Esto último, exceptuando a la señal de excitación "sensada" s_r , la cual es medida en el mismo punto de actuación.

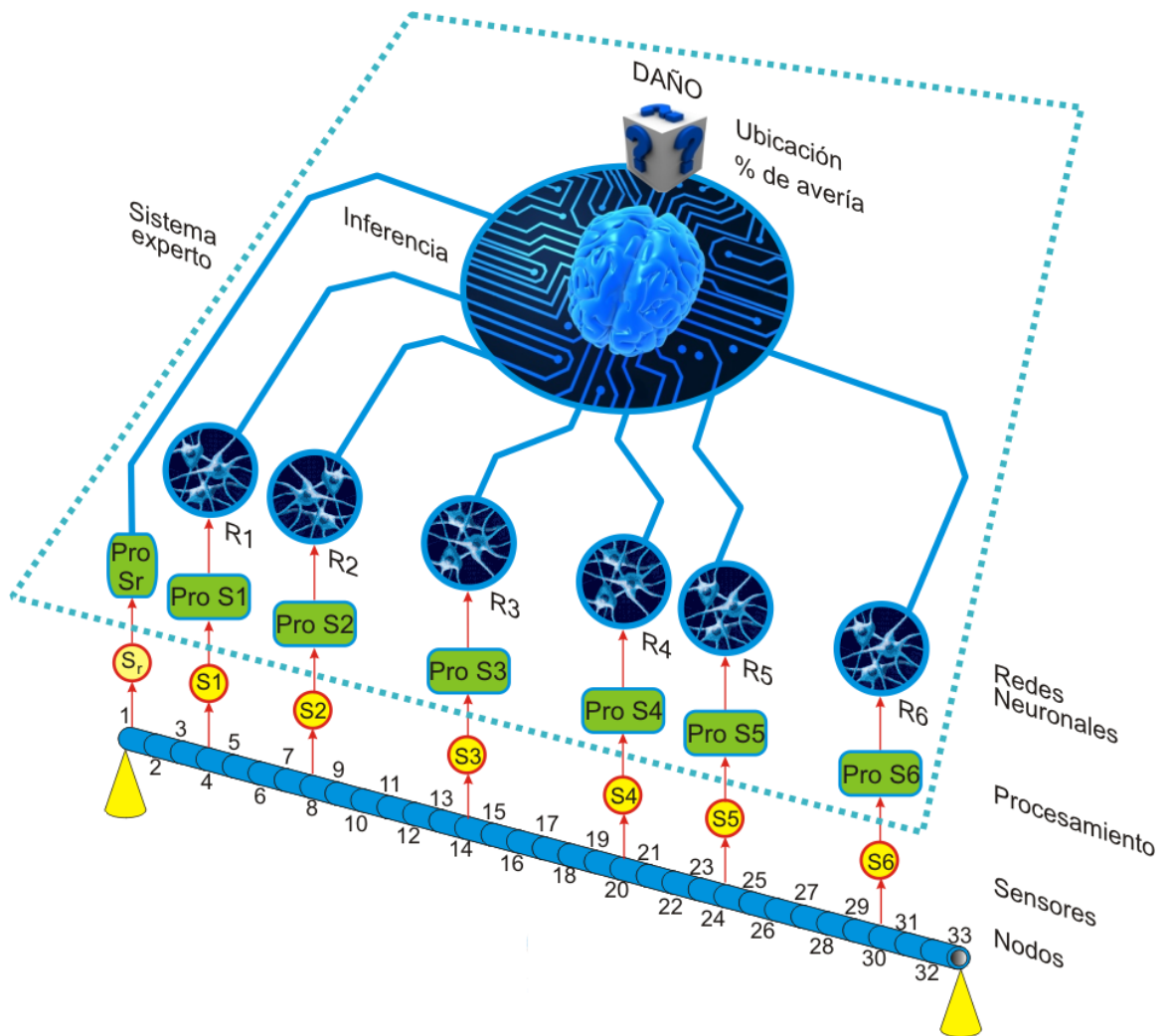


Figura 41. Esquema general del SE.

Finalmente, el SE está asociado a dos fases de operación, tal y como se observa en la figura 42. En consecuencia, es necesario distribuir el total de la información en dos grandes grupos de análisis como se explica detalladamente sección 5.3.1.

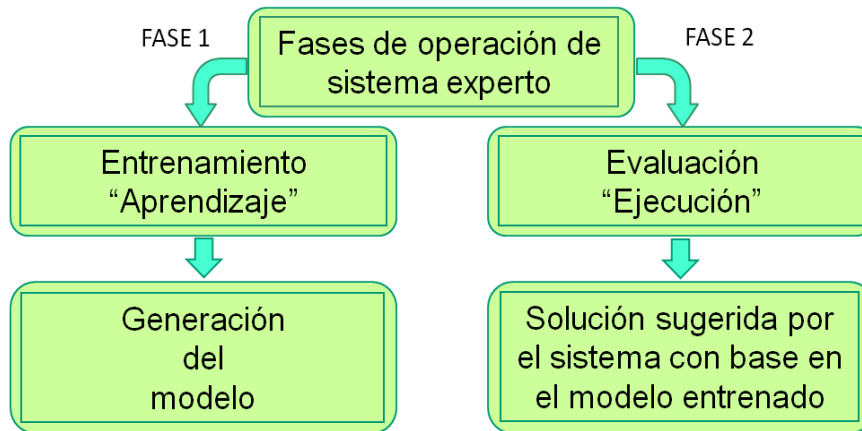


Figura 42. Fases de operación del SE.

5.3.1 Organización de la información

La disposición de la información para llevar a cabo los procesos de entrenamiento y evaluación del sistema, se realizó teniendo en cuenta el diagrama de la figura 43.

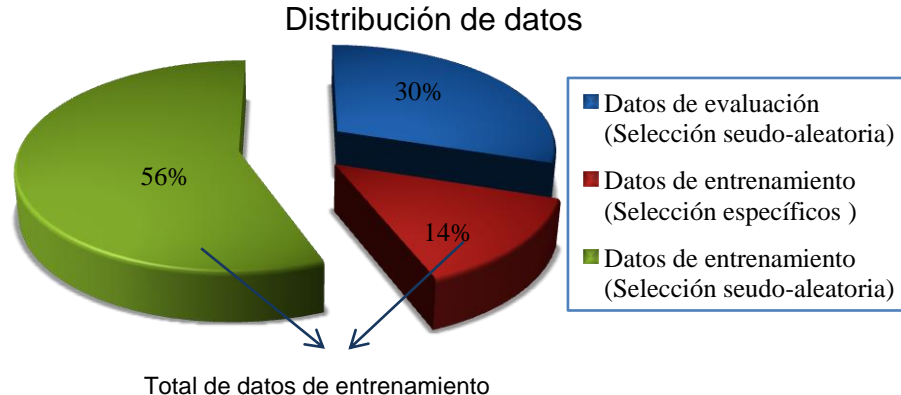


Figura 43. Organización de la información.

Por lo tanto, la información de librería de casos fue separada sistemáticamente en tres grupos. El primero de ellos, relacionado con los casos considerados como críticos “importantes” para el proceso de entrenamiento.

Posteriormente, a partir de los datos restantes, se realizó una selección aleatoria del número de casos necesarios hasta completar el porcentaje correspondiente a los datos de entrenamiento.

Finalmente, la parte restante de la selección, conformó el conjunto de datos de evaluación, quedando así organizada la información para efectuar cualquiera de las etapas de operación del sistema experto.

5.3.2 Entrenamiento del sistema.

Esta primera fase de operación del SE, corresponde a la selección, procesamiento, organización y obtención de un modelo de generalización, a partir del conjunto de datos correspondientes a los escenarios de daño designados para entrenar el sistema, utilizando diferentes herramientas matemáticas y computacionales, como se observa en la figura 44.

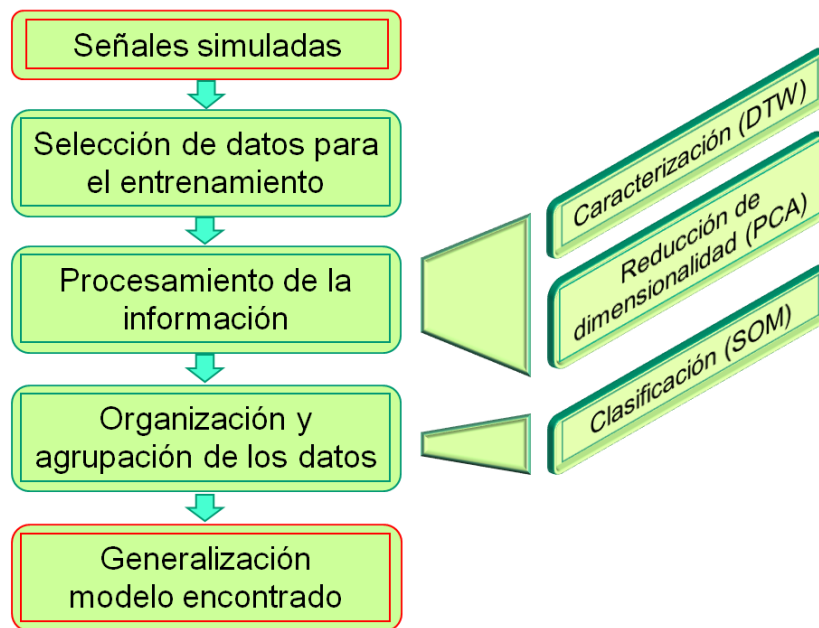


Figura 44. Procesos inmersos en la fase de entrenamiento del SE.

Cada uno de los subprocesos mencionados, juega un papel muy importante en la fase de aprendizaje del SE. De hecho, la obtención de un buen modelo de generalización de la información y su posterior desempeño en la fase de evaluación, está condicionado por la calidad de los patrones de entrenamiento de la SOM.

En consecuencia, la sinergia entre un conjunto de datos de entrenamiento debidamente seleccionado y su adecuado procesamiento, minimizan el riesgo de proveer información redundante o patrones de entrenamiento que no son claramente diferenciable entre sí (Ver figura 45), lo cual ocasionaría el denominado efecto de memorización “sobre-entrenamiento” de la red neuronal, entorpeciendo de esta forma el proceso de generalización realizado por la misma, durante el la fase de aprendizaje.

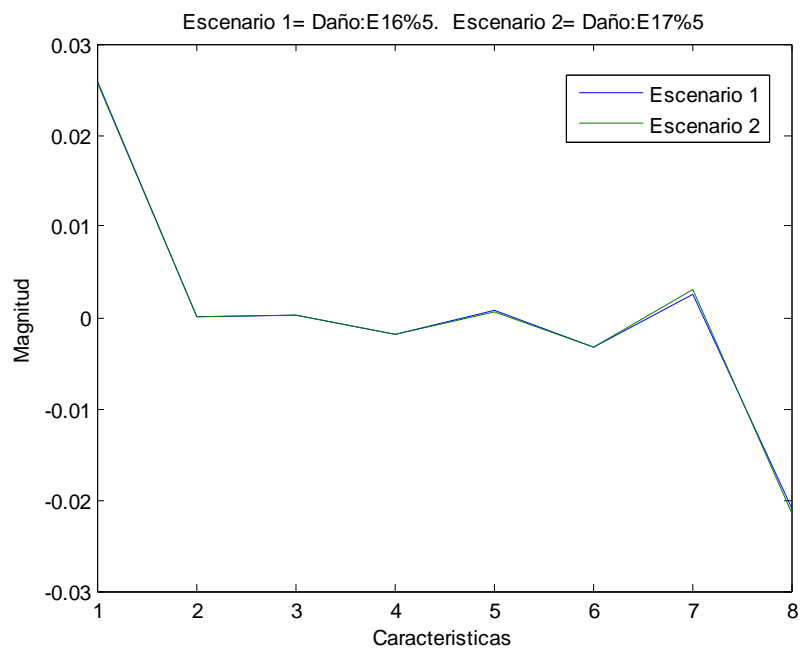


Figura 45. Patrones de entrenamiento similares.

En otras palabras, dado el caso anteriormente expuesto, el desempeño de la red neuronal ante el grupo de patrones de entrenamiento sería satisfactorio,

sin embargo, las acciones tomadas ante patrones o situaciones diferentes podrían ser incorrectas debido a un mal proceso de generalización en la fase de entrenamiento del sistema.

Teniendo en cuenta las consideraciones señaladas y una vez determinado el modelo de generalización de la red, es necesario organizar la información clasificada en grupos “clúster” de acuerdo a su grado de similitud “distancia euclidiana”. Agilizando de esta manera, la posterior búsqueda de cúmulos de información a ser contrastados con el patrón de entrada, en el correspondiente proceso de evaluación de la red.

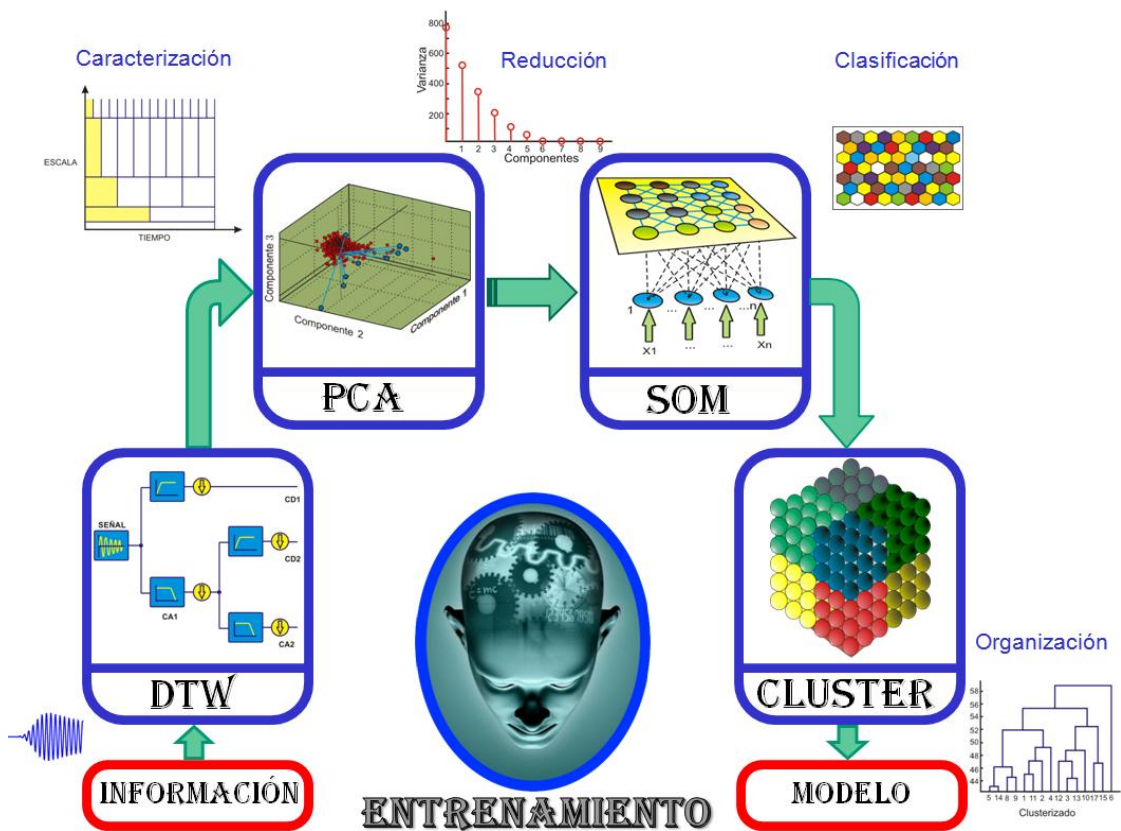


Figura 46. Esquema de entrenamiento del SE.

Finalmente, en la figura 46 se observa la interacción de cada una de los subprocesos de entrenamiento descritos anteriormente y sus

correspondientes salidas, a partir de un conjunto de datos previa y debidamente seleccionados.

5.3.3 Validación del sistema experto.

El segundo modo de operación del sistema experto, hace referencia a la evaluación del desempeño, efectuada a partir del modelo de generalización obtenido con base en los datos de entrenamiento. A continuación se explican cada uno de los subprocessos inmersos en esta fase de SE.

En primera instancia, cabe aclarar que este proceso tiene un alto grado de similitud con la fase de entrenamiento. No obstante, difiere tanto en los cálculos relacionados con reducción de dimensionalidad de la información, como en el uso del elemento clasificador de los datos. Estas variaciones se observan en la figura 47.

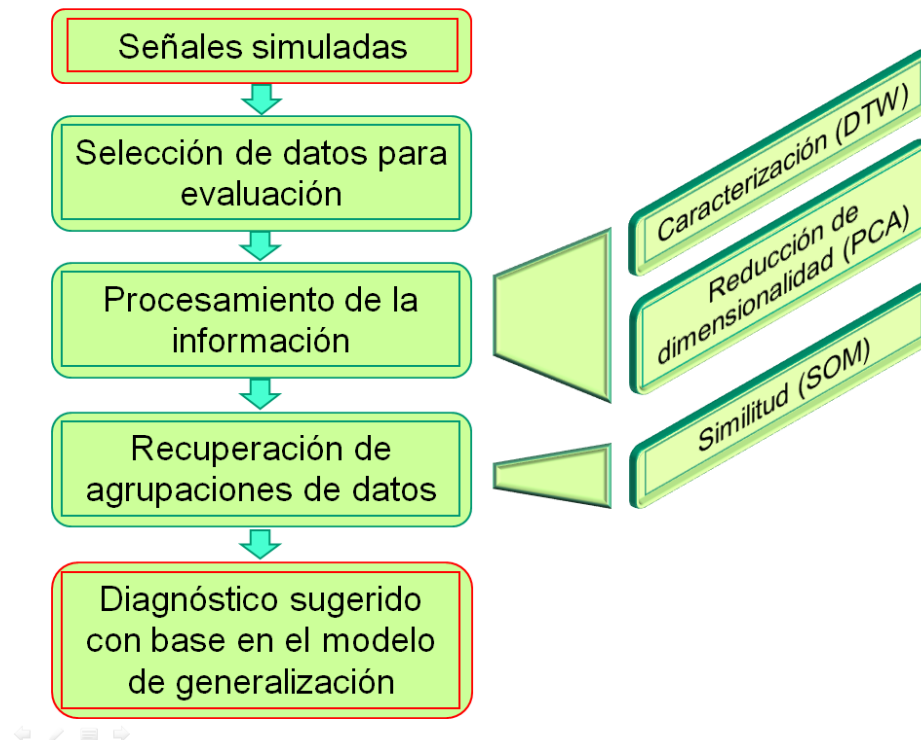


Figura 47. Procesos inmersos en la fase de evaluación del SE.

Ahora bien, de forma posterior al proceso de caracterización, los datos “ x ” deben ser centrados a partir de la ecuación 5-8, teniendo en cuenta las medidas estadísticas de media “ μ ” y varianza “ σ ”, calculadas en el proceso de entrenamiento.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \mathbf{5-8}$$

Así mismo, los componentes principales del dato analizado “Comp”, son obtenidos a partir del dato de interés centrado “ z ”, los coeficientes PCA “Coef” y número de componentes determinados en la sección de entrenamiento, teniendo en cuenta para ello la ecuación 5-9.

$$Comp = z * Coef \quad \mathbf{5-9}$$

En segundo lugar, se fijan los diferentes criterios utilizados por el sistema experto “en el modo de ejecución” para efectuar el diagnóstico de daños presentes en la estructura “ubicación y severidad”. Esta estimación “inferencia” es realizada a partir del análisis y clasificación de resultados arrojados por el conjunto de redes neuronales que conforman el SE. Sin embargo, solo la información considerada como relevante es tenida en cuenta para efectuar dicho diagnóstico.

Consecuente con lo anterior, se debe tener presente que para cada red neuronal del sistema en modo de ejecución, se activaran los grupos de neuronas más cercanas “las de menor distancia euclidiana” al dato de evaluación “patrón de entrada”. Así mismo, cada neurona activa está asociada al dato o conjunto de datos relacionados a los escenarios de daño con mayor grado de similitud al patrón mencionado.

Finalmente, en la figura 48 se observa la descripción del esquema de generalización para funcionamiento del SE en modo de evaluación, creado a partir de las consideraciones realizadas.

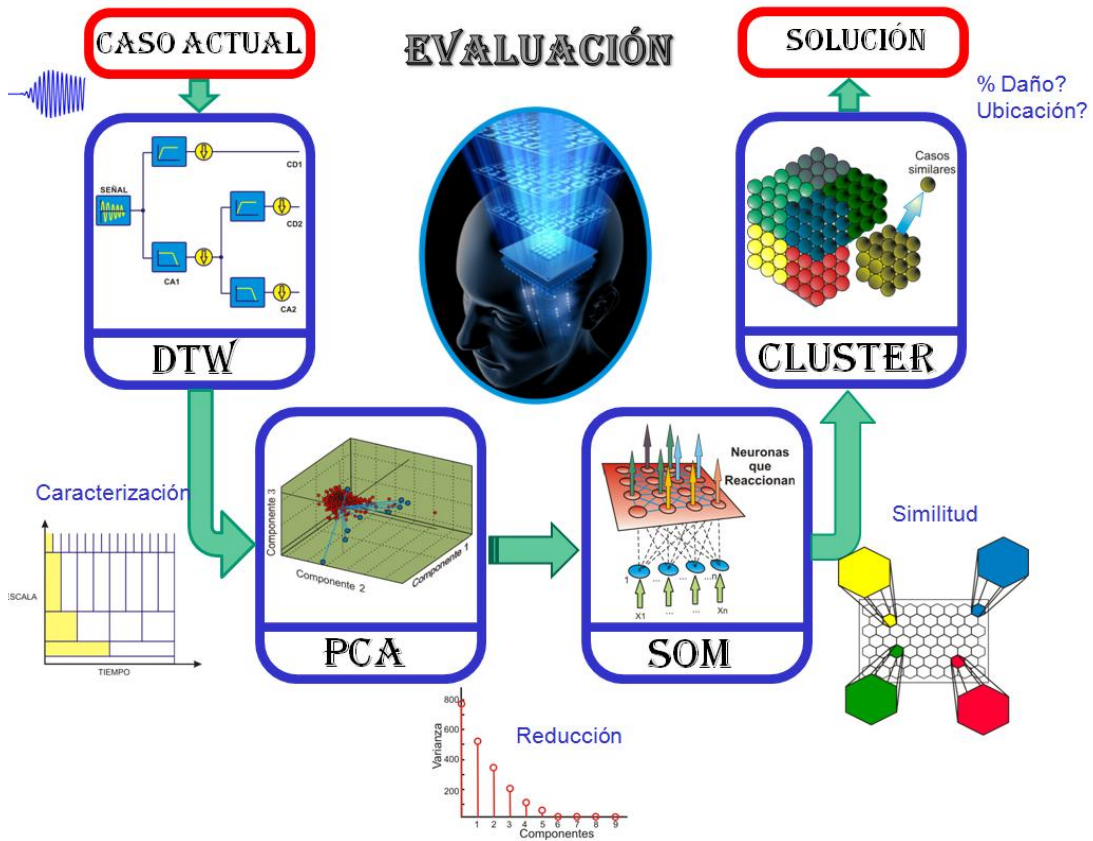


Figura 48. Esquema de evaluación del SE.

Ahora bien, otro aspecto relevante en el proceso de evaluación realizado por el sistema, son los tres criterios utilizados para seleccionar la información considerada como útil para la estimación de daños “diagnóstico”.

Un primer criterio, está relacionado con la selección de las redes neuronales a tener en cuenta para el proceso de inferencia del SE. De hecho, este criterio está sujeto al análisis de las correspondientes Distancias Euclidianas Mínimas (DEM) “una por cada red” y el establecimiento de un umbral de

selección ó valor máximo " u_1 ", el cual depende directamente del valor mínimo entre todas las distancias consideradas " $V_{\text{mín}}$ ".

En la figura 49, se observa un ejemplo de la selección de redes neuronales realizada a partir del criterio establecido, ubicadas dentro del rango de interés.

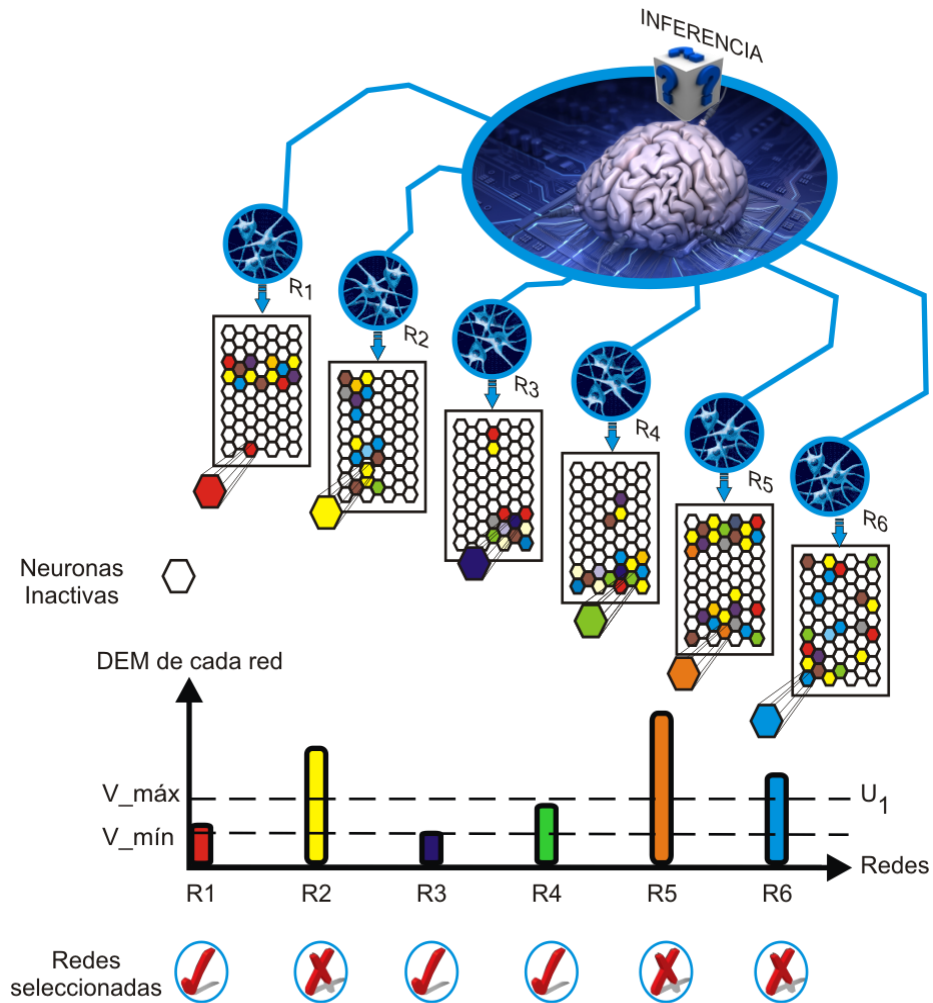


Figura 49. Selección de redes SOM relevantes en el proceso de inferencia del SE.

Posteriormente, teniendo como punto de partida los resultados obtenidos con base en el primer criterio, se realiza un proceso interno de selección a partir del grupo de neuronas activadas "Ganadoras" en cada una de las redes de interés. Esto último, referenciado a la distancia euclidiana mínima

correspondiente a cada uno de los grupos elegidos, estableciendo así el límite inferior del rango de selección.

Por otra parte, el límite superior del rango mencionado es establecido por el umbral " U_2 " de forma similar al definido en el primer criterio, el cual se establece a partir de la DEM de cada una de las red SOM como se observa en la figura 50.

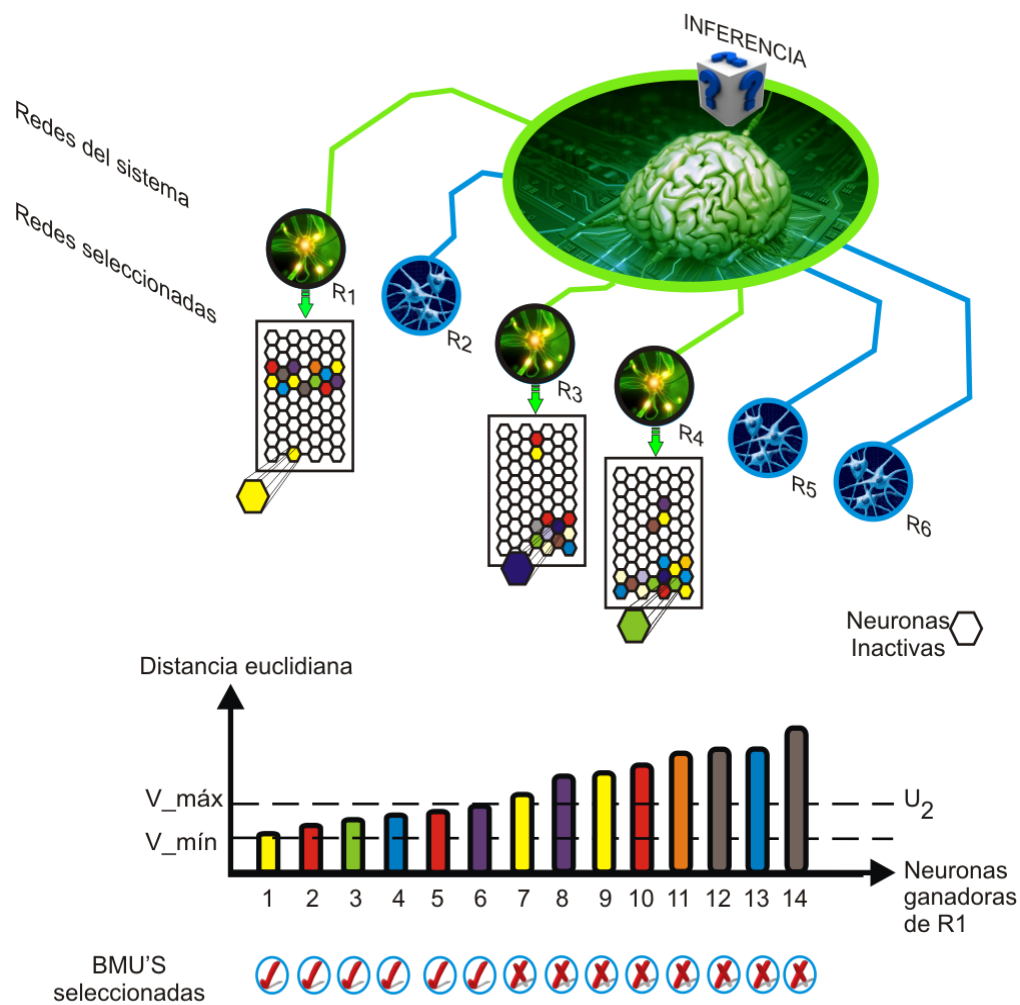


Figura 50. Selección BMU's relevantes en el proceso de inferencia del SE.

El último criterio utilizado en el proceso de inferencia del sistema experto, se establece teniendo como punto de referencia la información resultante de los dos procesos de selección descritos anteriormente. Su función es escoger la

información contenida dentro de cada neurona ganadora, correspondiente a la ubicación de escenarios de daño que han sido agrupados bajo un mismo BMU, debido a su alto grado de similitud.

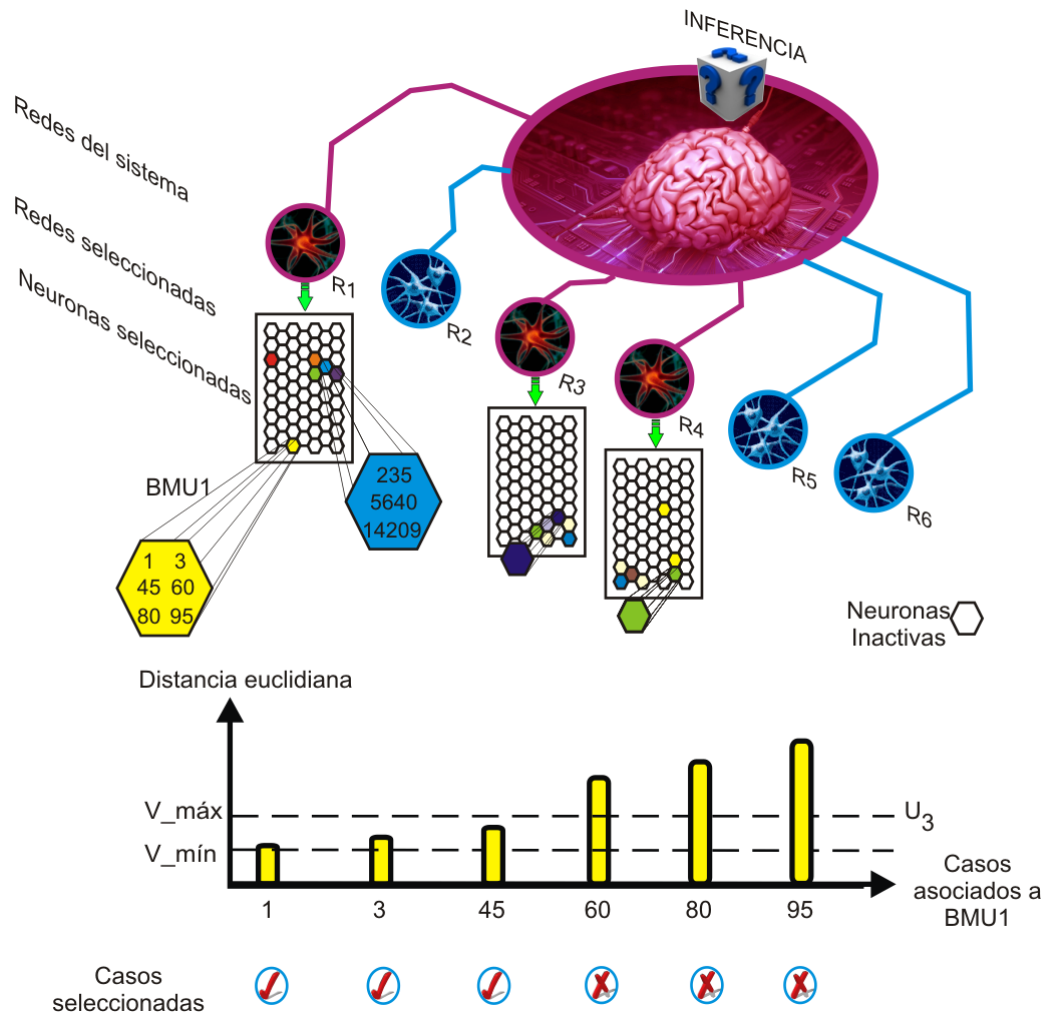


Figura 51. Selección de casos relevantes en el proceso de inferencia del SE.

En consecuencia, el tercer criterio realiza un proceso de selección en cuanto a casos “escenarios de daño” perteneciente a la misma neurona ganadora. Al igual que en los criterios establecidos anteriormente, la relevancia de la información está asociada con las distancias euclidianas correspondientes al grupo de casos analizado. Así mismo, el rango de discriminación está

condicionado tanto por la DEM en su parte inferior, como por el umbral “ U_3 ” en su parte superior tal y como se observa en la figura 51.

Una vez seleccionada la información relevante para efectuar el proceso de inferencia del sistema experto, se procede a realizar las estimaciones de ubicación “factores” y severidad del daño correspondiente al patrón de entrada del sistema “caso a evaluar”.

La primera estimación se realiza a partir de la ecuación 5-10. Donde *Dimension_e* corresponde a la ubicación del daño “factor” para el elemento de interés “e”, calculado a partir de un número *n* de casos, teniendo en cuenta las distancias euclidianas de las neuronas activas en una red específica y que están directamente asociadas dicho elemento.

$$Dimension_e = \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ej}} \quad \mathbf{5-10}$$

Finalmente, la estimación del porcentaje de daño “severidad” es calculada con base en las consideraciones de daño utilizada para el proceso de generación de la información y la expresión 5-11.

$$Severidad (\%) = \sum_{j=1}^n \frac{1/d_j}{(\sum_{i=1}^n 1/d_i)} * da\~{n}o_j \quad \mathbf{5-11}$$

Donde *d* , *n* y *daño* corresponden a la distancia euclidiana, el número de casos seleccionados y los porcentajes de avería de dichos casos.

6. VALIDACIÓN NUMÉRICA

En éste capítulo se explica la validación numérica del sistema experto (para la evaluación del estado de deformación geométrica en tuberías de gas, basado en los cambios de rigidez de la estructura) y su mecanismo de inferencia, teniendo como punto de partida la información referente a características de los diferentes escenarios de daño simulados “tanto ubicación, como severidad”, sus señales de aceleración correspondientes “posteriormente procesadas” y los modelos de generalización obtenidos a partir del entrenamiento de las redes SOM.

A continuación, de acuerdo con su disposición y funcionalidad dentro del esquema descrito en la figura 52, se realiza una descripción detallada para cada una de las etapas que intervienen en los proceso de entrenamiento y validación del sistema experto CBR.

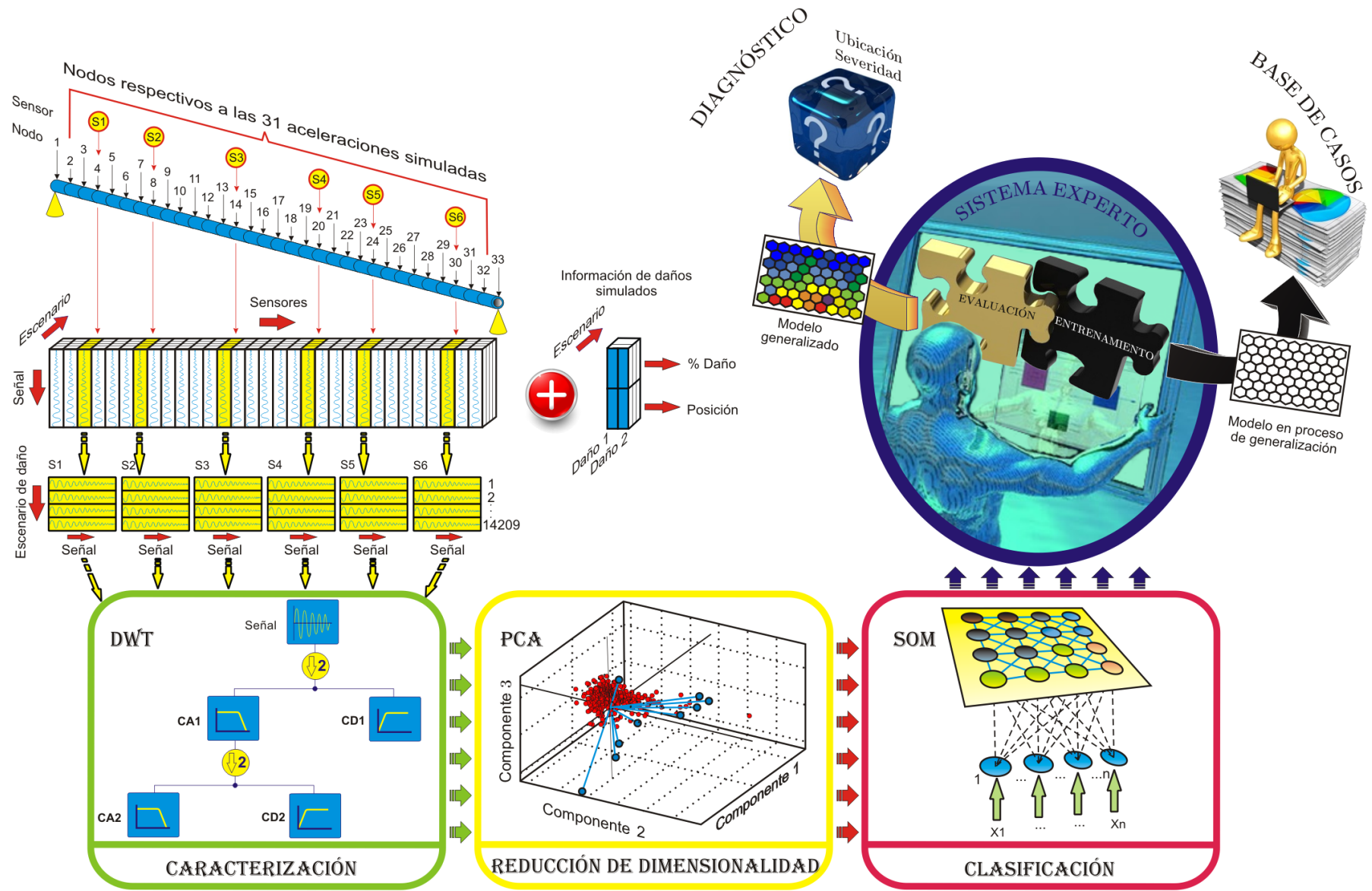


Figura 52. Esquema general de funcionamiento del sistema experto implementado

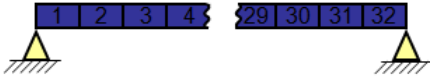
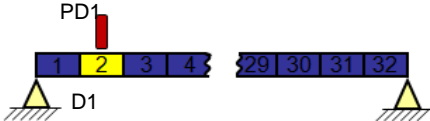
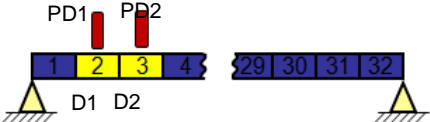
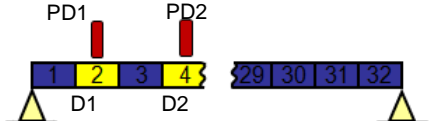

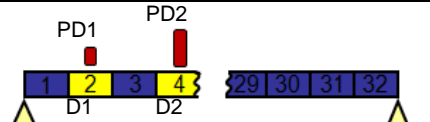
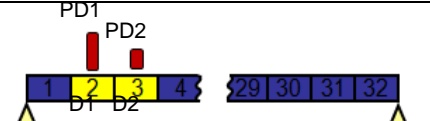
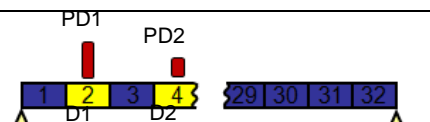
6.1 GENERACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN PARA LOS CASOS

Teniendo en cuenta la generación de las matrices M , K y C de la tubería, referenciadas en el capítulo 4, a partir de las características relacionadas en la tabla 7, se generaron 14209 escenarios de daño correspondientes a averías en máximo dos elementos de la tubería, localizados en puntos específicos de la estructura, de acuerdo con los 8 tipos de daños definidos en la tabla mencionada. Donde, las ubicaciones de los daños se especifican como D1 y D2. De forma análoga se denominan PD1 y PD2 a los porcentajes de daño referidos a las ubicaciones de daño estipuladas.

En conclusión, a partir de las características de la tubería descritas en la tabla 6 y la teoría correspondiente para el método de elementos finitos expuesta en la sección 2.1.3, se generaron las matrices de ensamble de masa y rigidez reducidas necesarias para el análisis del comportamiento dinámico de la estructura seleccionada.

Una vez determinadas las matrices M y K , se calculó la matriz de amortiguamiento del sistema, a partir de la expresión matemática descrita en ecuación 2-8. El procedimiento descrito anteriormente, se replicó durante el proceso de simulación, para cada uno de los escenarios de daño referenciados en la tabla 7.

Tabla 7. Características de los diferentes escenarios de daño considerados, para la generación de M y K.

ESCENARIO DE DAÑO SIMULADO				
Tipo	Configuración	Ubicación (Rango)	Descripción (Elementos afectados)	Dato específico para entrenar (porcentaje de daño de interés)
1		[1]	Ninguno "Estructura sin daño"	0%
2		[2-321]	1 elemento Elemento averiado: D1 Porcentaje avería: PD1	5% y 50%
3		[322-631]	2 elementos contiguos ED= (D1 y D2) (PD1=PD2)	Parejas de: 5% y 50%
4		[632-5281]	2 elementos no contiguos (D1 y D2) (PD1=PD2)	Parejas de: 5% y 50%
5		[5282-5560]	2 elementos contiguos (D1 y D2) (PD1<PD2)	Combinación de: 5% y 50%
6		[5561-9745]	2 elementos no contiguos (D1 y D2) (PD1<PD2)	Combinación de: 5% y 50%
7		[9746-10024]	2 elementos contiguos (D1 y D2) (PD1>PD2)	Combinación de: 50% y 5%
8		[10025-14209]	2 elementos no contiguos (D1 y D2) (PD1>PD2)	Combinación de: 50% y 5%

6.2 SIMULACIÓN DE ACELERACIONES PROPAGADAS EN LA ESTRUCTURA

Una vez obtenidas las matrices M , K y C de la estructura, como se explicó en el capítulo 4, se procedió a realizar la simulación de los diferentes escenarios de daño recreados a partir de la tabla 7, obteniendo 31 señales de aceleración propagadas en diferentes puntos de la estructura por cada caso considerado, como se describe en la figura 53.

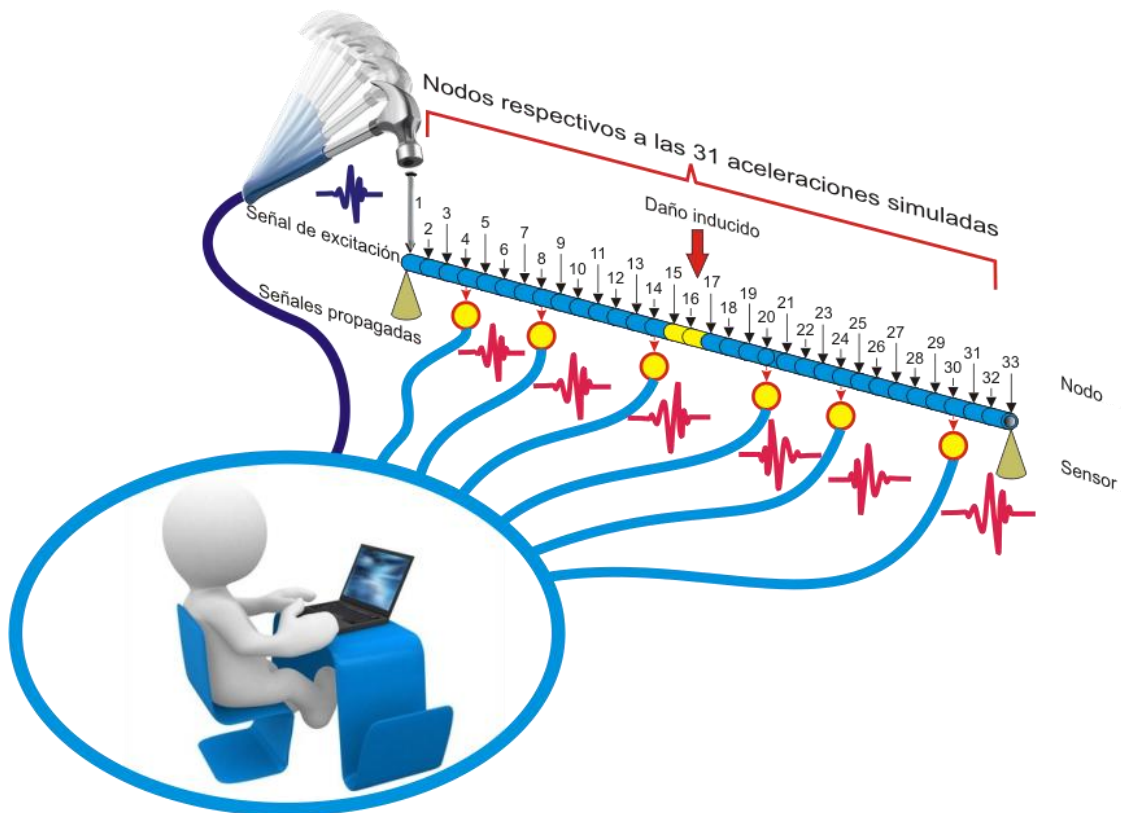


Figura 53. Excitación de la estructura y adquisición de señales propagadas.

Este proceso se realizó inicialmente con base en el diagrama de bloques de la figura 19 modificado, para el cual la salida del sistema estaba expresada en términos de señales de desplazamiento y velocidad.

No obstante, dado que en estudios de tipo experimental, usualmente se hace uso de acelerómetros para adquirir este tipo de señales, se determinó utilizar el esquema de la figura 19. Donde, la salida del sistema simulado corresponde a señales de aceleración para los diferentes escenarios de daño, obtenidas a partir de una señal de excitación basada en la ecuación 4-16 y el diagrama de flujo descrito en la figura 54. Donde, el tipo de daño a recrear, corresponde a descrito en la tabla 7.

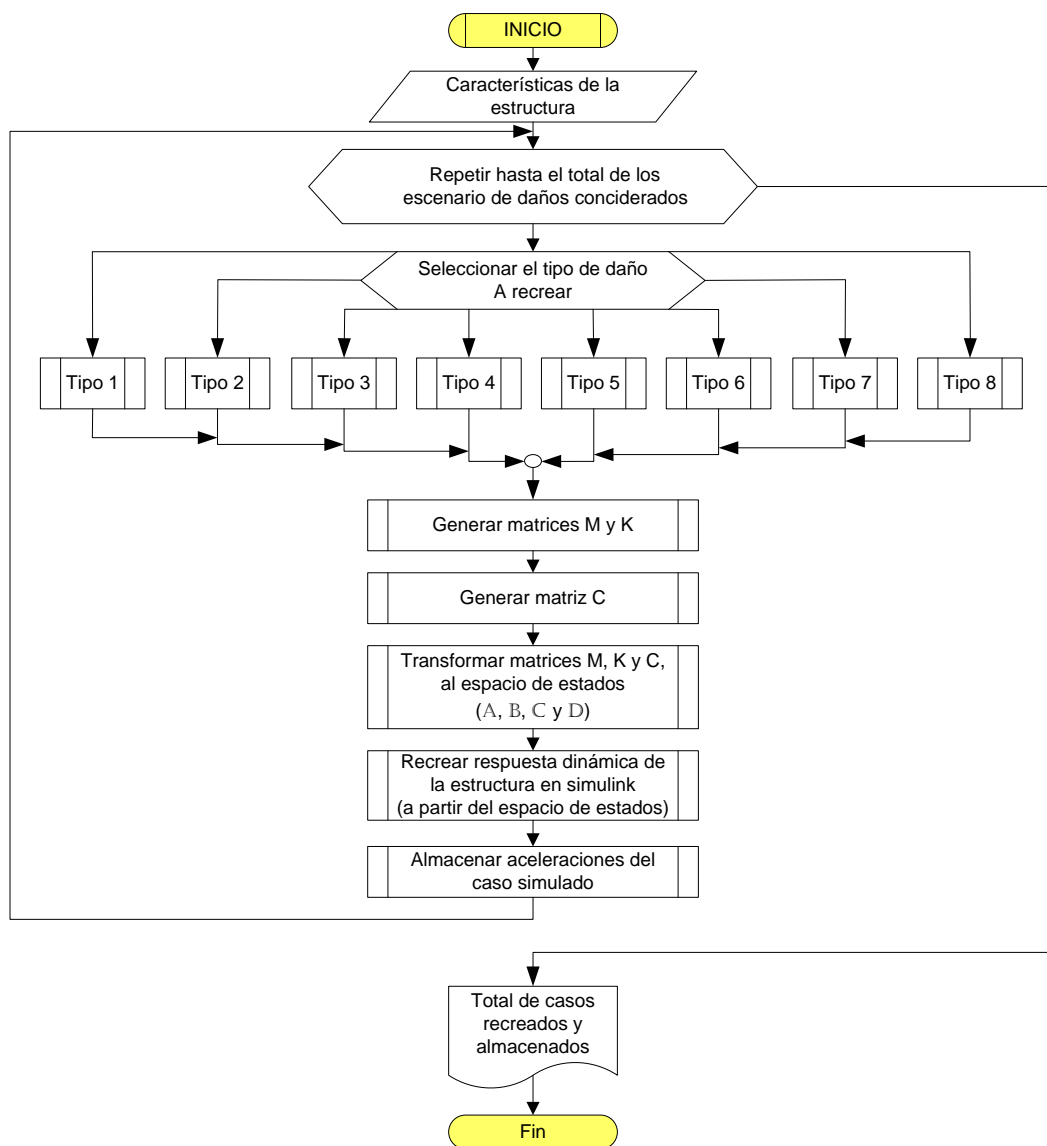


Figura 54. Diagrama de flujo simplificado, para la generación de señales de aceleración.

Dicha señal de excitación, fue generada con una frecuencia " f " de 58.06 Hz para el tercer modo de vibración de la tubería, bajo condiciones nominales "En ausencia de daños" y con un enventanado para $n = 14$ medios ciclos.

En síntesis, teniendo en mente la información referenciada en el capítulo 2, la metodología expuesta en capítulo 5, la figura 52, las características estructurales de la tubería descritas en la tabla 6 y las consideraciones mencionadas en el párrafo anterior, se recrearon 14209 escenarios de daño a partir de los tipos de daños considerados en la tabla 7, con un máximo de dos elementos averiados en la estructura, en diferentes ubicaciones y con porcentajes de daño "severidades" múltiplos de 5 para un rango de [0%-50%].

Sin embargo, debido al volumen de la información generada y las limitaciones en cuanto a memoria utilizada por Matlab en el proceso de simulación, se efectuó el almacenamiento de los datos en 29 paquetes de información dispuesta en forma matricial como se observa en la figura 55. Cada uno de ellos con un máximo de 500 escenarios de daño y 31 señales de aceleración con longitudes de 2501 muestras.

Así mismo, cada una de los paquetes generados, se asoció a una matriz que contiene información del porcentaje de daño y otra de ubicación del elemento afectado, correspondientes entre sí específicamente para un escenario de daño determinado.

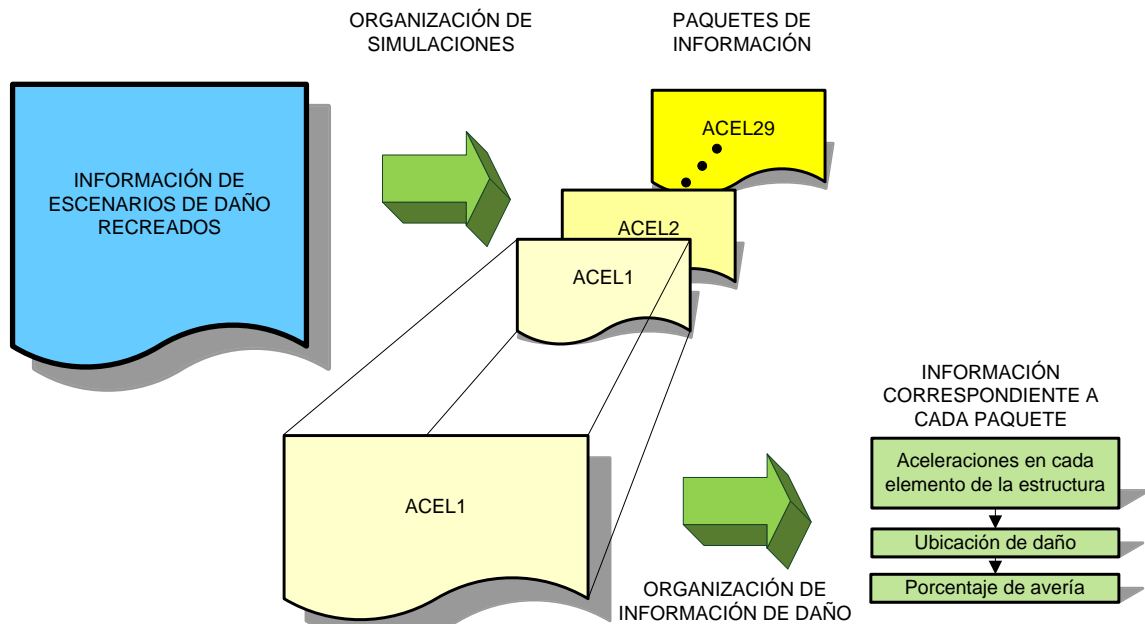


Figura 55. Organización de la información generada.

6.3 SELECCIÓN DE CASOS PARA ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN DEL SE.

Para realizar el procedimiento de selección de los casos de avería recreados, para los procesos de entrenamiento y validación del sistema experto, se implementó el código respectivo en MATLAB, el cual efectúa la clasificación de acuerdo al orden de simulación para cada uno de los escenarios de daño recreados "(1-14209)", cuya información fue almacenada sistemáticamente en los 29 paquetes de datos que conforman la librería de casos del SE CBR.

En primera instancia, antes de efectuar la selección de la información, se organizaron los 8 tipos de escenarios de daño considerados en la tabla 7.

La segunda etapa, efectuó una clasificación pseudo-aleatoria a partir de los escenarios de daño considerados como no críticos para el proceso de aprendizaje del sistema experto, hasta completar el número correspondiente al conjunto de datos de entrenamiento.

Posteriormente, la última etapa de la selección, recopiló la información referente a las situaciones de daño que no fueron incluidas en el conjunto de datos de entrenamiento, para conformar así el grupo de validación.

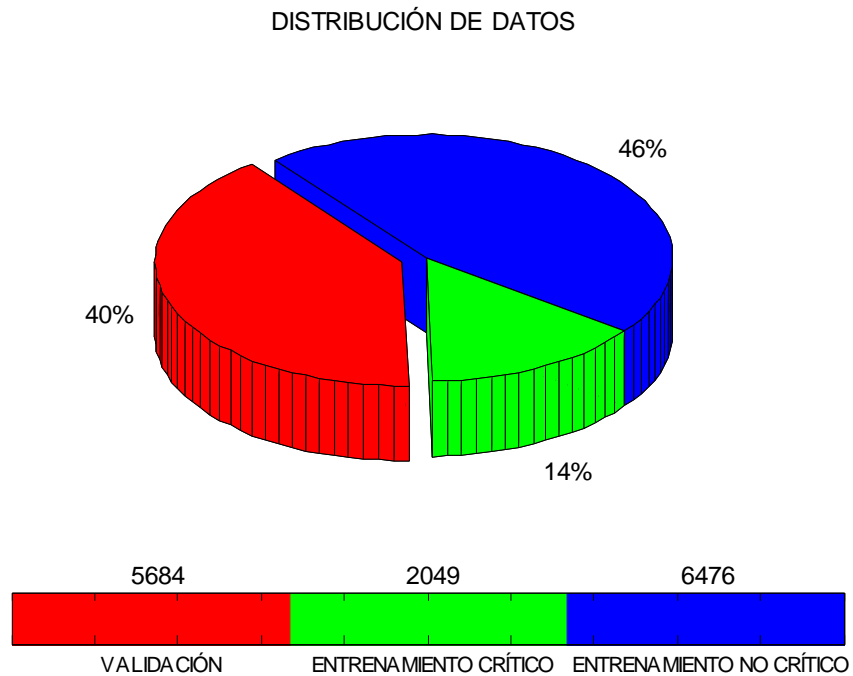


Figura 56. Organización de grupos de entrenamiento y validación, a partir de MATLAB.

En síntesis, la herramienta de selección implementada en MATLAB, permitió efectuar una clasificación pseudo-aleatoria del 70% la información para el proceso de entrenamiento del sistema experto y el 30% restante para la validación como se observa en los resultados de la figura 56. No obstante, dicha herramienta es flexible en cuanto a variación de los porcentajes de selección “a criterio del usuario”.

6.4 ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO

Para efectuar el proceso de entrenamiento del sistema experto se utilizaron 8525 casos y para el proceso de validación del mismo 5684 casos. El procesamiento de la información seleccionada para cada uno de los procesos, se realizó teniendo en cuenta las figuras 52, 57, 58, y lo descrito en la sección 6.5.

En el modo de entrenamiento del sistema experto, se obtuvieron los modelos de generalización a partir de los patrones seleccionados para la etapa de aprendizaje de las redes neuronales, como se explica en la sección 6.6, 6.7 y 6.8. Posteriormente en el modo de operación se utilizaron dichos modelos para efectuar una analogía entre los casos almacenados y el de prueba, como se explica en las secciones 6.9 y 6.10.

6.5 PROCESAMIENTO DE SEÑALES.

Como se mencionó en la sección 5.2, el procesamiento de las señales almacenadas en la librería de casos, permite reducir el número de patrones de entrada utilizados por la red SOM y por ende, la reducción del tiempo computacional en las etapas de entrenamiento y validación del SE CBR.

Por tal motivo, la sección correspondiente al procesamiento de señales se realizó teniendo en cuenta tres operaciones básicas observadas en la figura 52. Las cuales tienen como funciones principales: minimizar el efecto de las perturbaciones y establecer el grado de similitud con la señal inducida, caracterizar las señales producto de la medición “simulada” y finalmente, reducir la dimensionalidad de las señales caracterizadas, tal y como se observa en la figura 58.

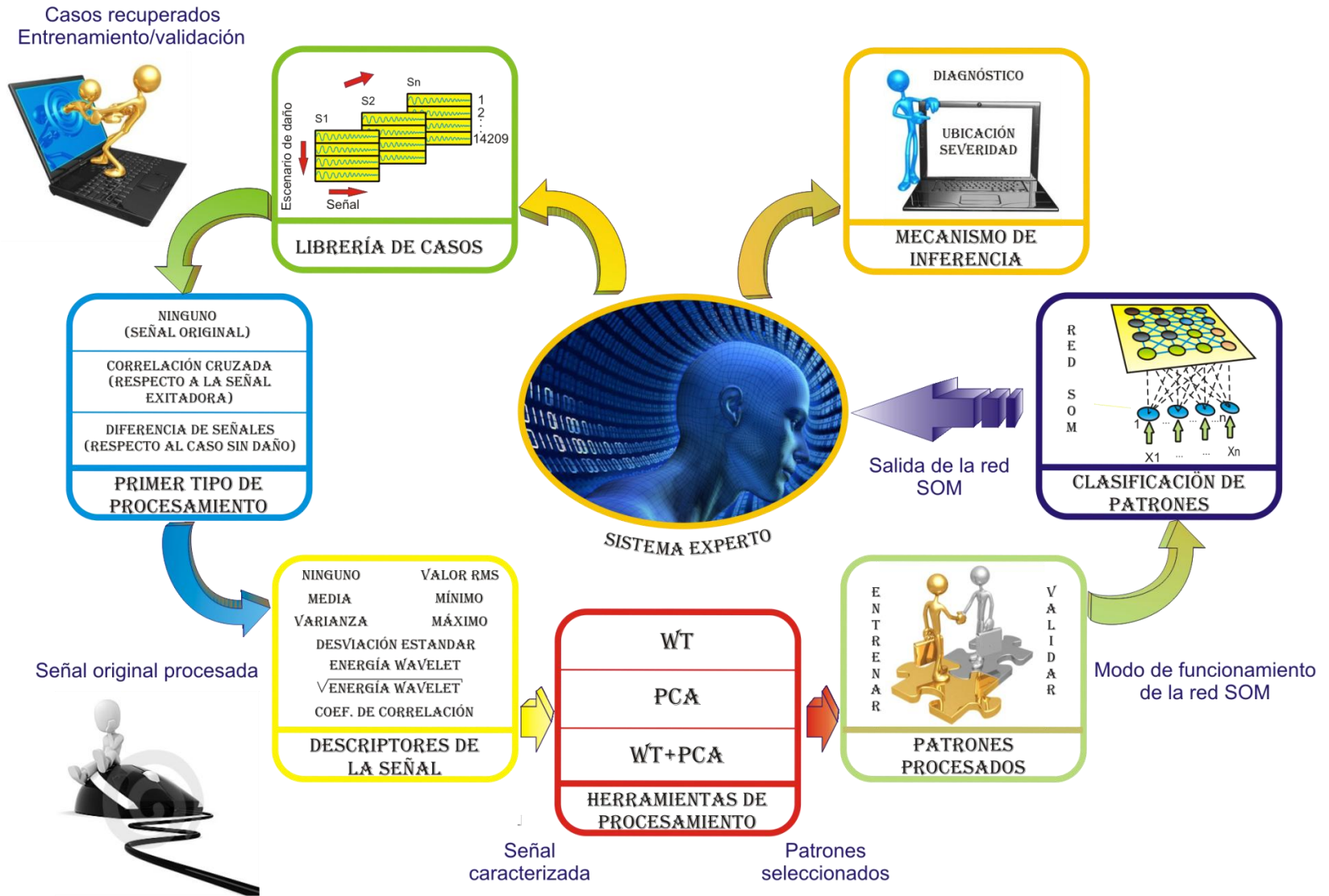


Figura 57. Entrenamiento y validación

Como resultado del procesamiento, se redujo la dimensionalidad de las señales propagadas “de 2048 muestras a 64 características y posteriormente a 4 componentes principales”, quedando así condensada la información base para el SE CBR.

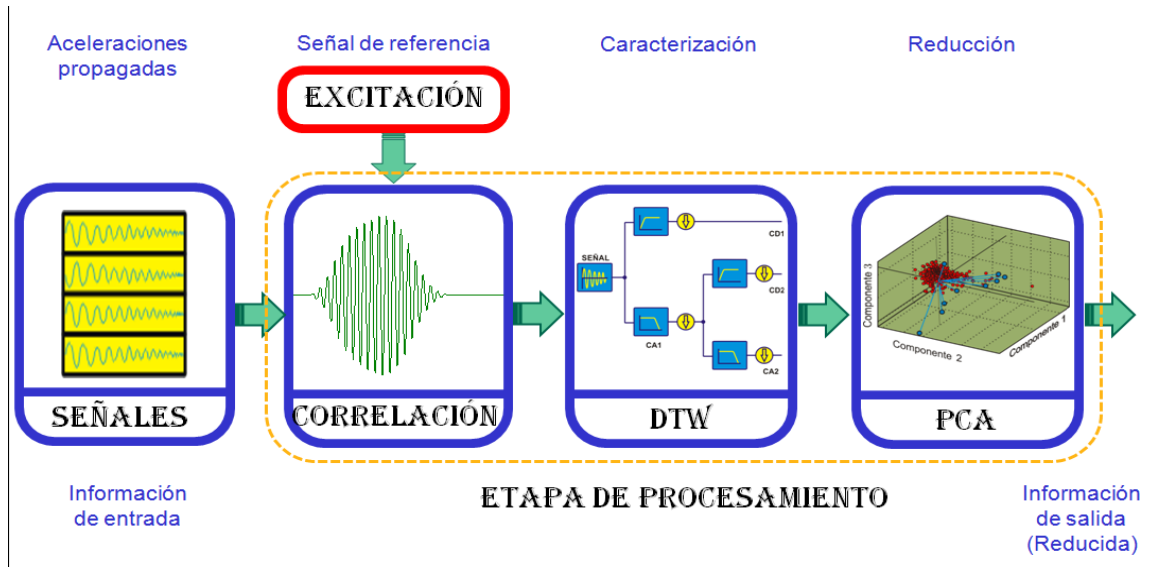


Figura 58. Procesamiento de las señales que conforman la librería de casos.

6.6 MODELOS DE GENERALIZACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO

Cada modelo de generalización del sistema experto, corresponde a una red neuronal, entrenada a partir de 8525 señales pertenecientes al grupo de entrenamiento para un sensor de interés, las cuales han sido previamente correlacionadas con la señal de excitación, caracterizadas mediante la DTW y reducidas en cuanto a dimensionalidad a partir de PCA. Por lo tanto, en el SE existe una SOM por cada sensor dispuesto para la monitorización de señales, sobre puntos explícitos de la estructura simulada.

En el caso específico de la tubería simulada, se efectuó un análisis multiresolución (MRA) con 8 niveles de descomposición para una wavelet madre “db7”, obtenido a partir de la señal de correlación, para cada punto de sensado, correspondientes a un escenario de daño determinado.

A continuación, se caracterizaron los coeficientes wavelet para cada nivel de aproximación y de detalle, a partir de la combinación de descriptores basados en estadísticos de la señal descompuesta como la media, la varianza, desviación estándar, energía wavelet, raíz de la energía wavelet y los valores RMS, máximo y mínimo de la señal procesada.

A partir de los estadísticos mencionados, calculados para el total del conjunto de escenarios de daño utilizados en el proceso de entrenamiento, se redujo la dimensionalidad de la información mediante la extracción las componentes principales a partir del criterio del 98%, referenciado en la sección 5.2.3.

Una vez terminada la etapa de procesamiento de la información seleccionada, se realizó el proceso de entrenamiento del sistema experto, a partir de la generación de un grupo de redes neuronales tipo SOM, con las características de la tabla 8.

Tabla 8. Características de entrenamiento de las redes SOM implementadas en MATLAB.

PARÁMETRO		VALOR SELECCIONADO	
NOMBRE DE LA CARACTERÍSTICA	EN TÉRMINOS DE LA SOM TOOLBOX	TIPO	EN TÉRMINOS DE LA SOM TOOLBOX
Algoritmo de entrenamiento	Algorithm	Lotes	Batch
Inicialización	Init	Lineal	Lininit
Malla	Shape	Plana	Sheet
Normalización	Normalization	Logística	Logistic
Tamaño de la red	Size	Grande	Big
Tipo de entrenamiento	Training	Largo	Long
Topología	Lattice	Hexagonal	Hexa

Finalmente, los modelos de generalización obtenidos con base en el proceso de entrenamiento, son almacenados para su posterior uso en la etapa de evaluación del sistema experto.

6.7 ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL MODELO DE GENERALIZACIÓN

La ubicación espacial de las neuronas pertenecientes a cada uno de los modelos de generalización, se efectuó teniendo en cuenta la organización tipo colmena. Esto último permitió agrupar por sectores las neuronas de acuerdo a la cercanía entre las mismas “distancia euclidiana”, de tal forma que al evaluar un caso de entrenamiento específico, todos los modelos activados se asociaron a un sector concreto de la colmena de acuerdo con la figura 59.

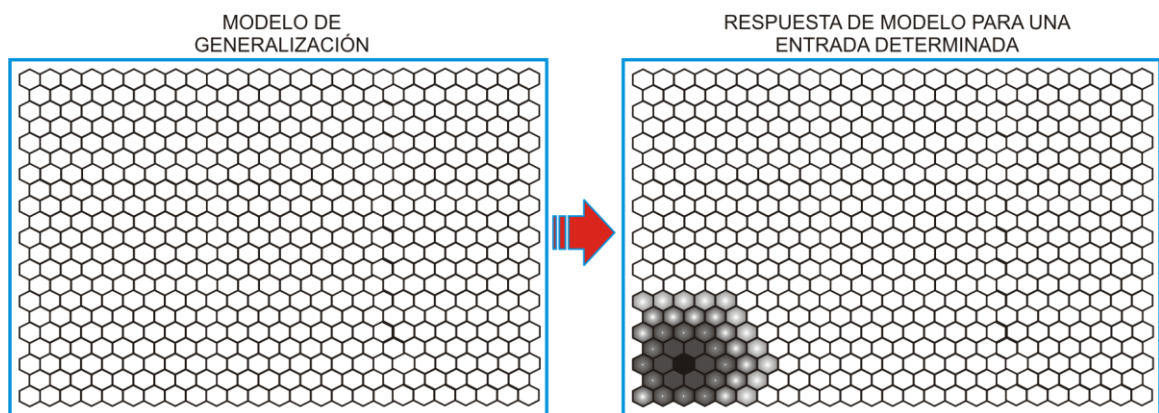


Figura 59. Organización tipo colmena.

6.8 LA BASE DE CASOS.

La base de casos fue construida teniendo como punto de referencia la información correspondiente a cada escenario de daño recreado en cuanto a ubicación, severidad y características reducidas de las señales procesadas, como se observa en la figura 60.



Figura 60. Organización de la información, para la generación de la base de casos.

De igual manera, allí se almacenaron tanto la información del modelo de generalización, como la utilizada por PCA para la centralización de los datos “como se explica en el capítulo de la metodología”, ambas producto del proceso entrenamiento del sistema experto.

6.9 VALIDACIÓN

En el proceso de validación del sistema se utilizaron 5684 casos, los cuales fueron procesados como explica en la figura 57, teniendo en cuenta las señales en el dominio del tiempo o descriptores característicos de la misma, como fueron: La desviación estándar, la media la varianza, el valor RMS, la energía wavelet, la raíz cuadrada de la energía wavelet, el valor máximo, el valor mínimo y el coeficiente de correlación.

Posteriormente al proceso de caracterización, se redujo la dimensionalidad de los patrones de validación “correspondiente con el número de patrones utilizados en el entrenamiento”. Cada uno de los patrones seleccionados

para este proceso, fue evaluado a partir del modelo de generalización obtenido en el modo de entrenamiento como se explican en los resultados del capítulo 7.

6.10 INFERENCIA DEL SISTEMA EXPERTO.

Un aspecto importante del sistema experto es evaluar su funcionamiento en la detección de daños, a partir de la información procedente del grupo seleccionado para la validación. Para tal fin, se utilizó la metodología expuesta en la sección 5.2.3, de acuerdo con los procedimientos que se explican a continuación.

El primer paso para verificar el funcionamiento de dicho sistema, fue evaluar casos utilizados en el proceso de entrenamiento y observar su desempeño en cuanto a diagnóstico “ubicación y severidad” del caso seleccionado, a partir de su representación gráfica como se observa en la figura 61.



Figura 61. Diagnóstico del sistema experto.

Posteriormente, se efectuó el mismo proceso de verificación, con el conjunto de casos designados para la etapa de evaluación dicho sistema.

En consecuencia, se efectuaron múltiples pruebas las cuales se sintetizan en el capítulo correspondiente al análisis de resultados.

6.11 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO (GUI)

Los procesos descritos en la figura 52, están directamente vinculados con la interfaz gráfica implementada en MATLAB, que se observa en la figura 62.

En primera instancia, La interfaz permitió seleccionar los diferentes parámetros utilizados tanto en la etapa de entrenamiento del sistema experto, como en la de validación del mismo, como fueron: la longitud de las señales, las ubicaciones de los sensores, la familia y subfamilia de la wavelet madre utilizada, el tipo de procesamiento a realizar y la selección de los grupos de entrenamiento y validación creados a partir del total de casos disponibles.

De forma consecutiva a lo anterior, y de acuerdo con cada uno de los procesos mencionados, la GUI también permitió efectuar el procesamiento de las señales correspondientes a los diferentes escenarios de daño previamente simulados y almacenados.

En segundo lugar, creo los modelos de generalización a partir de los datos designados para la fase de entrenamiento del SE y posteriormente los almacenó con el fin de disponer de la información necesaria para el proceso de validación del sistema.

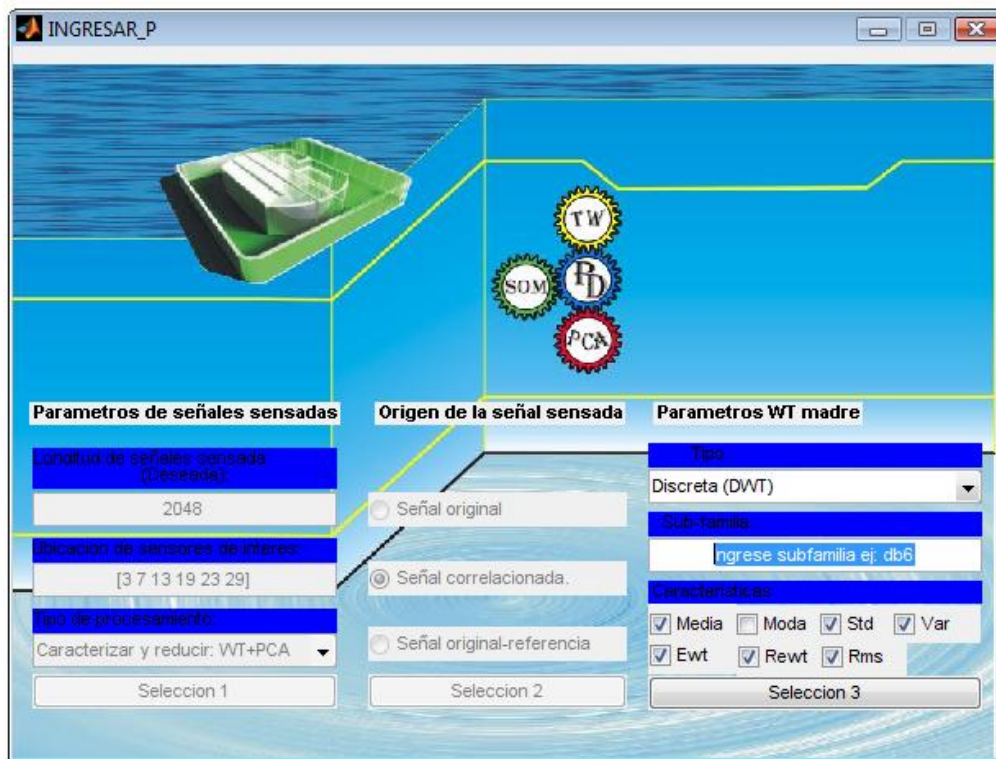


Figura 62. Interfaz gráfica.

Finalmente, la interfaz de usuario permitió efectuar el diagnóstico del daño simulado, a partir de su mecanismo de inferencia, relacionado en la sección 6.10 y lo explicado en la sección 5.3.3. En el ANEXO F, se describen detalladamente, cada una de las funciones realizadas por la GUI para la detección de deformaciones geométricas en tuberías simuladas, a partir del SE de CBR implementado.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En primera instancia, de acuerdo a las pruebas reportadas en los anexos A, B, C, D y E se simularon daños estructurales del tipo variación de rigidez del material y se midió su efecto dinámico a partir de las aceleraciones en diferentes puntos de la estructura, comprobándose la hipótesis que al realizar variaciones de rigidez se afectan las frecuencias modales de la estructura analizada.

Por otra parte, se utilizó como herramienta adicional de detección, el método de variación de curvatura de las formas modales, con el que se pudo verificar efectivamente los daños inducidos en la estructura en cuanto a ubicación, pero no en cuanto a la cuantificación de la severidad del daño.

Adicionalmente, se observó que la mejor detección se realiza utilizando los tres primeros modos de vibración de la estructura, y que un número mayor de ellos, dificulta la detección (Ver Anexo E).

Teniendo como punto de referencia los 14209 escenarios de daño recreados, se realizó el procesamiento observado en la tabla 9, tanto para el conjunto de casos como el de validación. Dicho procesamiento, permitió reducir considerablemente el número de patrones utilizados por la red neuronal, de un valor máximo de 4096 muestras para la correlación de la señal en el tiempo, a un número no superior a 73 patrones.

De igual manera, para la señal de aceleración sin procesar “Original” y la diferenciada entre el caso sin daño y los casos con averías, se redujo el número de patrones de 2048 muestras a un mínimo de 2 patrones. Ésta información se relaciona a continuación, de forma detallada en la tabla 9.

Tabla 9. Tamaño de patrones utilizados en el entrenamiento y validación del sistema experto

TIPO DE SISTEMA EXPERTO	TIPO DE ANÁLISIS			SEÑAL UTILIZADA			DESCRPTORES										No. DE PATRONES SELECCIONADOS	PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE PATRONES (%)	TIEMPO DE PROCESAMIENTO (s)	
	WT	PCA	WT+PCA	ORIG	CORR CRUZ	DIFER	MED	STD	VAR	RMS	EW	REW	MÁX	MÍN	CORR COEF	MEDIAN A			ENTRENAR	VALIDAR
1		X		X													4	99.8047	7697.1956	3525.6871
2		X		X			X	X	X	X			X	X	X		3	99.8535	317.3279	253.8328
3		X			X		X	X	X	X			X	X	X		3	99.9268	724.6281	484.5131
4		X				X	X	X	X	X			X	X	X		2	99.9023	780.6276	453.803
5	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X		65	96.8262	805.7701	560.8851
6	X				X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		73	98.2178	1168.1831	794.0972
7	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		65	96.8262	873.208	608.5953
8			X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X		5	99.7559	835.2559	804.5544
9			X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		4	99.8047	1137.429	1018.1359
10			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		5	99.7559	968.1996	893.701
11	X				X					X			X	X	X		17	99.5850	600.0422	438.0707
12	X					X				X			X	X	X		19	99.0723	892.9895	610.2106
13*			X			X	X	X	X	X	X				X		10	99.5117	816.7919	484.0351

CONVENCIONES DE LA TABLA

WT: Transformada Wavelet; **PCA:** Análisis de Componentes Principales; **ORIG:** Señal Original; **CORR CRUZ:** Correlación Cruzada; **DIFER:** Diferencia entre la Señal sin daño y la señal con daño; **MED:** Media; **STD:** Desviación Estándar; **VAR:** Varianza; **rms:** Raíz cuadrática media; **EW:** Energía Wavelet; **REW:** Raíz de la Energía Wavelet; **MÁX:** Máximo; **MÍN:** Mínimo; **CORR COEF:** Coeficiente de Correlación .

* Resultado obtenido a través de tesis de pregrado [95] codirigida por el autor.

Otro aspecto importante, son los tiempos de procesamiento de la aplicación implementada para caracterizar la información de los conjuntos de casos empleados en el modo de entrenamiento y validación del sistema experto. A partir de los resultados referenciados en la tabla 9, en la columna de tiempos, se observa, con la adición de cada bloque de procesamiento “Correlación, diferencia, descriptores, WT, PCA”, el incremento del tiempo de ejecución de la aplicación. No obstante, dicho incremento es compensado en los procesos de entrenamiento y validación de las redes SOM, debido a que el reducido número de patrones procesados, mejora en gran medida los tiempos utilizados para los dos modos de operación de las redes SOM.

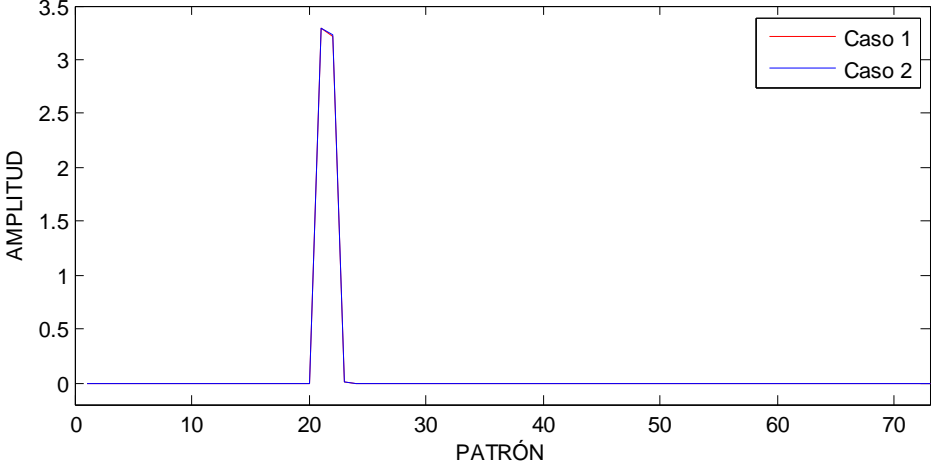
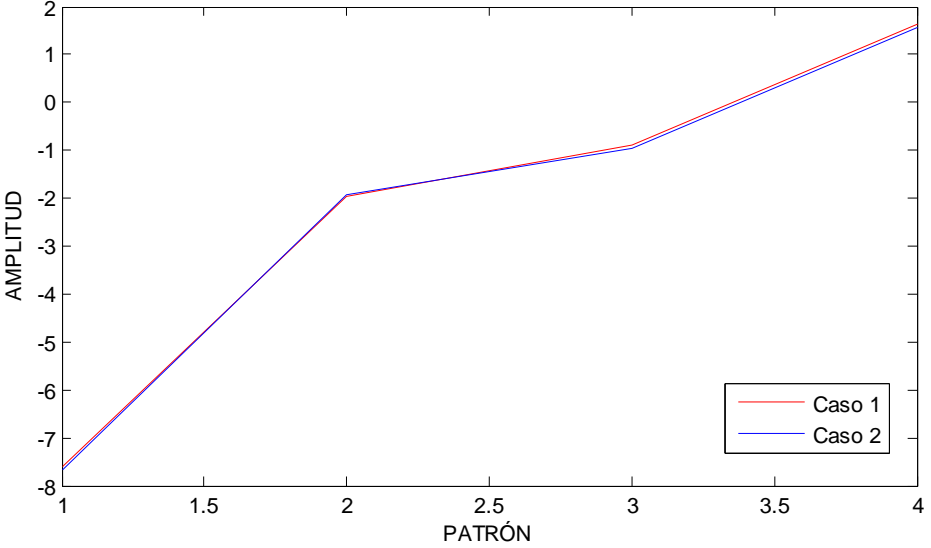
Por otra parte, a partir de las pruebas realizadas con los sistemas sugeridos en la tabla 9 “del 2 al 12”, se observa que uno de los mayores tiempos de procesamiento es el utilizado por el sistema basado en WT+PCA+CORRELACIÓN. Los patrones obtenidos en dicha configuración de procesamiento son claramente distinguibles, lo cual optimiza el proceso de entrenamiento y validación de la red neuronal, como se relacionan en los resultados obtenidos en la tabla 10.

Teniendo en cuenta lo anterior, es deseable que los patrones introducidos a las redes neuronales sean claramente distinguibles entre casos para generar un buen modelo de generalización en el entrenamiento y producir una buena respuesta en la validación.

Sin embargo, un gran número de patrones no es un indicador válido para asegurar un buen entrenamiento de la red, lo que se aplica a los observados en los sistemas 5, 6 y 7 de la tabla 9, donde, los 65 ó 73 patrones obtenidos tienen un alto grado de similitud, no deseable para el entrenamiento de las SOM.

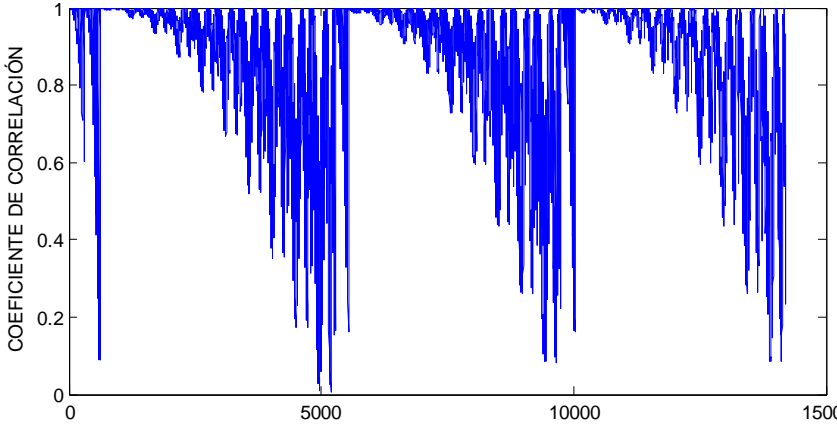
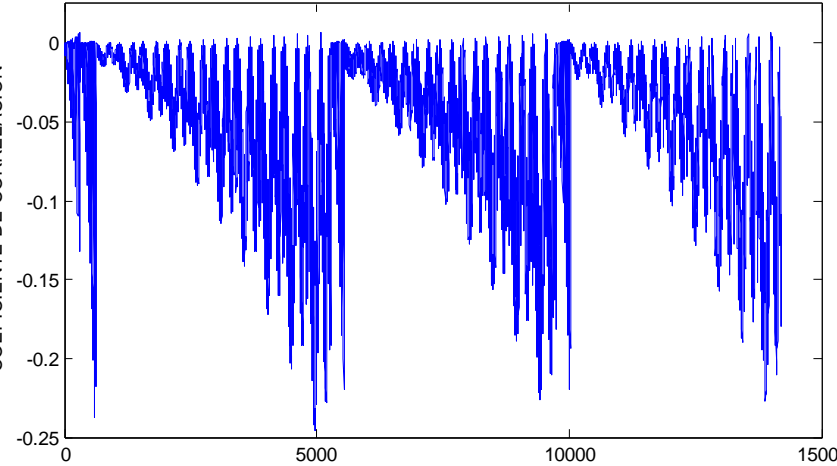
Un grupo de patrones reducido como el observado en el sistema 9 de la tabla 10, son claramente distinguibles para los diferentes casos de daño simulado, pese al alto grado de similitud entre las señales de aceleración originalmente obtenidas.

Tabla 10. Patrones de entrenamiento obtenidos a partir de WT y WT+PCA.

SISTEMA	PATRONES OBTENIDOS "BASADOS EN LA TABLA 9"
6	<p data-bbox="581 590 1333 642">PATRONES DE ENTRENAMIENTO PARA SEÑALES CORRELACIONADAS, CARACTERIZADAS CON WT</p> 
9	<p data-bbox="570 1142 1312 1194">PATRONES DE ENTRENAMIENTO PARA SEÑALES CORRELACIONADAS, CARACTERIZADAS CON WT+PCA</p> 

Una medida de dicho grado de similitud, es la obtenida a partir del coeficiente de correlación de señales simuladas para cada sensor, la que justifica el uso de las herramientas de procesamiento utilizadas en la caracterización y reducción de dimensionalidad de las señales procedentes de la librería de casos. En la tabla 11 se relacionan dichas medidas, que evidencian la similitud entre casos cercanos pertenecientes a un mismo tipo de escenario de daño (Ver tabla 7).

Tabla 11. Medida de similitud entre los diferentes escenarios de daño simulados

SISTEMA	MEDIDAS DE CORRELACIÓN PARA CASOS SIMULADOS (OBTENIDAS EN UN MISMO SENSOR)
1	<p data-bbox="532 787 1356 835">CORRELACIÓN ENTRE LA ACELERACIÓN DEL SENSOR 1 PARA EL CASO SIN DAÑO Y LOS CASOS CON DAÑO</p> 
2	<p data-bbox="532 1302 1372 1350">CORRELACIÓN ENTRE LA SEÑAL DE EXCITACIÓN Y LAS ACELERACIONES MEDIDAS EN EL SENSOR 1 PARA DIFERENTES CASOS</p> 

Por otra parte, el desempeño del sistema experto depende en primera instancia de cinco parámetros fundamentales “explicados en las figuras 49, 50 y 51”, que permitieron seleccionar la información de la base de casos utilizada por el sistema de inferencia para efectuar el diagnóstico del daño estructural a evaluar “Simulado a partir de las variaciones porcentuales de rigidez” (ver tabla 12).

Tabla 12. Efecto de la variación de umbrales en los resultados de evaluación del sistema experto implementado.

PRUEBA N°	ACIERTO (%)	BMUS	UMBRAL (THR)	UMBRAL (U1)	UMBRAL (U2)	UMBRAL (U3)
1	76.15	10	0.7	1.5	1.07	1.5
2	76.44	4	0.7	1.5	1.07	1.5
3	76.91	2	0.7	1.5	1.07	1.5
4	80.75	10	0.5	1.5	1.07	1.5
5	80.82	4	0.5	1.5	1.07	1.5
6	81.54	2	0.5	1.5	1.07	1.5
7	81.13	2	0.5	1.5	1.07	1.7
8	80.39	4	0.5	1.5	1.07	1.7
9	80.28	10	0.5	1.5	1.07	1.7
10	76.98	2	0.7	1.5	1.07	1.7
11	80.75	2	0.5	1.5	1.07	1.1
12	80.93	4	0.5	1.5	1.07	1.1
13	80.82	10	0.5	1.5	1.07	1.1
14	81.09	10	0.5	1.5	1.1	1.1
15	77.11	10	0.5	1.5	1.5	1.1
16	82.01	4	0.5	1.5	1.5	1.1
17*	77.62	4	0.7	1.5	1.07	1.5

* Resultado obtenido a través de tesis de pregrado [95] codirigida por el autor.

A partir, de resultados experimentales de la tabla 12-15, se determinó que el mejor modelo generado para el sistema experto implementado, está basado en una configuración WT+PCA, fundamentada en la diferencia entre la señal del caso sin daño y la de los 14208 casos con daño “respectivas para cada sensor de interés y los parámetros fijados para la ejecución de la prueba 16.

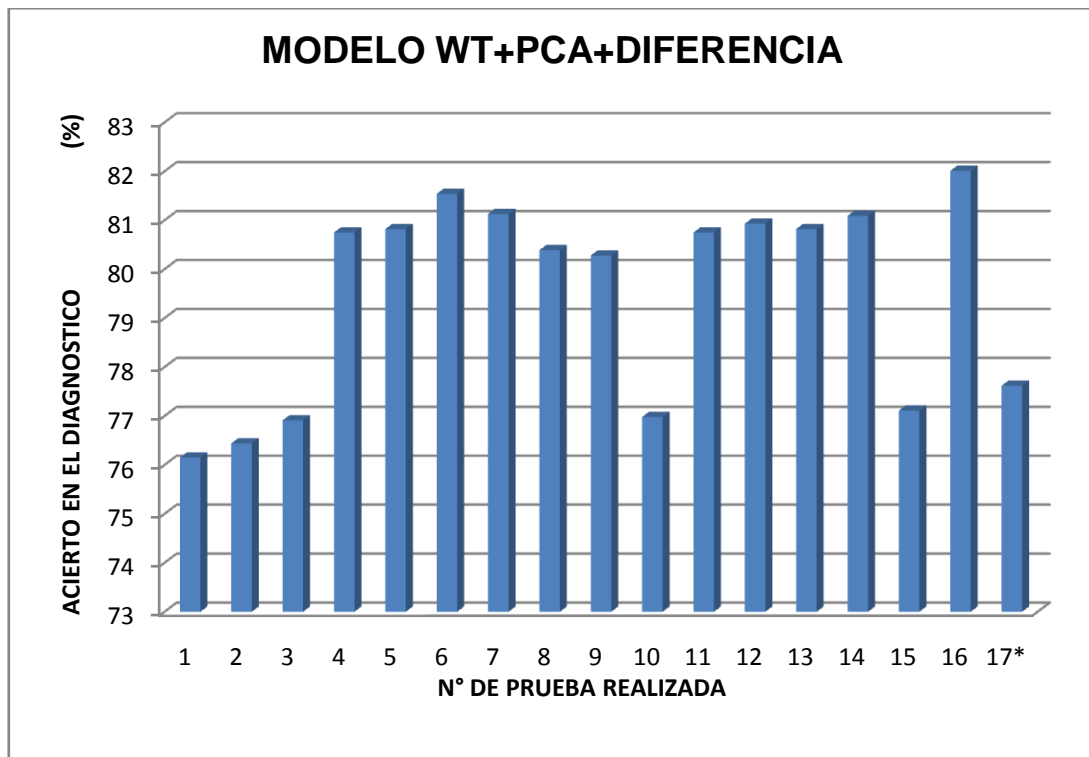


Figura 63. Desempeño del sistema experto a partir de variación de los umbrales.

Dicho modelo, fue seleccionado a partir de las pruebas reportadas en las tablas 13, 14 y 15, donde se relacionan las diferentes herramientas matemáticas utilizadas en la etapa de procesamiento de las señales pertenecientes a la librería de casos y correspondientes a los 6 sensores de interés.

En segunda instancia, se debe tener en cuenta que hay otra serie de parámetros que afectan favorable o adversamente al sistema experto como son:

- La wavelet madre seleccionada para efectuar el MRA.
- Los descriptores utilizados en la caracterización de la señal.
- El orden de las operaciones “descritas en la columna denominada SEÑALES UTILIZADAS de la tabla 9”, respecto a las configuraciones de procesamiento de la señales “relacionadas en la columna denominada TIPO DE ANALISIS de la misma tabla”.
- El proceso de segmentación de la información imersa en cada de los coeficientes de detalle y aproximación de la señal.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la tabla 13, no es recomendable realizar el análisis de la señal original en el tiempo o a partir descriptores de la misma, aplicando una configuración PCA como única herramienta de procesamiento utilizada por el sistema experto implementado. Esto último, debido a que no se aprovecha adecuadamente la información contenida en la señal (se le resta importancia a eventos que pueden ser analizados más detalladamente, mediante una descomposición escala-tiempo) y por ende, los patrones de entrenamiento no son claramente distinguibles para la red SOM y dificultan obtener un buen modelo de generalización, lo cual se refleja en el bajo desempeño del sistema en el diagnostico de daños.

Tabla 13. Pruebas realizadas para la configuración del sistema experto basado en PCA

SISTEMA	TIPO DE ANÁLISIS			SEÑAL UTILIZADA			DESCRIPTORES									SEGMENTACIÓN		THR	PATRONES GENERADOS	ACIERTO (%)
	WT	PCA	WT+PCA	ORIG	CORR CRUZ	DIFER	MED	STD	VAR	RMS	EW	REW	MÁX	MÍN	CORR COEF	CON	SIN			
101		X		X													X	0.7	4	21.85
302		X		X			X	X	X	X			X	X	X		X	0.7	3	18.74
303		X			X		X	X	X	X			X	X	X		X	0.7	3	6.47
304		X				X	X	X	X	X			X	X	X		X	0.7	2	9.85

Por otra parte, teniendo en cuenta los resultados de la tabla 14, se observa que la configuración WT presenta mejores resultados con la descomposición de la señal original o con la diferencia de los coeficientes wavelet (es decir, entre la señal de referencia “caso sin daño” y los casos de daño considerados).

Al igual que en la tabla 13, la adición de la operación de correlación cruzada al sistema experto referenciado en la tabla 14, afecta adversamente su desempeño, ya que presenta el porcentaje de acierto más bajo, pero La introducción de la etapa de segmentación de los coeficientes permite mejorar sistemáticamente su respuesta.

Finalmente, en la configuración WT+PCA, se evidenció mejores resultados en el proceso de diagnóstico de daño efectuado a partir del uso de 10 componentes principales, dicha selección se realizó inicialmente de forma automáticamente a partir del criterio del 98%, sin embargo, un número muy reducido de componentes principales “patrones de entrada de la red SOM” impiden la obtención de un buen modelo de generalización.

Tabla 14. Pruebas realizadas para la configuración del sistema experto basado en WT

SISTEMA	TIPO DE ANÁLISIS			SEÑAL UTILIZADA			DESCRPTORES								SEGMENTACIÓN		COEFICIENTES WT USADOS		WT MADRE	CORR CRUZ O DIFER, DESPUES DE WT		THR	PATRONES GENERADOS	ACIERTO (%)	
	WT	PCA	WT+PCA	ORIG	CORR CRUZ	DIFER	MED	STD	VAR	RMS	EW	REW	MÁX	MIN	CORR COEF	CON	SIN	DET+ APROX		DET	SI				NO
201	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X		X		X		db6		X	0.7	65	27.83
202	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		db6	X		0.7	280	46.72
203	X			X							X				X			X		db6	X		0.7	31	33.76
204	X			X							X				X			X		db4	X		0.7	17	27.7
205	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		db4	X		5	178	67
206	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X		X		X		db6		X	0.7	73	7.04
207	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		db4	X		0.5	210	8.09
208	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		db6	X		0.5	220	30.59
209	X			X							X				X			X		db4	X		0.5	73	12,92
210	X			X							X				X			X		db6	X		0.5	82	40.21
211	X						X	X	X	X	X	X	X	X		X		X		db6		X	0.5	65	23.01
212	X						X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		db4	X		0.5	327	42.86
213	X						X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		db4	X		0.5	318	68.08
214	X						X				X				X			X		db4	X		0.5	35	57.52

Tabla 15. Pruebas realizadas para la configuración del sistema experto basado en WT+PCA

SISTEMA	TIPO DE ANÁLISIS			SEÑAL UTILIZADA			DESCRPTORES								SEGMENTACIÓN		COEFICIENTES WT USADOS		WT MADRE	CORR CRUZ O DIFER, DESPUES DE WT		THR	PATRONES GENERADOS	ACIERTO (%)	
	WT	PCA	WT+PCA	ORIG	CORR	DIFER	MED	STD	VAR	RMS	EW	REW	MÁX	MÍN	CORR COEF	CON	SIN	DET+ APROX		DET	SI				NO
301			X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		db6		X	0.7	5	15.76
302			X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		db4		X	0.5	10	53,59
303			X	X							X					X			X	db4	X		0.5	9	41.46
304			X	X							X					X			X	db4	X		0.5	10	58.85
305			X	X							X					X			X	db4	X		0.5	10	60.24
306			X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		db4		X	0.7	4	13.02
307			X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		db6		X	0.7	5	9.9
308			X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	db4	X		0.5	10	6,72
309			X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	db6	X		0.5	10	19,72
310			X		X						X					X			X	db6	X		0.5	10	37.76
311			X		X						X					X		X		db4	X		0.5	10	15.57
312			X		X						X					X			X	db4	X		0.5	10	14.58
313			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		db6		X	0.7	7	44,59
314			X			X					X					X			X	db4	X		0.7	10	76.44
315			X			X					X					X		X		db4	X		0.5	10	81,94
316			X			X					X					X		X		db6	X		0.5	10	75.34
317			X			X					X					X			X	db4	X		0.5	10	82.01

8. CONCLUSIONES, APORTES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 CONCLUSIONES

- Se generaron numéricamente en Matlab, casos de comportamiento dinámico para una tubería sujeta a vibraciones mecánicas inducidas, en condiciones de operación normal y de deformaciones “variaciones de rigidez”. El modelo simplificado utilizado, se implemento a partir del método de elementos finitos y se representó en espacio de estados con el que se obtuvieron las señales de aceleración en los diferentes elementos de la tubería.
- Se adaptó una metodología de evaluación de daño estructural fundamentada en Razonamiento Basado en Casos “diseñada para la evaluación de cambios de masa”, para la evaluación de deformaciones geométricas en tuberías.
- Se validó numéricamente, la efectividad de la metodología usando las herramientas computacionales de Matlab, sobre modelos lineales unidimensionales de tuberías rectas sin derivaciones.
- Se utilizó el método de curvatura de las formas modales para detectar las ubicaciones de los daños recreados y contrastarlas con sus respectivos valores, utilizados en la etapa de simulación para generar los diferentes escenarios de daños considerados. Así mismo, se observo que la mejor detección se realiza utilizando los tres primeros modos de vibración. Un número de mayor de ellos, introduce información que puede ser interpretada como una posible ubicación de daño.

- Para el sistema experto implementado, se observó que al aplicar operaciones como la diferencia (entre la señal de referencia “caso sin daño” y los diferentes casos con daño) o la correlación cruzada (efectuada entre la señal excitadora y las señales propagadas) antes de efectuar el procesamiento de las señales con la TW, se afecta en gran medida y de forma adversa el porcentaje de acierto del sistema en cuanto a la inferencia del daño se refiere. Por tanto, a partir de los resultados obtenidos, se recomienda efectuar en primera instancia la etapa de procesamiento con la TW y posteriormente las operaciones de correlación o diferencia entre los coeficientes wavelet de cada nivel de descomposición correspondientes entre las señales analizadas.
- El número de patrones reducidos, seleccionados a partir de PCA y del criterio del 98% (u otros criterios como Kaiser y Jolliffe) contienen la mayor parte de información de los descriptores de las señales analizadas. Sin embargo, no son un indicador válido para asegurar que el sistema obtenga su mejor desempeño. De hecho, a partir de las pruebas realizadas se comprobó que un número muy reducido de patrones o muy elevado, afectan de forma desfavorable el desempeño del SE. Adicionalmente, se encontró que el número de componentes (patrones tanto para fase de entrenamiento como la de validación) que dan un mejor resultado en el proceso de inferencia es de 10 (éste número es determinado a partir de la respuesta del SE).
- El sistema experto implementado funciona adecuadamente en bloque y es sensible a cualquier modificación en su esquema de procesamiento. Por tanto, se dificultó observar el aporte individual de los mecanismos de procesamiento en algunas de las configuraciones utilizadas en las pruebas efectuadas, especialmente las que emplean la operación de correlación cruzada. Esto último, debido al principio de

funcionamiento de las redes SOM (Basado en el principio de similitud de patrones para su agrupación), por tanto no se recomienda utilizar la operación de correlación cruzada para el análisis de las señales de la base de casos, dado que se establece una medida de similitud entre señales dificultándose así, la etapa de generalización de la SOM por ser patrones claramente no distinguibles.

- En cuanto al uso de los coeficientes wavelet de aproximación y detalle en la generación de los patrones de entrenamiento/validación, se observó que el porcentaje de acierto del SE decrece, cuando se utiliza la información correspondiente a los coeficientes de aproximación. Esto se debe a que para bajas frecuencias, el aporte de energía es casi invariable a partir de los descriptores seleccionados para las diferentes pruebas.
- La introducción de una etapa de la segmentación para la información contenida en los coeficientes wavelet pertenecientes a cada nivel de descomposición, mejora notablemente el desempeño del SE. Lo descrito anteriormente, es consecuencia de un análisis más detallado de los eventos presentes en plano escala-frecuencia de los coeficientes wavelet de cada nivel de descomposición. Por tanto, se aprovecha el potencial del MRA de la TW en la detección de eventos para la señal analizada, a partir del proceso de segmentación.
- Se adicionó una etapa de procesamiento a la metodología utilizada como punto de referencia, que consistió en aplicar la operación de correlación cruzada y la diferencia, para minimizar el efecto de perturbaciones en las mediciones de aceleración y de forma simultánea establecer el grado de similitud entre la señal de excitación y las propagadas o entre la señal sin daño y los diferentes escenarios de daño simulados.

- Se detectaron deformaciones geométricas “simuladas a partir del efecto producido por las variaciones porcentuales de rigidez” en tuberías a partir de la inferencia de un sistema experto de Razonamiento Basado en Casos. Construido a partir de la correlación-cruzada, TW, PCA y redes SOM.

- Mediante el uso de descriptores de las señales sensadas se logro reducir el tiempo de computo de entrenamiento del sistema experto para la configuración WT+PCA, respecto al análisis de la señal original utilizando las configuraciones de PCA o WT de forma independiente. Ésto último se debió, a que la operación conjunta de las herramientas matemáticas WT y PCA, utilizadas en el procesamiento de las señales pertenecientes a la librería de casos, permitieron sintetizar la longitud de las medidas de aceleración “2048 muestras para los casos de la señal original o diferencia y 4097 para el caso de correlación cruzada” a un máximo de 10 patrones de entrada para las redes SOM.

8.2 APORTES

Se destaca la participación en el “XIV Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial – STSIVA 2009”, realizado por la Universidad Tecnológica de Pereira, los días 9, 10 y 11 de septiembre de 2009 en Pereira, Risaralda, y la generación de un (1) artículo para las respectivas memorias de la ponencia bajo registro ISBN 978-958-722-047-6.

Dentro de los aportes del presente trabajo de investigación, se destaca la obtención del modelo de tubería de gas simplificado basado en elementos finitos, utilizado como punto de partida para recrear los diferentes escenarios de daño. De igual manera, se destaca la adaptación de una metodología de tesis doctoral [3] diseñada para la detección de cambios de masa, aplicada a la detección de cambios de rigidez.

Como productos directos del presente trabajo de investigación se destaca la realización de cuatro (4) proyectos de pregrado [[95]-[98]], enfocados en el área de “monitorización de salud estructural”, tres (3) de ellos a nivel de simulación [[95], [97], [98]] y uno (1) a nivel de prototipo experimental [96]

Adicionalmente como productos directos de las tesis de pregrado finalizadas (en la modalidad de artículo), se destaca la generación de dos (2) artículos, en proceso de revisión para futuras publicaciones [[95], [96]].

8.3 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Respecto del modelo:

En primera instancia, se propone mejorar el modelo de elementos finitos, utilizado para la generación de librería de casos, extendido a tres dimensiones.

Respecto al sistema experto:

En segundo lugar, para efectuar los procesos de entrenamiento y validación del sistema experto, es recomendable trabajar con descriptores característicos de las señales de la librería de casos. Esto último con el fin de reducir el tiempo de cómputo empleado por dicho sistema, tanto en la obtención del modelo de generalización, como en el uso del mismo en la fase de evaluación.

En tercera instancia, se propone utilizar otras herramientas matemáticas para efectuar el procesamiento de la información tales como, máquinas de soporte vectorial, PLS (Partial Least Square) y CDA (Curvilinear Distance Analysis), con el fin de evaluar el desempeño del sistema experto con la introducción de dichas herramientas.

Respecto a la validación experimental:

Finalmente, se propone validar experimentalmente la metodología expuesta “validada numéricamente” a un modelo de laboratorio, para dar continuidad a la etapa siguiente de la investigación trazada, utilizando para ello los resultados del prototipo piloto generado en los productos directos de la investigación aquí reportada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IL'KAEV R. I., Zelesnev V. E, Aleshin V. V, Klishin G. S. Numerical simulation of gas pipeline networks. Theory, computational implementation, an industrial application. Scientific edition. Editorial URSS, Moscow. 2005.
- [2] BEGAMBRE Carrillo Oscar Javier. Dissertação Mestrado “Detecção de dano a partir da resposta dinâmica da estrutura: estudo analítico com aplicação a estruturas do tipo viga”. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil 2004. Págs: 16-48, 44, 61-63, 83, 86,127-136.
- [3] MUJICA Luis Eduardo. Doctoral Tesis “A hybrid approach of knowledge-based reasoning for structural assessment”. Girona España, 2006. Págs: 1-15.
- [4] KOLAKOWSKI Przemyslaw, Mujíca Luis Eduardo, Rodellar José, Vehí Josep. A Hybrid Approach of Knowledge-Based Reasoning for Structural Assessment. Smart Materials and Structures. Institute of Physics Publishing Impact Factor. Volume 14, Number 6, December 2005. Págs: 1554-1562.
- [5] YANG ShiuH Kuang, LEE Jie Hung, LEE Ping Horn, CHENG Jyin Wen. The effect of the longitudinal welded support on the pipe for guided wave propagation. 12th A-PCNDT 2006. Asia-Pacific Conference on NDT, 5th–10th Nov 2006, Auckland, New Zealand. 2006. Págs: 1-6.
- [6] MÚJICA Luis Eduardo, Vehí Josep, Rodellar José. Non-destructive testing for assessing structures by using soft-computing. Artificial neural networks – ICANN 2006, LNCA 4132, Part II. Springer Belin / Heidelberg. 2006. Págs: 982-991.
- [7] AI Changsheng, Zhao Honghua, Ma Rujian Dong Xueren. Pipeline damage and leak detection based on sound spectrum LPCC and HMM. Proceedings of the sixth international conference on intelligent systems design and applications (ISDA'06). IEEE computer society. 2006. Págs: 1-6.
- [8] TRACY M. and Chang F.K. Identifying impacts in composite plates with piezoelectric strain sensors, part 1: theory. Journal of intelligent material systems and structures, 9(11). Nov 1998. Págs: 920-928.

- [9] KOLAKOWSKI Przemyslaw, MUJICA Luis Eduardo, VEHI Josep. Comparison of two software tools for damage identification: gradient-based vs. case-based approach. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, July 2005. Pages 103-110.
- [10] KHOO Lay Menn, Mantena P. Raju, Jadhav Prakash. Structural damage assessment using vibration modal analysis. Structural health monitoring. Sage Publications, Vol. 3(2).2004. Págs: 177–194.
- [11] MUJICA Luis Eduardo, VEHI Josep, RUIZ Magda L., VERLEYSSEN Michel, STASZEWSKI Wieslaw J., WORDEN Keith. Multivariate statistical process control for dimensionality reduction in structural assessment. Mechanical systems and signal processing. Volume 22, issue 1. Science Direct, Elsevier science Ltd. 2008. Págs: 155-171.
- [12] KOLAKOWSKI Przemyslaw, Mujica Luis Eduardo, Vehí Josep. Two Approaches to Structural Damage Identification: Model Updating versus Soft Computing. Journal: Journal of Intelligent Material Systems and Structures, SAGE Publications. Volume 17, Number 1, January 2006. Págs: 63-79.
- [13] MUJICA Luis Eduardo, Vehí Josep, Rodellar Jose, Kolakowski Przemyslaw, Worden Keith. Impact damage detection in aircraft composites using knowledge-based reasoning. Structural Health Monitoring Vol. 7, N°3. SAGE Publications. 2008. Págs: 215-230.
- [14] Págs:
- [15] TIRATSOO J. N. H. Pipeline pigging technology, 2nd Edition, Butterworth Heinemann, Houston Tx. United States of America. 1999. Págs: 3-29, 205-211.
- [16] MAL Ajit, Ricci Fabrizio, Banerjee Sauvik, and SHIH Frank. A conceptual structural health monitoring system based on vibration and wave propagation. Structural health monitoring, VOL. 4 N°3. 2005. Págs: 283 - 293.
- [17] HARRIS Chuck, TDW ILI Services. Advances in pipeline assessments. Pipeline & gas journal/August 2006. Tulsa, USA. 2006. Págs: 35-38.
- [18] . ás:
- [19] . Págs: 337-344.

- [20] BEUKER Thomas and Rahe Florian. High-quality smart-pig inspection of dents, compliant with the us code of federal regulations. Business briefing: oil & gas processing review 2005, technology & services. 2005. Págs: 1- 4.
- [21] NICHOLSON Barry, Smart utility pig technology in pipeline operations. Pigging products and services Association. Weatherford Pipeline & Specialty Services, Edinburgh, UK. 2004. Págs: 1-12.
- [22] [A] TAO Jin, Peiwen Que and Zhengsu Tao Designing and Signal Processing of Intelligent Inspection. Pig Applying Magnetic Flux Leakage Methods. Proceedings of the 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation Chengdu China. August 2004. Págs: 815-819.
- [23] ZELESNEV V, Aleshin V, Kobayakov V. Analysis of corroed pipeline segments using in-line inspection data. The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing “Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering”, Portorož, Slovenia. September 1-3. 2005. Págs: 383-389.
- [24] NESTLEROTH J. Bruce, BATTELLE Pipeline in lines inspection. Challenges to NDT.ECNDT 2006. 9th European Conferencia on NTD.- Berlin, Germany. 2006. Págs 1-9.
- [25] VAHAVIOLOS Sotirios J, WANG David, CARLOS Mark F. Advanced acoustic emission for on-stream inspection of petrochemical vessels. ECNDT 2006 - We.3.6.5. 2006. Págs: 1-12.
- [26] CZYZ Jaroslaw, McClarty Edward. Prevention of pipeline failures in geotechnically unstable areas by monitoring with inertial and caliper in-line inspection. BJ Pipeline Inspection Services and Duke Energy Gas Transmission. Canada. New Orleans, USA. 2004. Págs: 1-6.
- [27] STANISLAW A Lukasiewicz. Sun Chao, Jaroslaw A Czyz. Adeeb Samer. Calculation of strains in dents based on high resolution in-line caliper survey. Proceedings of IPC2006 6th International Pipeline Conference September 25-29, 2006, Calgary, Alberta, Canada. 2006. Págs: 1-6.
- [28] MICHAILIDES Phil, DEIS Tood. NPS 8 GEOPIG: inertial measurement and mechanical calliper technology, proceeding of International Pipeling Conference IPC. V1. Calgary, Alberta, Canadá. 1998, pág. 373-378.
- [29] CZYZ Jaroslaw, PETTIGREW Chris, PINO Hector, GÓMEZ Rubén. Multi-pipeline geographical information system based on high accuracy

inertial surveys. Proceedings of IPC 2000. International Pipeline Conference. Calgary, October 2000. Págs: 1-5.

- [30] CAMERINI Claudio, MARINHO Carla, FRANZOI Aldo, IBAJÉ Sergio, FREITAS Miguel, WEID Jean Von Der. Feeler pig – a new tool for multi-size pipeline inspection. ECNDT 2006 - Tu.3.1.4. 2006. Págs: 1-8.
- [31] LIU G R, Quek S S. The finite element method: a practical course. Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford, UK. 2003. Págs: 24-28, 58-64, 90-106.
- [32] .
- [33] Y and Págs: 7-34,143-145.
- [34] KOCHESERAII Sadegh Babaii. Finite element modelling of plastic collapse of metallic single mitred pipe bends subject to in-plane bending moments. International Journal of Pressure Vessels and Piping 81. 2004. Págs: 75–81.
- [35] HATCH Michael R. Vibration simulation using Matlab and Ansys. Chapman & Hall/CRC, United States of America. 2001. Chapters 1, 5, 7, 10-13.
- [36] ROBINSON M, KOCHESERAII S B. Parametric survey of upper and lower bound limit in-plane bending moments for single mitred pipe bends of various geometries. International Journal Pressure Vessel Piping 2002; 79. Science Direct, Elsevier science Ltd. 2002. Págs: 135-140.
- [37] LIJIAN Yang, WENJUN Gu, SONGWEI Gao. The application of wavelet in petroleum pipeline detection. Shenyang University of Technology, Shenyang, China. 2004. Págs: 1-4.
- [38] DAVIDSON Robert, Halliburton pipeline and process. An introduction to pipeline pigging. Pigging Products & Services Association (PPSA). UK. PPSA Aberdeen Seminar 2002. Págs: 1-12.
- [39] LIM T Y, Ratnam M M, Khalid M A. Automatic classification of weld defects using simulated data and an MLP neural network. Insight Vol 49 No 3. Learned and professional society publishers. 2007. Págs: 154-159.
- [40] CARVALHO A. A, Rebello J. M A. A, Sagrilo L.V. S, Camerini C. S, Miranda I. V. J. MFL signals and artificial neural networks applied to

detection and classification of pipe weld defects. NDT&E International 39, Elseiver. 2006.

- [41] BEGAMBRE Carrillo Oscar Javier. Tese Doctoral: "Algoritmo híbrido para avaliação da integridade de estrutural: uma abordagem heurística". Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil 2007. Págs: 36-48.
- [42] CHRISTENSON, Richard E. Doctoral Thesis: "Semiactive control of civil structures for natural hazard mitigation: analytical and experimental studies". University of Notre Dame, Department of civil engineering and geological science. Notre Dame, USA. 2001. Págs: 42-53, 193-199.
- [43] GOLNARAGHI Farid, Kuo Benjamin C. Automatic Control Systems. Ninth edition. Jhon Wiley & sons INC. New Jersey, USA. 2009. Págs: 147-152, 682-686, 696-698.
- [44] VILLAMIZAR Mejía Rodolfo. Doctoral Thesis: "Robust Control of Systems Subjected to Uncertain Disturbances and Actuator Dynamics". Universidad de Girona, Department d'electrònica i Informàtica. Girona, España. 2005. Págs: 63-67.
- [45] INMAN, Daniel J. Engineering vibration. Prentice Hall Inc, New Jersey, USA. 2001. Págs: 15-23, 433-475.
- [46] OÑATE Eugenio. Structural analysis with the finite element method: linear statics. Vol. 1: Basis and solids. First edition. Springer and CIMNE. Barcelona, Spain. 2009. Págs: 8-30, 69-76.
- [47] URIBE Escamilla Jairo. Análisis de estructuras. 2da edición. Editorial Escuela Colombiana de ingeniería. Bogotá, Colombia. 2002. Págs: 8-10, 413-491.
- [48] ZIENKIEWICZ O. C., Taylor R. L., Zhu J.Z. "The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals". Sixth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann. London, UK. 2005. Págs: 3-10, 563-583.
- [49] GERE James M. Mecanica de materials. Sexta edición. Thomson learning. México DF, México. 2006. Págs: 3-70, 144, 193-201, 234-241, 343-344, 541-551, 891-896.
- [50] CHANDRUPATLA, Tirupathi R; Belegundu, Ashok D. Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería. Segunda edición. Prentice Hall hispanoamericana. México DF, México.1999. Págs: 11, 57-75, 238-251, 375-395.

- [51] MADENCI Erdogan and Guven Ibrahim. The finite element method and applications in engineering using Ansys. Springer Science-Business Media, LLC. New York, USA. 2006. Págs: 5-19, 621-623.
- [52] GUYAN Robert J. Reduction of stiffness and mass matrices. AIAA Journal. Vol. 3, N°2. 1965. Pg 380.
- [53] KIDDER Robert L. Reduction of structural frequency equations. AIAA Journal. Vol. 11, N°6. 1973. Págs: 892.
- [54] OLARTE Villamizar J. G. Propuesta de mejora para reducir los costos de operación en el área de inspección de tubería usada de perforación en una empresa de servicios petroleros. Tesis Licenciatura. Ingeniería Industrial. Departamento de Ingeniería Industrial y Textil, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas, Puebla. Mayo 2004. Capítulo 2.
- [55] PANETA D P. D., Diaz A. A., Pappas R. A., Taylor T. T., Francini R. B., and Johnson K. I. Mechanical Damage Characterization in Pipelines. Pacific Northwest National Laboratory. October 2001. Págs: 1-7.
- [56] SANDOVAL Cáceres W., Villamizar Mejía R., Begambre Carrillo., “Evaluación de Deformaciones Geométricas en Estructuras Basado en Vibraciones- Análisis Numérico Preliminar”. XV Simposio de tratamiento de señales, imágenes y Visión artificial-STSIVA, 2009. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, CColombia. Septiembre 9-11 de 2009. Págs: 1-6.
- [57] HERNANDEZ Jorge. Prieto Flavio. Metodología de evaluación cuantitativa de modelos texturizados. Dyna Marzo 2007/vol. 74, número 151. Universidad nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2007. Págs: 115-124.
- [58] VÁZQUEZ Torres Drianfel E. Suárez Luis E. y López Ricardo R. Identificación de daños en vigas de hormigón experimentales y analíticas utilizando metodologías modales. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 4(2) <http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/86/86>.
- [59] SALEH F, Supriyadi B, Suhendro B and Tran D. Damage Detection In Non-Prismatic Reinforced Concrete Beams Using Curvature Mode Shapes. Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04). Brisbane, Australia. 26-29 September 2004. Págs: 331-337.

- [60] NILSSON Nils J. Inteligencia artificial: Una nueva síntesis. 1ra edición. Mc Graw Hill. Madrid, España. 2001. Págs: 8-9, 241-260.
- [61] DEL BRIO Bonifacio Martín, Sanz Molina Alfredo. Redes neuronales y sistemas difusos. 2da edición ampliada y revisada. Alfaomega/Ra-Ma México DF. México. Págs: xxv-xxvi, 85-120.
- [62] HARMOND Paul, King David. Sistemas Expertos. “Aplicaciones de la inteligencia artificial en la actividad empresarial. Editorial Díaz Santos S.A. Madrid España. 1988. Pág: 5.
- [63] GIARRATANO Jhosep, Riley Gary. Expert system principles and programming. Third edition. Thomson learning, China Machine Press and CITIC Publish House. Beijing China. 2002. Págs: 1-24.
- [64] REYNOLDS, George W. STAIR, Ralph M. Principios de sistemas de información: enfoque administrativo. Cuarta Edición. International Thomson editores S.A de C.V. México DF, México. 2000. Págs: 489-515.
- [65] HAYKIN Simon. Neural networks: a comprehensive foundation. Second edition, ninth Indian reprint. India. Pearson Education (singapore) Pte Ltd. New Delhi, India. 2005. Págs: 465-499.
- [66] KOHONEN, Teuvo. Self-Organizing maps. Springer-Verlag. Third edition. Berlin Heidenberg Germany. 2001. Págs: 18-64, 91-174, 191-216, 245-327.
- [67] KOHONEN, Teuvo. Self-Organization of very large document collection: State of art. ICANN98, The 8th international conference on artificial neural networks, volume 1. Springer, London, United Kingdom. 1998. Págs: 65-74.
- [68] KOHONEN Teuvo. “The Self-Organizing”. Proceedings of the IEEE, volume 78, N°9. 1990. Págs: 1464-1480.
- [69] KOHONEN Teuvo. “Self Organizing and Associative Memory”. Springer Verlag, New York, 2nd edition, 1988. Págs: 1-29
- [70] MARTINEZ Wendy L, Martinez Angel R. Exploratory data analysis with Matlab. Chapman & Hall/CRC, Computer science and data analysis series. London, UK. 2005. Págs: 31-56, 90-98, 127-155.
- [71] SOTOLONGO Aguilar Gilberto, Guzmán Sánchez María V. Aplicaciones de las redes neuronales. El caso de la bibliometría.

- Ciencias de la Información, Vol. 32, N°1. Instituto de Información Científica y Tecnológica (IDICT). La Habana, Cuba. 2001. Págs: 27-34.
- [72] OOMMEN John, Altínel I. Kuban, and Aras Necati. Discrete vector quantization for arbitrary distance function estimation. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-part b: cybernetics, VOL. 28, NO. 4. 1998.
- [73] OJA Erkki, Kaski Samuel. Kohonen maps. Elsevier science B. V. Amsterdam, Holand. 1999. Págs: 1-386.
- [74] VESANTO Juha and Alhoniemi Esa. Clustering of the Self-Organizing Map. IEEE transactions on neural networks, Vol. 11, N° 3. 2000. Págs: 586-600.
- [75] CUTA D. César. Tesis de Pregrado: “Aplicación de Mapas Auto organizativos de Kohonen para la Identificación de Patrones de Comportamiento en los Precios de Oferta en la bolsa de los generadores en el mercado mayorista de energía en Colombia” , Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Colombia. 2004. Págs: 74-128.
- [76] VESANTO Juha, Himberg Johan, Alhoniemi Esa, Parhankagas Juha, “SOM Toolbox for Matlab 5”, SOM Toolbox team, Helsinki University of Technology. Espoo, Finland. 2000. Págs: 7-51.
- [77] HILERA José R, Martínez Víctor J. Redes neuronales Artificiales: Fundamentos, modelos y aplicaciones. Editorial Alfaomega, ra-ma. Santa Fe de Bogotá, Colombia. 2000. Págs: 253-283.
- [78] KIVILUOTO Kimmo. Topology preservation in Self-Organizing Maps. Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN). 1996. Págs: 294-299.
- [79] HSU Arthur L. and Halgamuge Saman K. Enhanced topology preservation of dynamic self-organizing maps for data visualization. IEEE. 2001. Págs: 1786-1791.
- [80] ARSUAGA Uriarte E, and Díaz Martín F. Topology Preservation in SOM. International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences 1:1. 2005. Págs: 19-22.
- [81] ARSUAGA Uriarte E, and Díaz Martín F. Topology Preservation in SOM. World academy of science, engineering and technology. Vol. 21. 2006. Págs: 52-55.

- [82] HAYKIN Simon, Van Veen Barry. Señales y sistemas. Limusa/Wiley. México DF. México. 2001. Págs: 162, 697-705.
- [83] CUESTA Frau David. Tesis doctoral: "Estudio de métodos para el procesamiento y agrupación de señales electrocardiográficas". Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de informática, sistemas y computadoras (DISCA). Valencia, España. 2001. Págs: 69-93.
- [84] LEÓN V. Fabián, Camacho N. Jhonatan, "Diseño de una Interfaz Electrónica para el Reconocimiento de Patrones EMG para Prótesis de Mano", Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Bucaramanga, Colombia. 2008. Págs: 61-100.
- [85] VEGA Valdomiro, "Aplicación de la Transformada Wavelet Discreta (DWT) en la detección e identificación de eventos de la calidad de la energía eléctrica". Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Bucaramanga, Colombia. 2004. Págs: 4-36.
- [86] MALLAT Stéphane, A Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press, Second Edition, 1999. Págs: 79-91, 148-150, 255-265.
- [87] DAUBECHIES I. Ten Lectures on Wavelets. The Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press, Second Edition, 1999. Págs: 3-166.
- [88] JAMES S. Walker. A primer on wavelets and their scientific applications. Second edition. Chapman & Hall/CRC. Boca Raton, USA. 2008. Págs: 1-2, 16-30, 41-49 228-237.
- [89] WEEKS Michael. Digital signal processing using Matlab and wavelets. Infinity Science Press LLC. Hingham, USA. 2007. Págs: 115-130, 275-352.
- [90] AMBARDAR Ashok. Procesamiento de señales analógicas y digitales. 2da edición. Thomson. México D.F. 2002. Págs 156-158.
- [91] PÉREZ Ariza Rocío: Tesis de pregrado: "Acondicionamiento de imágenes médicas para su registro con radiografías reconstruidas digitalmente (DRR)". Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela técnica superior de ingeniería de telecomunicación. Cartagena, España 2008. Págs: 14-25.

- [92] PROAKIS Jhon G. Manolakis Dimitris G. Tratamiento digital de señales: Principios, algoritmos y aplicaciones. Tercera edición. Prentice hall. Madrid, España. 1998. Págs: 118-133, 330-331.
- [93] OPPENHEIM Alan V. Shafer Ronald W. Buck Jhon R. Tratamiento de señales en tiempo discreto. 2da edición. Prentice Hall. Madrid, España. 2000. Págs: 70, 815-817.
- [94] MITRA Sanjit K. Digital. Signal processing: A computer-based approach. Second edition. Págs: 88-94.
- [95] ACEVEDO Díaz Pablo Emilio, OJEDA Giratá Daniel Ricardo. Tesis de Pregrado: " Algoritmo de Supervisión Experta basada en redes tipo SOM para la evaluación de deformaciones en tuberías Piezoactuadas y sujetas a cargas deformantes". Director PhD Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector MIE(C) Wilmer Alexis Sandoval Cáceres. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Bucaramanga, Colombia. 2010. Págs: 8-9.
- [96] BARAJAS Barajas Wilson Arley, QUIROGA Pineda Jhon Alexander. Tesis de Pregrado: "Modelo electrónico funcional para la generación y monitorización de señales piezoactuadas en ductos". Director PhD Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector MIE(C) Wilmer Alexis Sandoval Cáceres. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Bucaramanga, Colombia. 2010. (FINALIZADA).
- [97] GONZALEZ Quintana Diana Marcela, GOMEZ Pérez José de Jesús. Tesis de Pregrado: "Localización y valoración cualitativa de deformaciones geométricas en tuberías usando transformando wavelet, MPCA y razonamiento basado en casos". Director PhD Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector MIE(C) Wilmer Alexis Sandoval Cáceres. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Bucaramanga, Colombia. 2010. (EN EJECUCIÓN).
- [98] ACUÑA Hernández Yizeth Agélica, REYES Cambariza Javier Mauricio. Tesis de Pregrado: "Algoritmo de supervisión experta para la evaluación de deformaciones en tuberías piezoactuadas, basado en redes neuronales SOM y análisis de componentes principales (MPCA)". Director PhD Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector MIE(C) Wilmer Alexis Sandoval Cáceres. Universidad Industrial de Santander.

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Bucaramanga, Colombia. 2010. (EN EJECUCIÓN).

ANEXO A

TABLAS COMPLEMENTARIAS DE VIGAS Y TUBERÍAS, EMPLEADAS EN EL ANÁLISIS MODAL Y ESTRUCTURAL

En esta sección, se adiciona la información complementaria del capítulo 2, correspondiente a tablas utilizadas en el análisis estructural de vigas y tuberías, necesarias para generar las matrices ensambladas de masa, rigidez y amortiguamiento a partir del método de elementos finitos. De igual forma, se agrega información pertinente al funcionamiento biológico de las redes SOM. Los temas referidos, están organizados en cinco partes fundamentales.

En primera instancia, se abordan temas inherentes a las condiciones de frontera para los diferentes tipos de apoyo, utilizados en el análisis de estructuras.

Posteriormente, se referencian las distintas configuraciones de apoyo utilizadas en el análisis vibraciones.

En el aparte A3, se relacionan las formas modales para las configuraciones de apoyo libre-libre y simplemente apoyada, simuladas a partir de ANSYS.



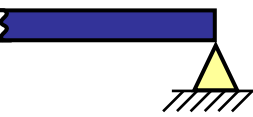

En cuarto lugar, se adiciona la información referente a los esfuerzos presentes en un recipiente cilíndrico en presencia de presión.

Finalmente, se explica el funcionamiento biológico de las redes SOM y su arquitectura correspondiente.

A.1 CONDICIONES DE FRONTERA

Como se menciona en la sección 2.1.2, las condiciones de frontera de una estructura, están directamente relacionadas con el tipo de apoyo utilizado y determinan las formas modales obtenidas en el análisis de vibraciones. A continuación en la tabla A1, se relaciona la información referente a tipos de apoyo y restricciones de frontera correspondientes.

Tabla A 1. Restricción en las condiciones de frontera según el tipo de apoyo

Condición del extremo de la viga en vibración transversal	Parámetros de la viga en ese extremo			
	Deflexión	Variación de la deflexión	Momento	Esfuerzo cortante
 Libre	Sin restricción	Sin restricción	$EI \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) = 0$
 Empotrado	$\omega = 0$	$\frac{\partial \omega}{\partial x} = 0$	Sin restricción	Sin restricción
 Simplemente apoyado	$\omega = 0$	Sin restricción	$EI \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0$	Sin restricción
 Deslizante	Sin restricción	$\frac{\partial \omega}{\partial x} = 0$	Sin restricción	$\frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) = 0$



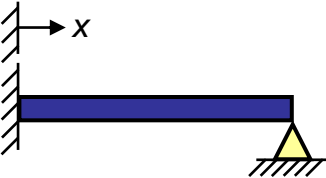
Fuente: El autor basado en tablas tomadas de [45]

A.2 CONFIGURACIONES DE APOYO

A continuación, en la tabla A2 se relacionan las diferentes configuraciones de apoyo utilizadas en el análisis estructural. Donde, cada uno de los pesos de la frecuencia natural ω_n , está relacionado con la frecuencia natural ω_n , por medio de la expresión $\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{EI/\rho A}$.

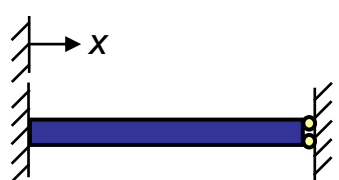
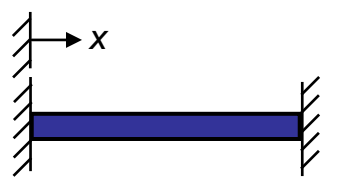
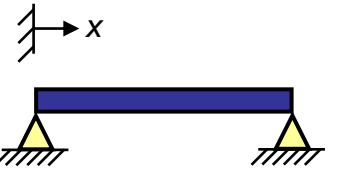
Dichas configuraciones, son generadas a partir de las condiciones descritas en la tabla A1 y se utilizan para establecer las restricciones de frontera de los modelos en elementos finitos para las diferentes estructuras analizadas “Vigas y tuberías”. Adicionalmente, determinan las formas de los modos vibración, según lo mencionado en la sección 2.1.2 y lo referenciado en las tablas A.2, que corresponden a parámetros de entrada para las simulaciones realizadas en los diferentes softwares aquí empleados “ANSYS, FORTRAN Y MATLAB”.

Tabla A 2. Configuraciones adicionales de apoyo para vigas delgadas/ ilustración del valor del peso de las frecuencias naturales ($\beta_n l$) y forma de los modos de vibración.

Configuración	Valor de $\beta_n l$ y ecuación característica	Forma del Modo	σ_n	
			Valor	Formula
 <p>Libre-Libre</p>	0 (Modo Cuerpo-Rígido) 4.73004074 7.85320462 10.9956078 14.1371655 17.2787597 $\frac{(n+1)\pi}{2}$ para $n > 5$ $\cos(\beta l) * \cosh(\beta l) = 1$	$\cosh(\beta_n x) + \cos(\beta_n x) - \sigma_n (\sinh(\beta_n x) + \sin(\beta_n x))$	0.9825 1.0008 0.9999 1.0000 0.9999 1 para $n > 5$	$\sigma_n = \frac{\cosh(\beta_n l) - \cos(\beta_n l)}{\sinh(\beta_n l) - \sin(\beta_n l)}$
 <p>Empotrado-Libre</p>	1.87510407 4.69409113 7.85475744 10.99554073 14.13716839 $\frac{(n-1)\pi}{2}$ para $n > 5$ $\cos(\beta l) * \cosh(\beta l) = -1$	$\cosh(\beta_n x) - \cos(\beta_n x) - \sigma_n (\sinh(\beta_n x) - \sin(\beta_n x))$	0.7341 1.0185 0.9992 1.0000 1.0000 1 para $n > 5$	$\sigma_n = \frac{\sinh(\beta_n l) - \sin(\beta_n l)}{\cosh(\beta_n l) + \cos(\beta_n l)}$
 <p>Empotrado-Apoyado</p>	3.92660231 7.06858275 10.21017612 13.35176878 16.49336143 $\frac{(n+1)\pi}{4}$ para $n > 5$ $\tan(\beta l) = \tanh(\beta l)$	$\cosh(\beta_n x) - \cos(\beta_n x) - \sigma_n (\sinh(\beta_n x) - \sin(\beta_n x))$	1.0008 1 para $n > 1$	$\sigma_n = \frac{\cosh(\beta_n l) - \cos(\beta_n l)}{\sinh(\beta_n l) - \sin(\beta_n l)}$

Fuente: El autor basado en tablas tomadas de [45]

Tabla A2 (Continuación). Configuraciones adicionales de apoyo para vigas delgadas/ ilustración del valor del peso de las frecuencias naturales ($\beta_n l$) y forma de los modos de vibración.

Configuración	Valor de $\beta_n l$ y ecuación característica	Forma del Modo	σ_n	
			Valor	Formula
 <p>Empotrado-Deslizante</p>	2.36502037 5.49780392 8.63937983 11.78097245 14.92256510 $\frac{(n-1)^* \pi}{4}$ para $n > 5$ $\tan(\beta l) + \tanh(\beta l) = 0$	$\cosh(\beta_n x) - \cos(\beta_n x) - \sigma_n (\sinh(\beta_n x) - \sin(\beta_n x))$	0.9825 1 para $n > 1$	$\sigma_n = \frac{\sinh(\beta_n l) - \sin(\beta_n l)}{\cosh(\beta_n l) + \cos(\beta_n l)}$
 <p>Empotrado-Empotrado</p>	1.87510407 4.69409113 7.85475744 10.99554073 14.13716839 $\frac{(n-1)^* \pi}{2}$ para $n > 5$ $\cos(\beta l) * \cosh(\beta l) = 1$	$\cosh(\beta_n x) - \cos(\beta_n x) - \sigma_n (\sinh(\beta_n x) - \sin(\beta_n x))$	0.9825 1.0008 0.9999 1.0000 0.9999 1 para $n > 5$	$\sigma_n = \frac{\cosh(\beta_n l) - \cos(\beta_n l)}{\sinh(\beta_n l) - \sin(\beta_n l)}$
 <p>Apoyado-Apoyado</p>	3.92660231 7.06858275 10.21017612 13.35176878 16.49336143 $\frac{(n+1)^* \pi}{4}$ para $n > 5$ $\sin(\beta l) = 0$	$\frac{\sin(n \pi x)}{l}$	Ninguno	Ninguno

Fuente: El autor basado en tablas tomadas de [45]

A.3 FORMAS MODALES SEGÚN EL TIPO DE APOYO

Teniendo en cuenta la información contenida en las tablas 2, A.1 y A.2, se realizaron pruebas preliminares para determinar las frecuencias y formas modales de la estructura de la tabla 5, en las 6 configuraciones de apoyo mencionadas bajo condiciones nominales de la estructura “Sin daño”.

Un aspecto importante a tener en cuenta para el análisis modal y las diferentes simulaciones recreadas en ANSYS, está relacionado con los dos tipos de vibración que presentan las estructuras. El primero de ellos hace referencia a los desplazamientos de tipo axial que sufre la estructura a determinada frecuencia modal. Dichos cambios pueden ser de tensión ó compresión y son aplicados únicamente de forma longitudinal.

El segundo tipo de vibración, hace referencia a los desplazamientos de tipo transversal, los cuales tienen una forma modal predeterminada y se presentan a una frecuencia de vibración específica.

La detección de averías basada en vibraciones, se apoya en el análisis de las frecuencias y formas modales de tipo transversal para una estructura seleccionada. Por tal motivo, a continuación solo se reportan las gráficas y tablas de los modos y frecuencias de vibración transversales

A.3.1 Configuración Libre-Libre.

En esta primera prueba de simulación con ANSYS, se recrearon los denominados desplazamientos de cuerpo rígido de la estructura seleccionada y los 6 primeros modos de vibración, a partir de los parámetros predefinidos en la tabla 5. En la figura A.3.1, se observan las frecuencias y formas modales características para la configuración y estructura utilizadas.

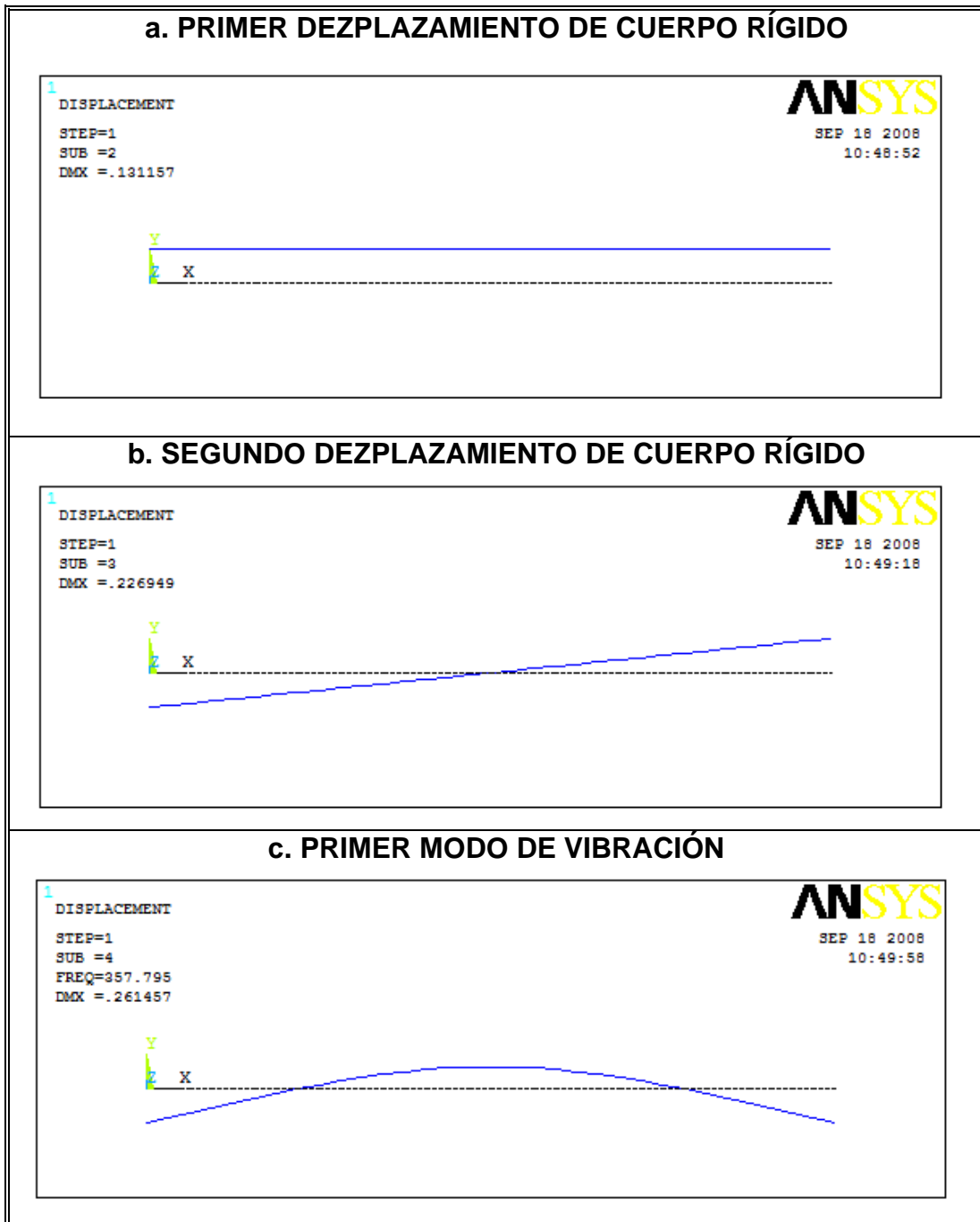
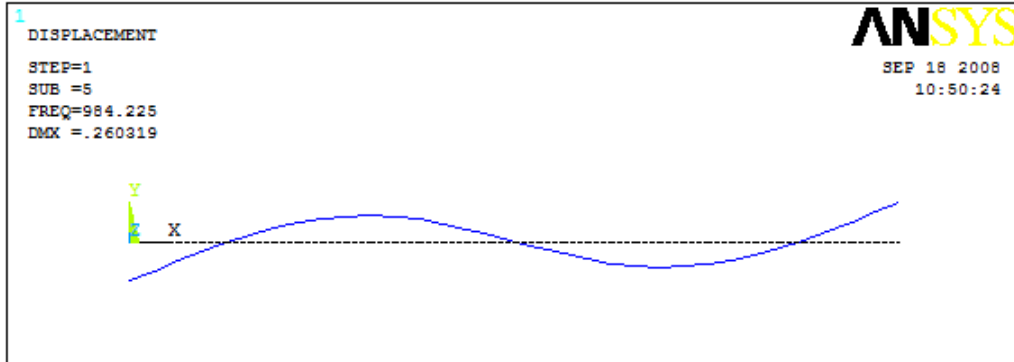
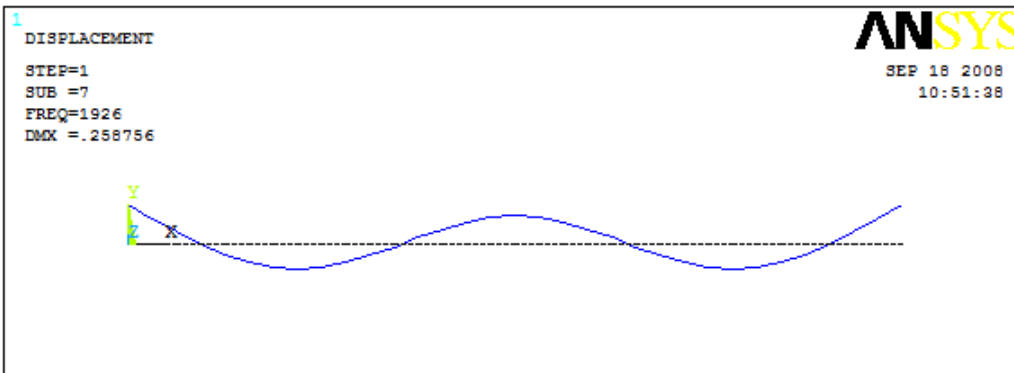


Figura A.3. 1. Frecuencias y formas modales características de la estructura seleccionada, en configuración de apoyo simple

d. SEGUNDO MODO DE VIBRACIÓN



e. TERCER MODO DE VIBRACIÓN



f. CUARTO MODO DE VIBRACIÓN

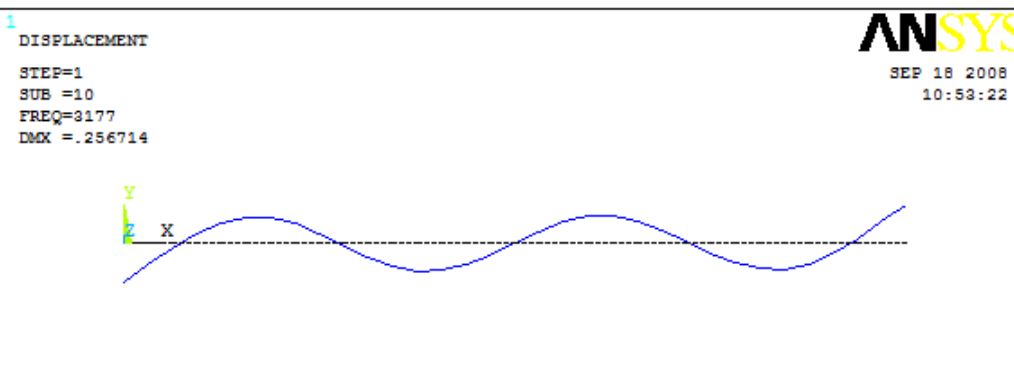


Figura A.3.1 (continuación). Frecuencias y formas modales características de la estructura seleccionada, en configuración Libre-Libre.

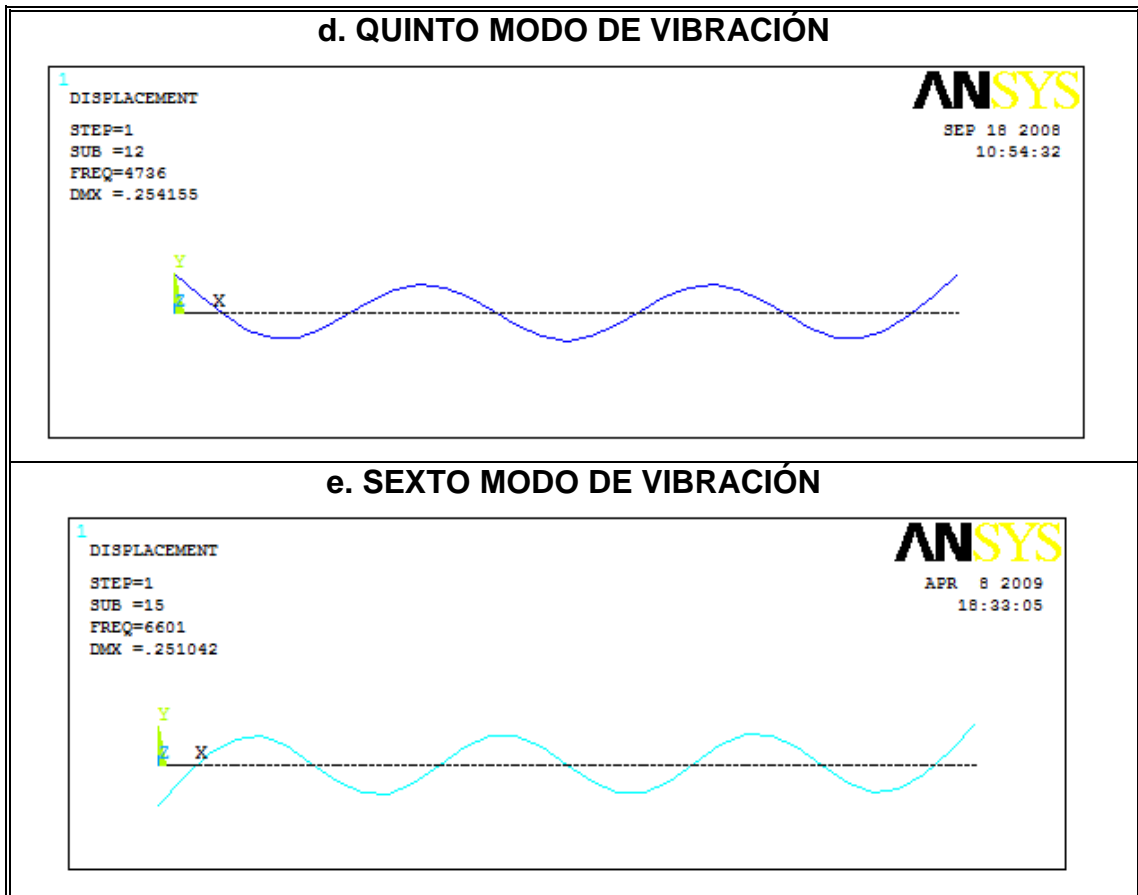


Figura A.3.1 (continuación). Frecuencias y formas modales características de la estructura seleccionada, en configuración Libre-Libre.

A.3.2 Configuración Simplemente apoyada.

Esta segunda prueba de simulación, permitió extraer las 6 primeras formas modales y sus correspondientes frecuencias para la misma estructura empleada en el aparte A.3.1. Sin embargo, se variaron sus condiciones de frontera, debido a la configuración de apoyo simple empleada. Dichas frecuencias y formas modales se relacionan a continuación en la figura A.3.2.

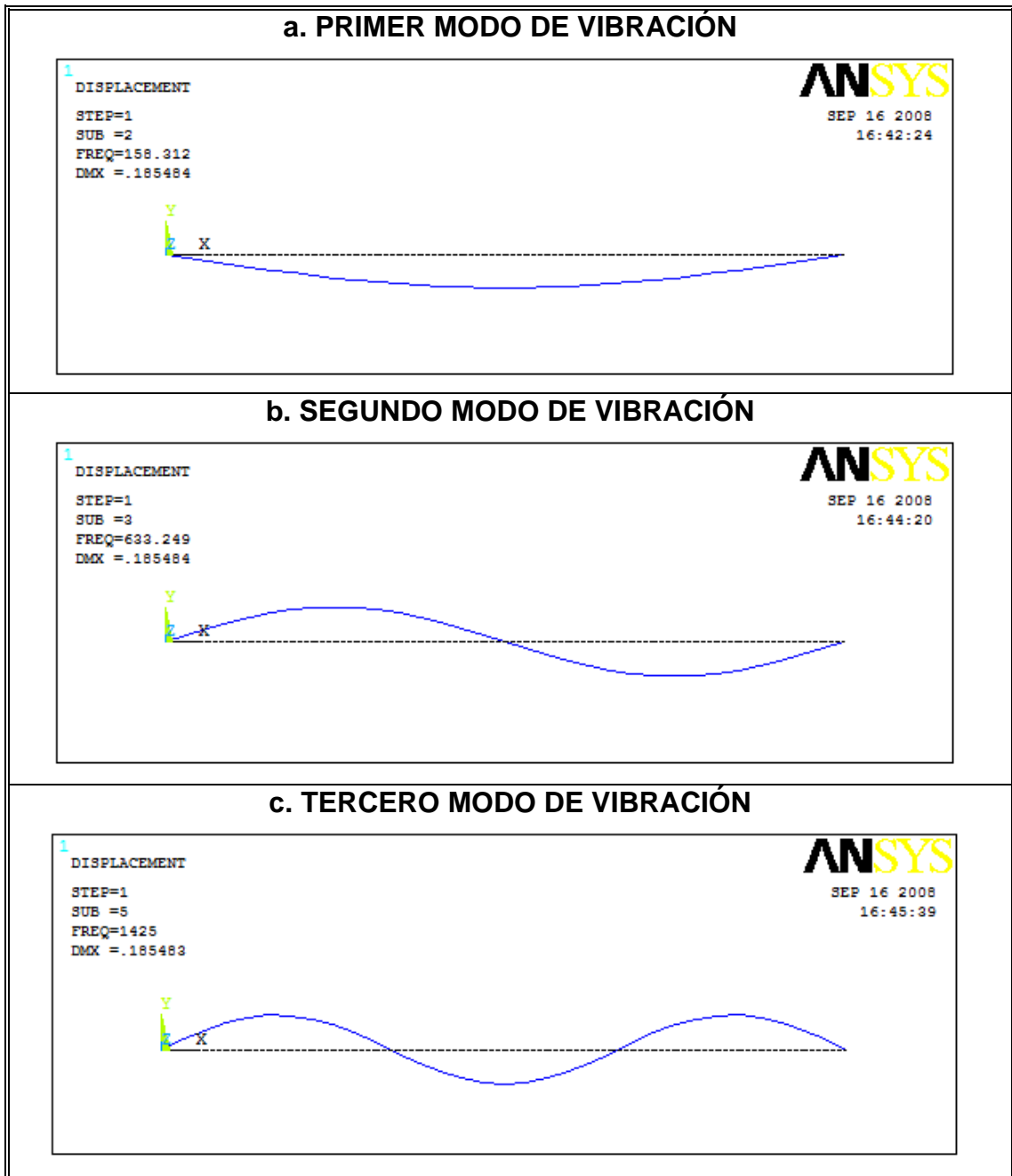
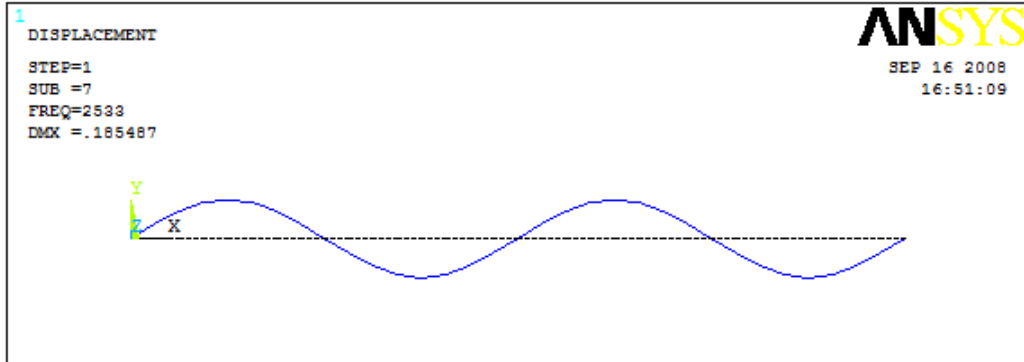
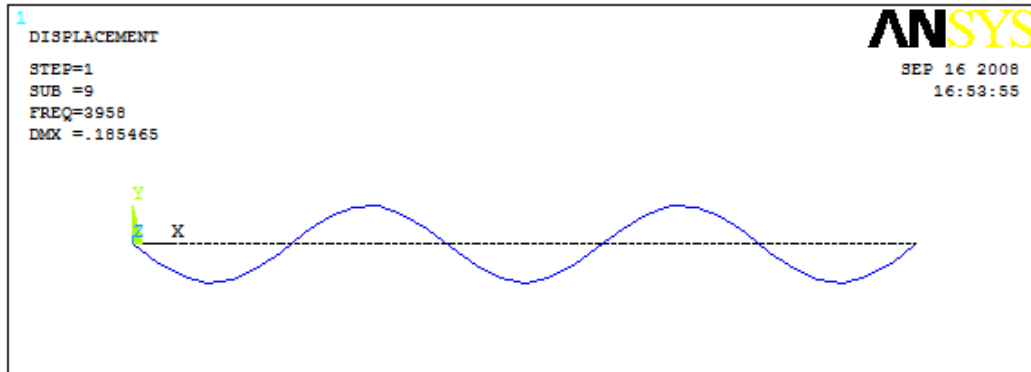


Figura A.3. 2. Frecuencias y formas modales características de la estructura seleccionada, en configuración de apoyo simple

d. CUARTO MODO DE VIBRACIÓN



e. QUINTO MODO DE VIBRACIÓN



f. SEXTO MODO DE VIBRACIÓN

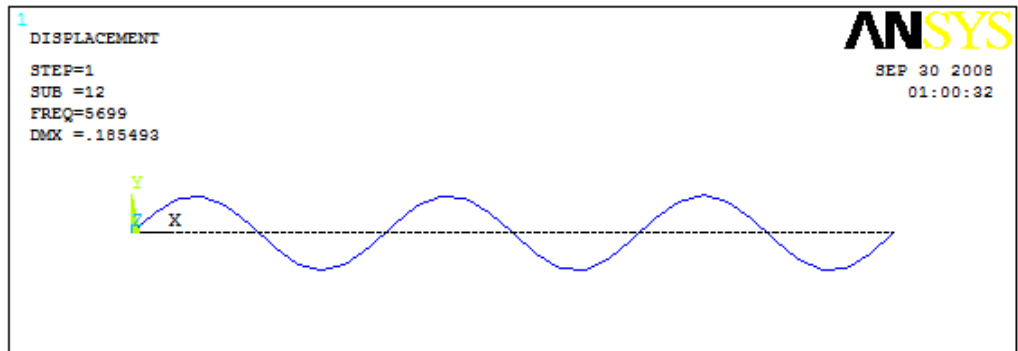
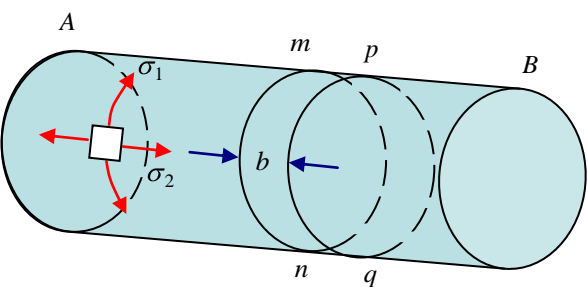
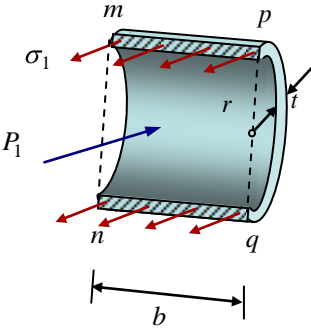
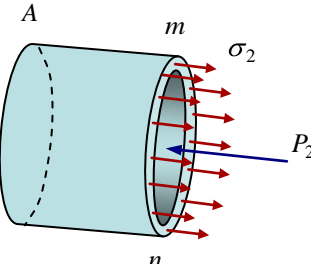


Figura A.3.2 (continuación). Frecuencias y formas modales características de la estructura seleccionada, en configuración de apoyo simple

A.4 ESFUERZO EN RECIPIENTES CILÍNDRICOS

Finalmente en la tabla A4 se relacionan los esfuerzos presentes en un recipiente cilíndrico en presencia de presión.

Tabla A 4. Esfuerzos presentes en recipientes cilíndricos.

 <p>Recipiente cilíndrico</p>	<p>Resultantes de Esfuerzos</p> <p>Circunferencial $\sigma_1(2 * b * t)$</p> <p>Longitudinal $\sigma_2(2 * \pi * r * t)$</p>	<p>b : Distancia entre los cortes (mn y pq) perpendiculares al eje longitudinal t : Espesor de la pared del recipiente σ_1 : Esfuerzo circunferencial σ_2 : Esfuerzo longitudinal</p>
 <p>Esfuerzo circunferencial (ó de Aro)</p>	<p>$P_1 = 2 * p * b * r$</p> <p>Ecuación de equilibrio $\sigma_1(2 * b * t) - 2 * p * b * r = 0$</p> <p>Entonces: $\sigma_1 = \frac{p * r}{t}$</p>	<p>b : Distancia entre los cortes (mn y pq) p : Presión interna neta P_1 : Fuerza de la presión interna r : Radio interno t : Espesor de la pared del recipiente σ_1 : Esfuerzo longitudinal</p>
 <p>Esfuerzo Longitudinal (axial)</p>	<p>$P_2 = 2 * p * \pi * r^2 = 0$</p> <p>Ecuación de equilibrio $\sigma_2(2 * \pi * r * t) - 2 * p * \pi * r^2 = 0$</p> <p>Entonces: $\sigma_2 = \frac{p * r}{2 * t}$</p>	<p>b : Distancia entre los cortes (mn y pq) p : Presión interna neta P_2 : Fuerza de la presión interna r : Radio interno t : Espesor de la pared del recipiente σ_2 : Esfuerzo longitudinal</p>

Fuente: El autor basado en tablas tomadas de [49]

A.5 REDES SOM

A continuación se presenta información adicional de redes SOM, relacionada con su concepción desde el punto de vista biológico y su arquitectura.

A.5.1 Fundamento biológico.

El funcionamiento de las SOM, está basado en el funcionamiento biológico del cerebro humano, el cual tiene asociadas funciones corporales específicas a cada una de las áreas que lo conforman como se observa en la figura A.5.1.1 [[61], [65], [66], [68], [77]].

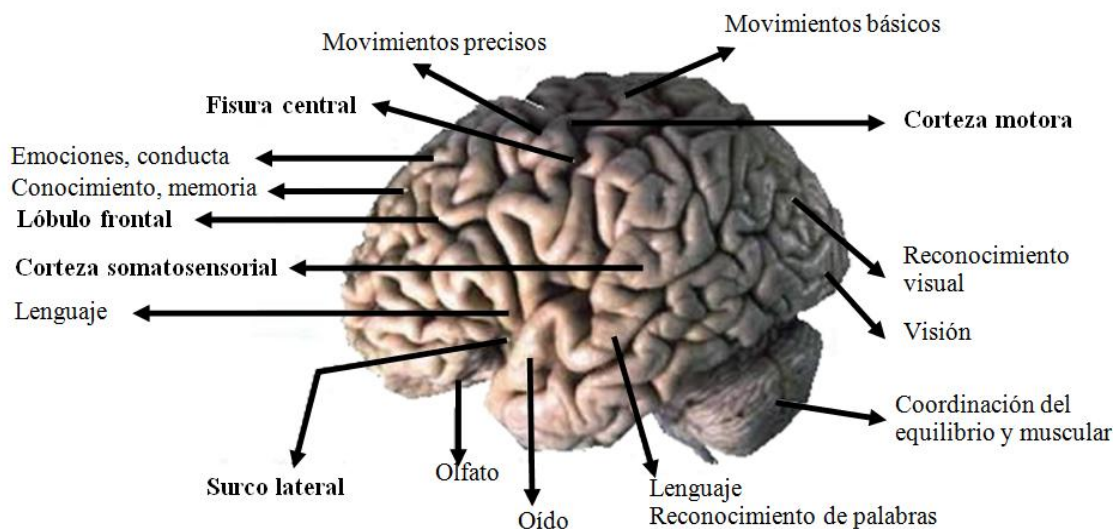


Figura A.5.1. 1. Zonas del cerebro humano.

Adicionalmente, Kohonen se focalizó en estudios realizados que evidenciaban la existencia de neuronas que se organizaban en diferentes zonas del cerebro (como es el caso de su capa externa denominada córtex) de acuerdo a las funciones de los órganos sensoriales [[66], [77]].

En otras palabras, el modelo de la red SOM está fundamentado en principios biológicos, que sugieren mapear topológicamente en un área específica del cerebro las señales adquiridas mediante órganos sensoriales (como se

observa en la figura A.5.1.2). Éste tipo de organización es conocido como mapa somatosensorial. Donde, los órganos sensores del cuerpo que se encuentran próximos entre sí, son mapeados topológicamente en el córtex del cerebro de forma equivalentemente (es decir, cercanos entre sí en el mapa) [[66], [77]].



Figura A.5.1. 2. Mapa somatosensorial [66]

A.5.2 Arquitectura.

Una red SOM básica está compuesta por dos capas de neuronas como se observa en la figura A.5.2.1, una de entrada y otra salida, las cuales se relacionan unidireccionalmente entre sí mediante los pesos sinápticos (W), también conocidos como vector de referencia ó codebooks [[61], [66], [76]]. La primera capa, es la encargada de recibir la información procedente del exterior y está compuesta por N número neuronas relacionadas una a una con las variables de los datos de entrada [[61], [65], [66], [75], [77]].

La segunda capa es la encargada de efectuar el procesamiento de la información y generar un mapa mediante nodos (neuronas o modelos) en una grilla, que es usualmente de tipo bidimensional debido a su facilidad de

visualización grafica, no obstante, se pueden generar mapas de tipo unidimensional y tridimensional según sea el caso [[66], [76]].

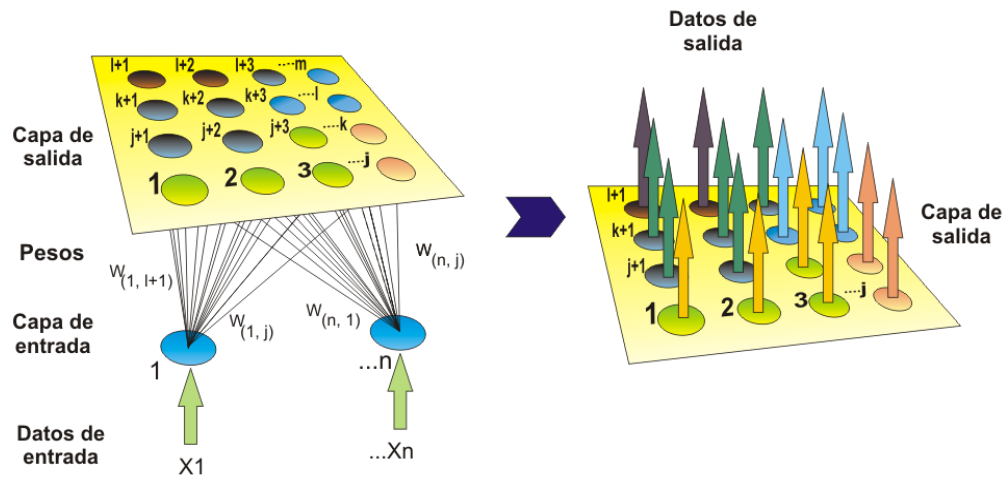


Figura A.5.2. 1. Arquitectura de la red SOM.

La capa de salida está conformada por M número de neuronas ubicadas espacialmente en un sistema coordenado (i, j) , las cuales interactúan entre sí, dependiendo de la distancia de separación entre una neurona c y sus adyacentes o vecinas dentro de un radio de acción N_c [[66], [76], [77]].

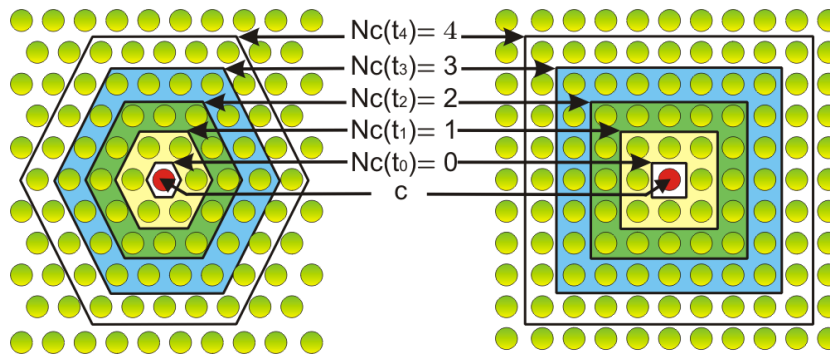


Figura A.5.2. 2. Topologías de vecindario de redes SOM bidimensionales.

Esta relación depende de dos parámetros, el primero de ellos es la topología del vecindario, la cual puede ser rectangular o hexagonal, como se observa en la figura A.5.2.2, para el caso bidimensional y toroidal ó cilíndrica para el caso tridimensional [76]. El segundo parámetro es la función de vecindad

(h_{ci}) , la cual establece las influencias laterales de las i neuronas vecinas sobre la neurona c e inhibe las que estén fuera del vecindario seleccionado. Este último parámetro puede ser una función de tipo gaussiana ó sombrero mejicano entre otras [[61], [65], [66], [76], [78], [70]], como se observan en la figura A.5.2.3.

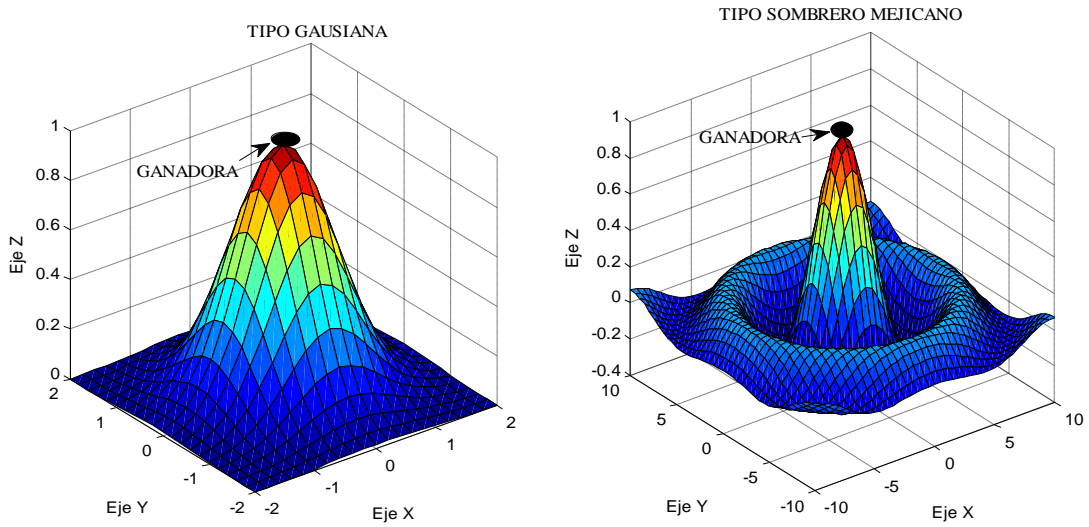


Figura A.5.2. 3. Función de Vecindad.

ANEXO B

PRUEBAS PRELIMINARES PARA LA VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS PLANTEADA (ANSYS)

En esta sección, se describen las pruebas de validación efectuadas a partir del software de simulación ANSYS, realizadas para cada uno de los casos de análisis especificado.

B.1 CASO DE ANÁLISIS: VIGA CON UN ELEMENTO AVERIADO EN 10% DE RIGIDEZ Y UBICACIÓN DEL DAÑO VARIABLE.

En éste primer caso de análisis, se recrearon diferentes escenarios de daño, basados en una estructura tipo viga en configuración apoyo simple y con las características observadas en la tabla B.1.1.

Tabla B.1. 1. Características de la estructura tipo viga.

NOMBRE DEL PARÁMETRO	VALOR NUMÉRICO
Número de elementos	32
Espesor	0.3048 [m]
E	199.95E+09 [N/m ²]
L	2.44 [m]
V	0.3
A	0.00304 [m ²]
I	4.29E-05 [m ⁴]
ρ	7837.1 [Kg/m ³]

En primera instancia, se realizaron pruebas piloto teniendo en cuenta la condición nominal “E0” de los elementos “Sin daño”. A continuación, se indujeron averías del 10% “reducción en rigidez” en uno de los 32 elementos de la estructura “(E1-E32)”, de acuerdo con las disposiciones de la tabla B.1.2.

Tabla B.1. 2. Variación de frecuencias modales para diferentes escenarios de daño del modelo tipo viga, simulados en ANSYS.

ELEMENTO AFECTADO	FRECUENCIA MODAL (Hz)					
	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4	MODO5	MODO6
E0	158.31	633.25	1424.8	2533	3957.6	5698.7
E1	158.31	633.22	1424.7	2532.5	3956.6	5696.6
E2	158.3	633.06	1423.9	2530.2	3951.4	5687
E3	158.28	632.76	1422.6	2526.9	3945.8	5680
E4	158.25	632.36	1421.2	2524.7	3944.7	5684.1
E5	158.21	631.94	1420.2	2524.7	3949.1	5694.1
E6	158.17	631.55	1420	2527	3955	5698
E7	158.12	631.25	1420.5	2530.2	3957.3	5690.7
E8	158.07	631.09	1421.7	2532.5	3953.9	5681.4
E9	158.01	631.1	1423.1	2532.5	3947.8	5681.5
E10	157.96	631.26	1424.2	2530.2	3944.4	5690.8
E11	157.91	631.56	1424.8	2527	3946.8	5698
E12	157.87	631.95	1424.5	2524.7	3952.8	5694.1
E13	157.83	632.37	1423.5	2524.7	3957.1	5683.9
E14	157.8	632.76	1422.1	2527	3955.9	5680.1
E15	157.78	633.06	1420.8	2530.2	3950.2	5687.2
E16	157.77	633.22	1420.1	2532.5	3945.2	5696.6
E17	157.77	633.22	1420.1	2532.5	3945.2	5696.6
E18	157.78	633.06	1420.8	2530.2	3950.2	5687.2
E19	157.8	632.76	1422.1	2527	3955.9	5680.1
E20	157.83	632.37	1423.5	2524.7	3957.1	5683.9
E21	157.87	631.95	1424.5	2524.7	3952.8	5694.1
E22	157.91	631.56	1424.8	2527	3946.8	5698
E23	157.96	631.26	1424.2	2530.2	3944.4	5690.8
E24	158.01	631.1	1423.1	2532.5	3947.8	5681.5
E25	158.07	631.09	1421.7	2532.5	3953.9	5681.4
E26	158.12	631.25	1420.5	2530.2	3957.3	5690.7
E27	158.17	631.55	1420	2527	3955	5698
E28	158.21	631.94	1420.2	2524.7	3949.1	5694.1
E29	158.25	632.36	1421.2	2524.7	3944.7	5684.1
E30	158.28	632.76	1422.6	2526.9	3945.8	5680
E31	158.3	633.06	1423.9	2530.2	3951.4	5687
E32	158.31	633.22	1424.7	2532.5	3956.6	5696.6

Finalmente, se realizó el contraste gráfico de los resultados obtenidos, para cada una de las formas modales seleccionadas, como se observa en las gráficas de la figura B.1. Donde se evidencia el efecto de los daños simulados en las frecuencias modales de la estructura.

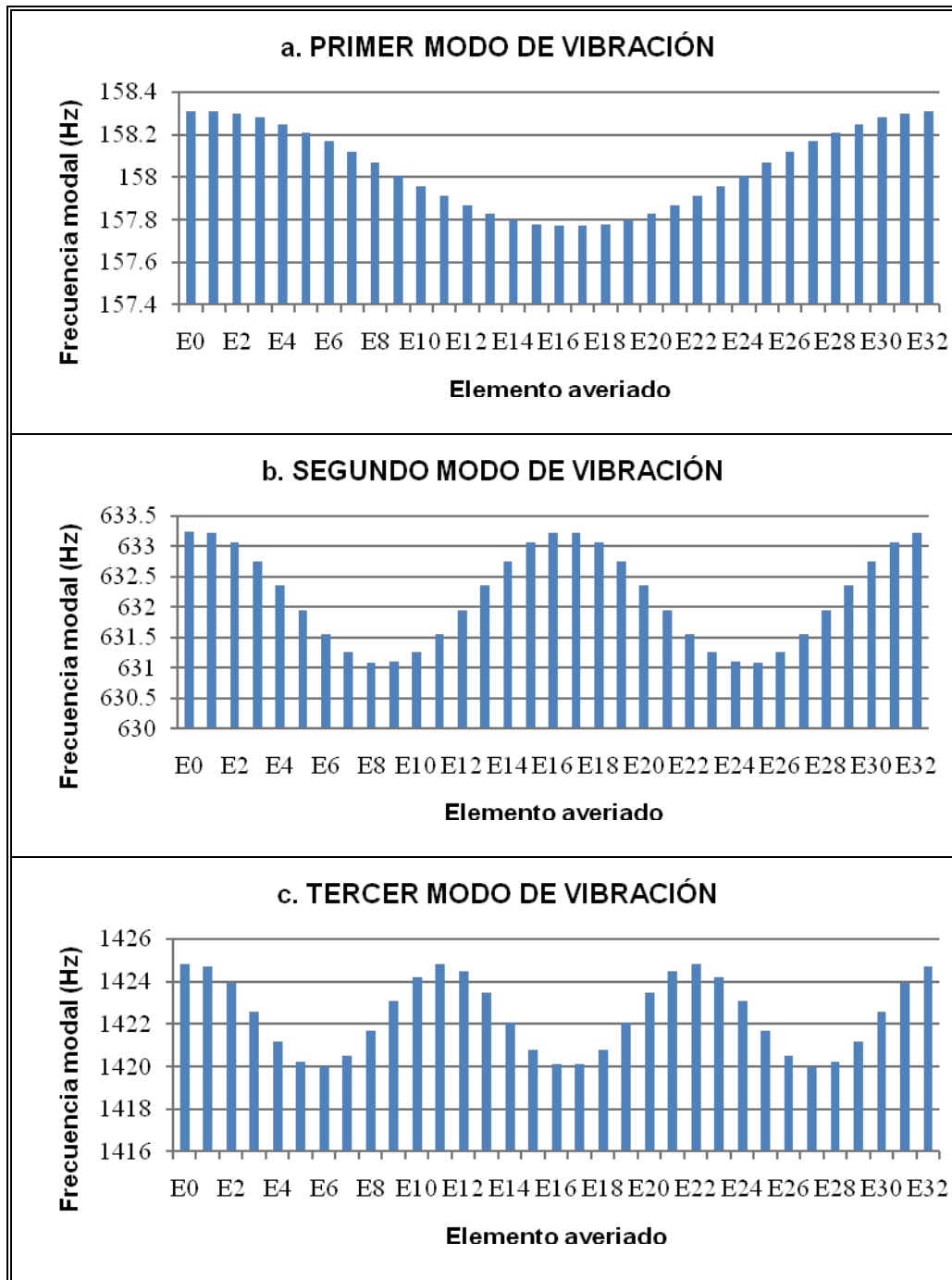


Figura B. 1. Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS.

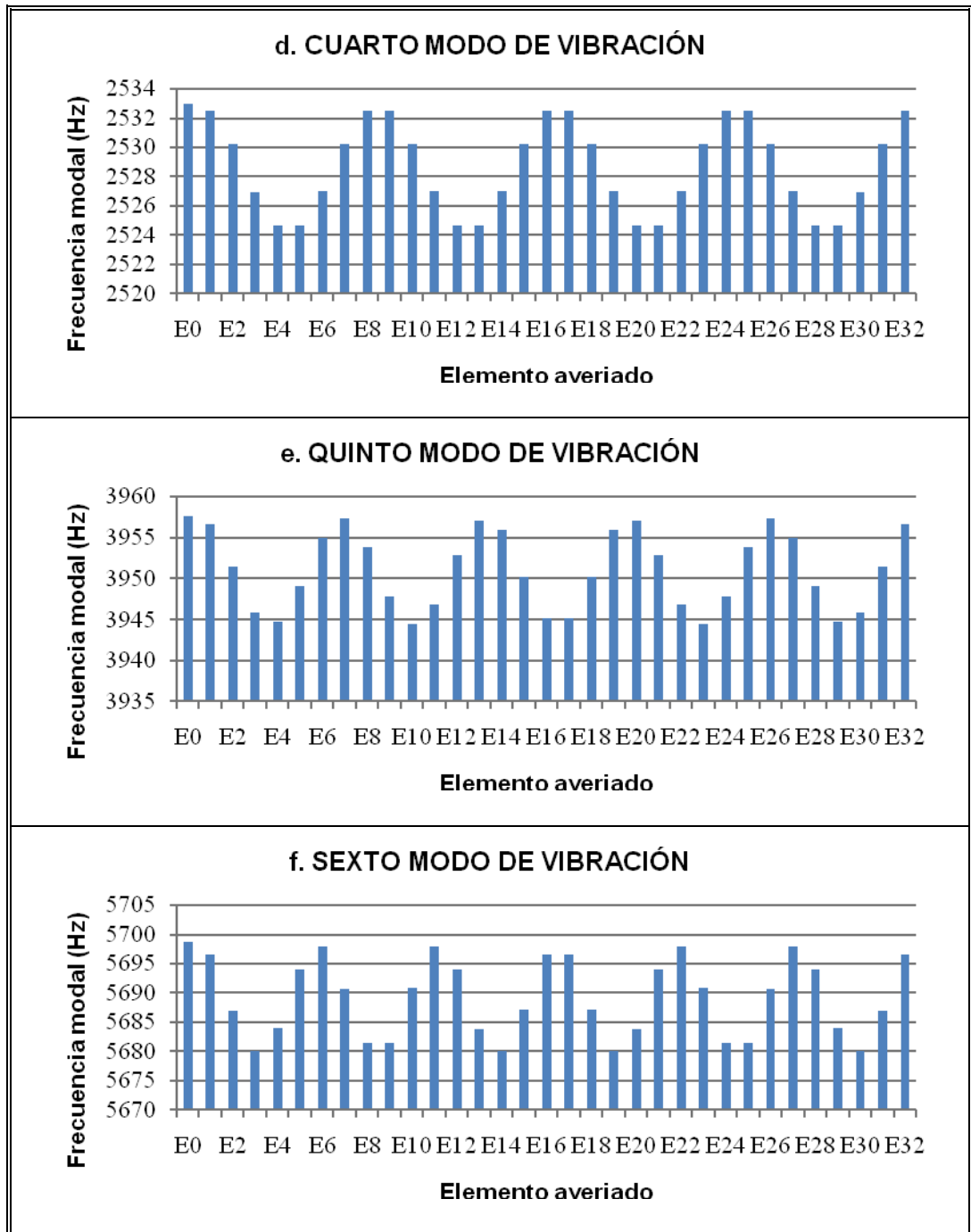


Figura B.1 (Continuación). Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS

B.2 CASO DE ANÁLISIS: VIGA CON UN ELEMENTO AVERIADO, EN UNA UBICACIÓN CONSTANTE Y CON PORCENTAJES DE DAÑO VARIABLE.

Esta prueba, permitió recrear diferentes escenarios de daño, basados en la estructura utilizada en la sección B.1. No obstante, las simulaciones realizadas se efectuaron a partir de la variación del porcentaje de daño en múltiplos de 10, acorde con lo observado en la tabla B.2.1

Tabla B.2. 1. Variaciones del porcentaje de daño en E1.

DAÑO (%)	VARIACIÓN DEL DAÑO EN E1					
	0	10	20	30	40	50
MODO (Hz)						
MODO1	158.312	158.311	158.308	158.306	158.302	158.297
MODO2	633.25	633.22	633.19	633.14	633.08	633
MODO3	1424.8	1424.7	1424.5	1424.3	1424	1423.5
MODO4	2533	2532.5	2532	2531.3	2530.3	2529
MODO5	3957.6	3956.6	3955.3	3953.5	3951.3	3948
MODO6	5698.7	5696.6	5693.9	5690.4	5685.7	5679.1

En ésta prueba, el elemento seleccionado para efectuar las diferentes variaciones de rigidez fue E1. Así mismo, los diferentes escenarios de daño se recrearon teniendo en cuenta que bajo condiciones nominales “en ausencia de daño”, dicha variación es de cero “0%” y en el caso más crítico considerado, la severidad de la avería fue del 50%.

Finalmente, se efectuó el contraste de los resultados obtenidos con base en la tabla B.2.1, a partir de las gráficas de la figura B.2. Donde se evidencia el efecto de la variación en el porcentaje de daño de un elemento dado y sus correspondientes efectos sobre la frecuencia característica, en la cual se presenta cada uno de los modos de vibración de la estructura.

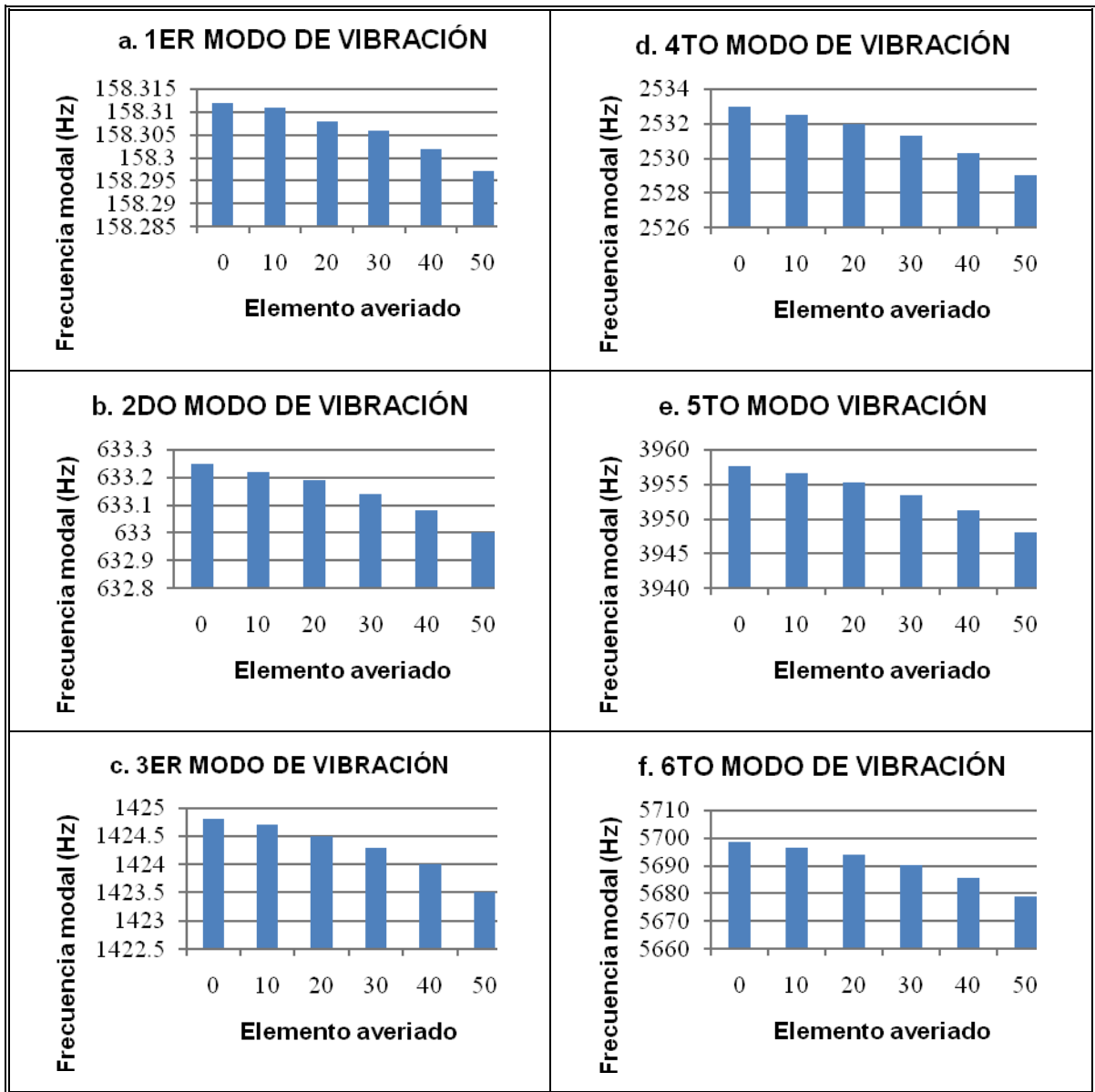


Figura B. 2. Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS.

B.3 CASO DE ANÁLISIS: TUBERÍA CON UN ELEMENTO AVERIADO EN 10% DE RIGIDEZ Y UBICACIÓN DEL DAÑO VARIABLE.

Para este caso de análisis, se realizaron simulaciones de diferentes escenarios de daño, recreados a partir de una estructura tipo tubería en

configuración simplemente apoyada y con los parámetros de simulación observados en la tabla B.3.1

Tabla B.3. 1. Parámetros de simulación de la estructura tipo tubería.

NOMBRE DEL PARÁMETRO	VALOR NUMÉRICO
Número de elementos	32
Radio exterior del tubo	0.042 [m]
Radio interior del tubo	0.040 [m]
E	210E+09 [N/m ²]
L	4.28 [m]
V	0.28
A	1.2874E-04 [m ²]
I	2.7066E-08 [m ⁴]
ρ	7800 [Kg/m ³]

Las pruebas realizadas, se efectuaron de forma análoga a las descritas en la sección B.1, simulando averías de 10% en la rigidez de la estructura en las ubicaciones indicadas en la tabla B.3.2. Donde “E0” corresponde a la condición nominal de los elementos “Sin daño”.

Posteriormente, en la figura B.3 se relacionan de forma gráfica los efectos en la variación de frecuencias, para cada uno de los modos de vibración de la tubería, producidos por la simulación de daños en diferentes puntos de la misma.

Tabla B.3. 2. Variación de frecuencias modales para diferentes escenarios de daño del modelo tipo tubería, simulados en ANSYS.

ELEMENTO AFECTADO	FRECUENCIA MODAL (Hz)					
	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4	MODO5	MODO6
E0	6.4513	25.805	58.062	103.22	161.28	232.23
E1	6.4513	25.805	58.059	103.21	161.26	232.19
E2	6.4511	25.802	58.044	103.17	161.16	232
E3	6.4507	25.796	58.019	103.1	161.05	231.86
E4	6.4501	25.788	57.992	103.06	161.02	231.94
E5	6.4494	25.78	57.973	103.06	161.11	232.14
E6	6.4485	25.772	57.968	103.1	161.23	232.21
E7	6.4476	25.767	57.978	103.17	161.27	232.07
E8	6.4466	25.764	58.001	103.21	161.2	231.89
E9	6.4455	25.764	58.028	103.21	161.08	231.89
E10	6.4445	25.767	58.05	103.17	161.02	232.07
E11	6.4436	25.773	58.061	103.1	161.07	232.21
E12	6.4427	25.78	58.056	103.06	161.18	232.14
E13	6.442	25.788	58.036	103.06	161.27	231.94
E14	6.4414	25.796	58.01	103.1	161.24	231.86
E15	6.441	25.802	57.985	103.17	161.13	232
E16	6.4408	25.805	57.969	103.21	161.03	232.19
E17	6.4408	25.805	57.969	103.21	161.03	232.19
E18	6.441	25.802	57.985	103.17	161.13	232
E19	6.4414	25.796	58.01	103.1	161.24	231.86
E20	6.442	25.788	58.036	103.06	161.27	231.94
E21	6.4427	25.78	58.056	103.06	161.18	232.14
E22	6.4436	25.773	58.061	103.1	161.07	232.21
E23	6.4445	25.767	58.05	103.17	161.02	232.07
E24	6.4455	25.764	58.028	103.21	161.08	231.89
E25	6.4466	25.764	58.001	103.21	161.2	231.89
E26	6.4476	25.767	57.978	103.17	161.27	232.07
E27	6.4485	25.772	57.968	103.1	161.23	232.21
E28	6.4494	25.78	57.973	103.06	161.11	232.14
E29	6.4501	25.788	57.992	103.06	161.02	231.94
E30	6.4507	25.796	58.019	103.1	161.05	231.86
E31	6.4511	25.802	58.044	103.17	161.16	232
E32	6.4513	25.805	58.059	103.21	161.26	232.19

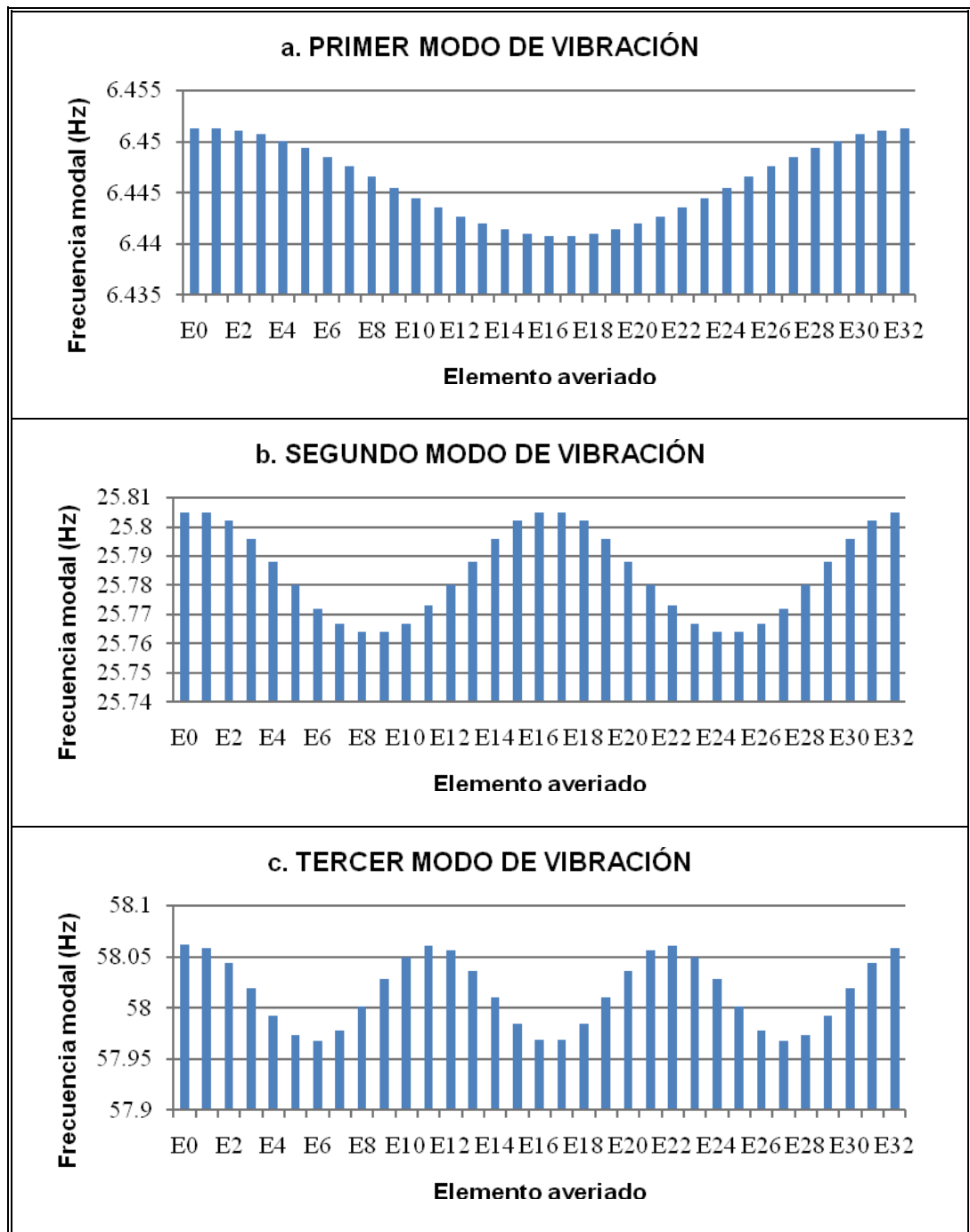


Figura B. 3. Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS.

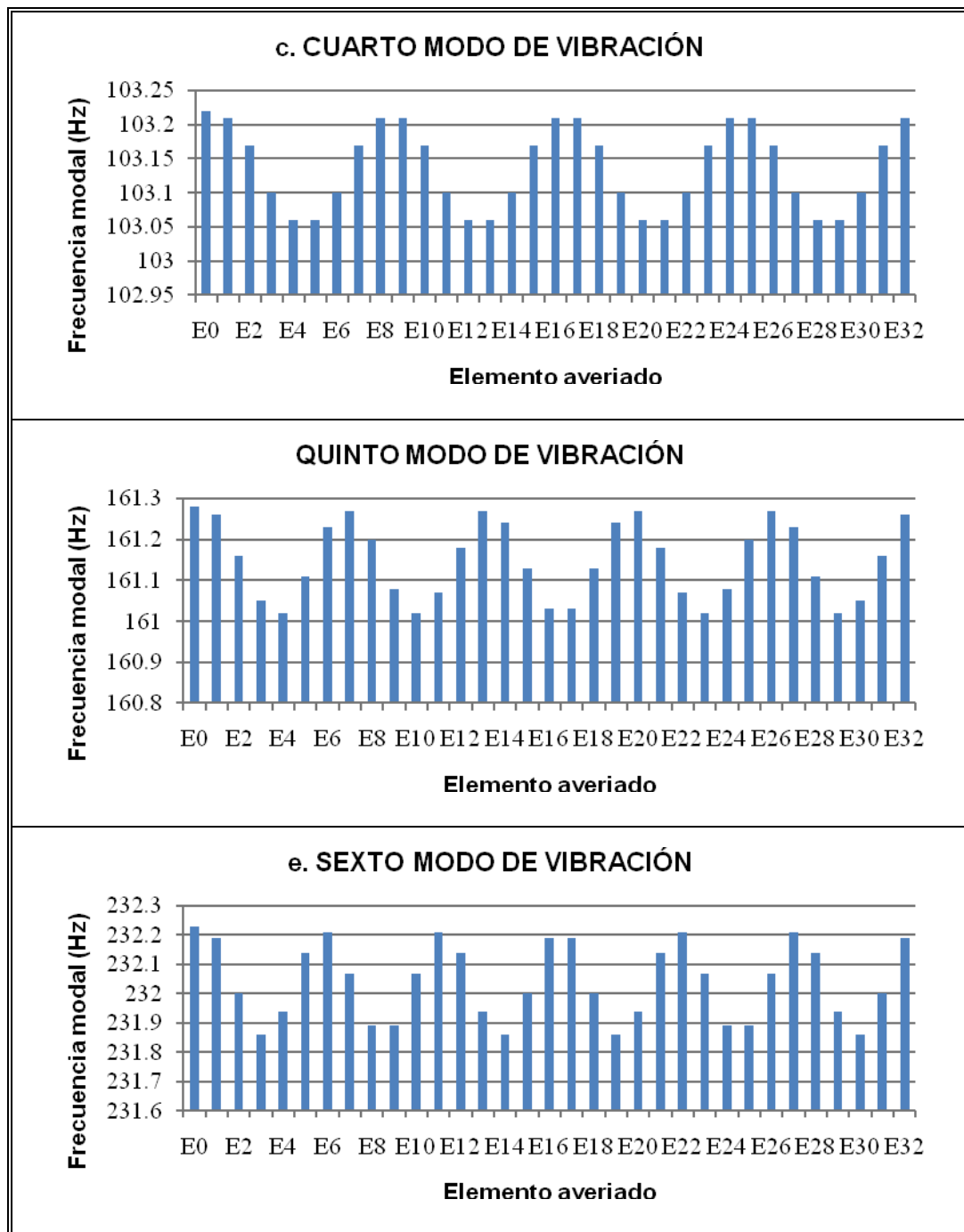


Figura B.3 (Continuación). Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS

B.4 CASO DE ANÁLISIS: TUBERÍA CON UN ELEMENTO AVERIADO, EN UNA UBICACIÓN FIJA Y CON PORCENTAJES DE DAÑO VARIABLE.

Para concluir las pruebas validación de la hipótesis planteada aplicada a tuberías, se utilizó el cuarto caso de análisis, el cual permitió recrear los escenarios de daño planteados en la tabla B.4.1, teniendo como referencia los parámetros citados en la tabla B.3.1.

Tabla B.4. 1. Variaciones del porcentaje de daño en E1 de la tubería.

DAÑO (%)	VARIACIÓN DEL DAÑO EN E1					
	0	10	20	30	40	50
MODO (Hz)						
MODO1	6.4513	6.4513	6.4512	6.4511	6.4509	6.4507
MODO2	25.805	25.804	25.803	25.801	25.798	25.795
MODO3	58.062	58.056	58.049	58.04	58.027	58.01
MODO4	103.22	103.2	103.18	103.15	103.11	103.06
MODO5	161.28	161.23	161.18	161.11	161.02	160.89
MODO6	232.23	232.14	232.03	231.89	231.7	231.43

Cada uno de los escenarios de daño planteados, permitió efectuar variaciones de rigidez en diferentes porcentajes de daño múltiplos de 10 en un rango de (0%-50%). Estas variaciones fueron simuladas en el elemento E1, considerando como caso ideal la tubería sin daño “0%” y el escenario de avería con mayor severidad el de 50%.

El contraste de los resultados obtenidos para las diferentes simulaciones recreadas, se referencian en la figura B.4. Donde se observan de forma gráfica, los efectos sobre el valor de las frecuencias modales causados por la variación del porcentaje de avería en un elemento dado.

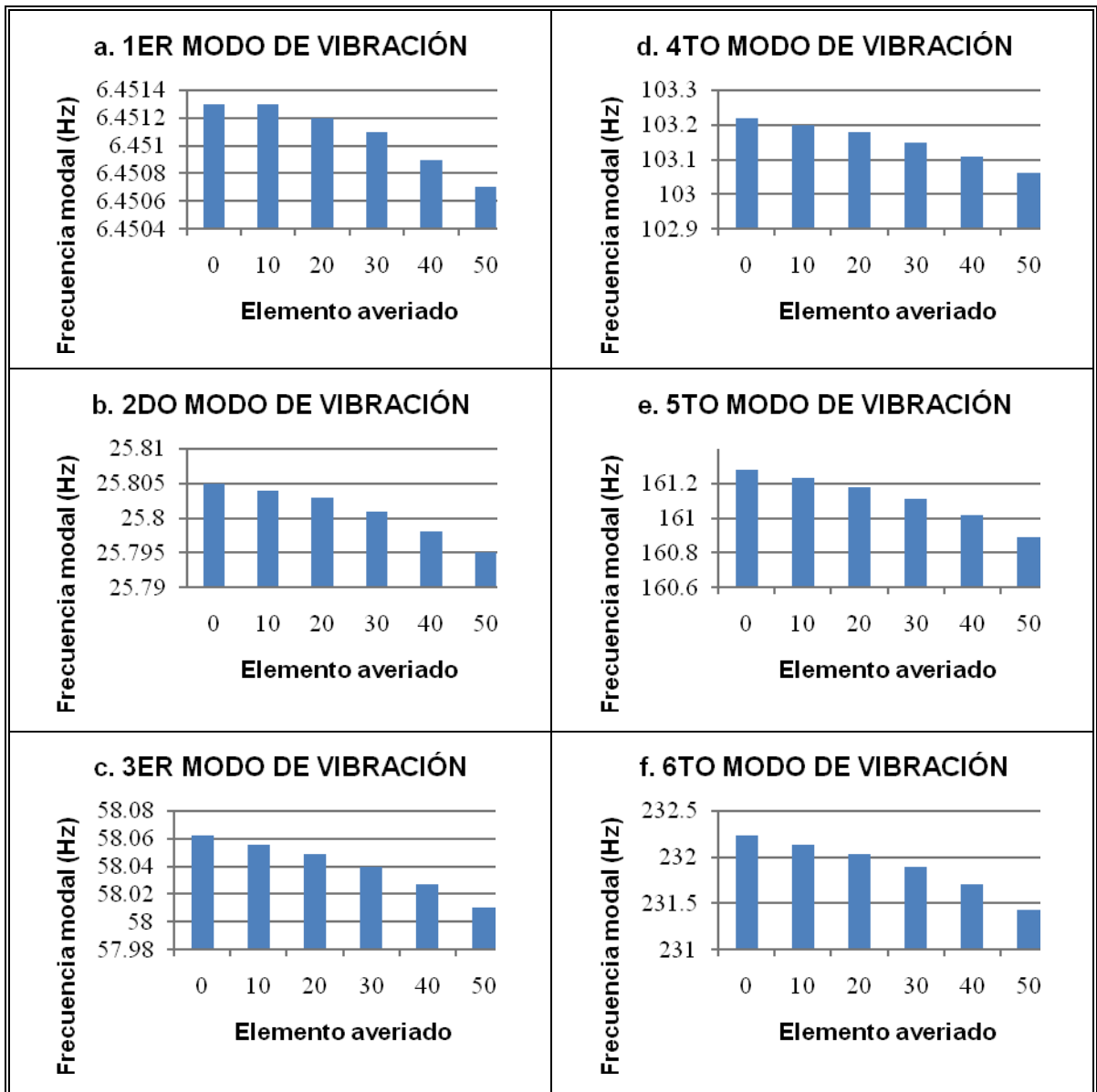


Figura B. 4. Efecto de la variación de rigidez “reducción del 10%”, sobre los valores de frecuencias modales para un modelo tipo viga de 32 elementos, simulados en ANSYS.

ANEXO C

PRUEBAS DE VALIDACIÓN DE FRECUENCIAS Y FORMAS MODALES, PARA ESTRUCTURAS EN PRESENCIA DE DAÑO (ANSYS vs FORTRAN)

Para la validación experimental de la frecuencias y formas modales generadas a partir de FORTRAN, se recrearon múltiples escenarios de daño con averías en diferentes puntos de la estructura, los cuales se seleccionaron de forma randómica mediante el uso de MATLAB. Cada uno de dichos escenarios se simularon tanto en ANSYS como FORTRAN, extrapolando la información correspondiente a las frecuencias de los seis primeros modos de vibración transversales de la estructura analizada, para posteriormente confrontarlos y de ésta forma evaluar la validez de los datos originados en FORTRAN, mediante el uso de un software comercial especializado en el manejo de elementos finitos.

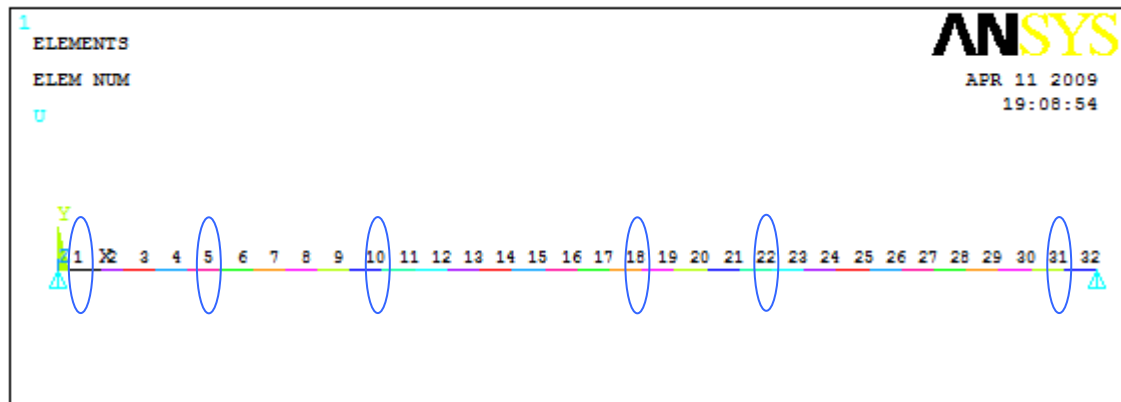


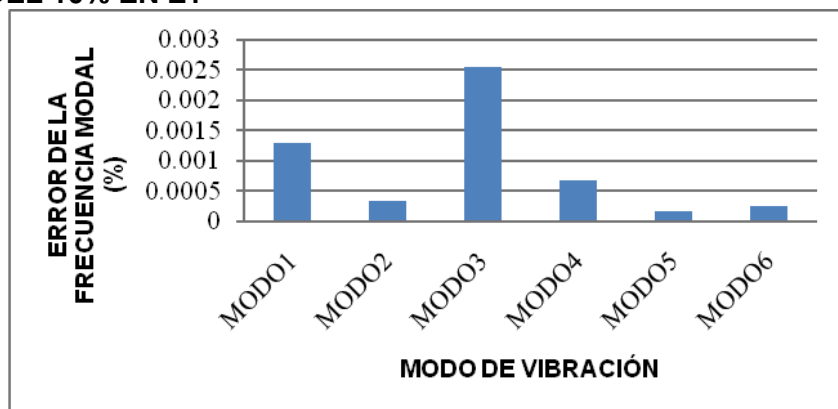
Figura C. 1. Elementos de la estructura modificados.

Para la prueba, se seleccionaron los elementos 1, 5, 10, 18, 22 y 31. Los cuales fueron averiados en 10% en su coeficiente de rigidez. En la figura C1 se observa el escenario utilizado para la prueba descrita anteriormente. A continuación en las figuras tablas C.1 y C.2 se observan los resultados obtenidos para las configuraciones de apoyo Libre-Libre y apoyo simple. No obstante, las pruebas se replicaron en las cuatro configuraciones restantes de la tabla A.2.

Tabla C. 1. Validación de frecuencias modales “ANSYS vs FORTRAN”, para estructura en configuración Libre-Libre.

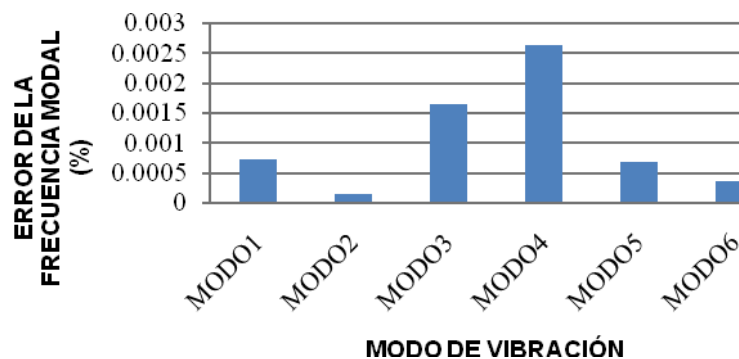
a. AVERIA DEL 10% EN E1

FRECUENCIA MODAL			
FRECUENCIA DE VIBRACION	SOFTWARE DE SIMULACION		ERROR (%)
	ANSYS	FORTRAN	
MODO1	3.5779E+02	3.5779461132E+02	0.00128883
MODO2	9.8422E+02	9.8422316712E+02	0.00032179
MODO3	1.9255E+03	1.9255491118E+03	0.0025506
MODO4	3.1765E+03	3.1765213201E+03	0.00067118
MODO5	4.7354E+03	4.7353922886E+03	0.00016285
MODO6	6.6001E+03	6.6000835562E+03	0.00024914



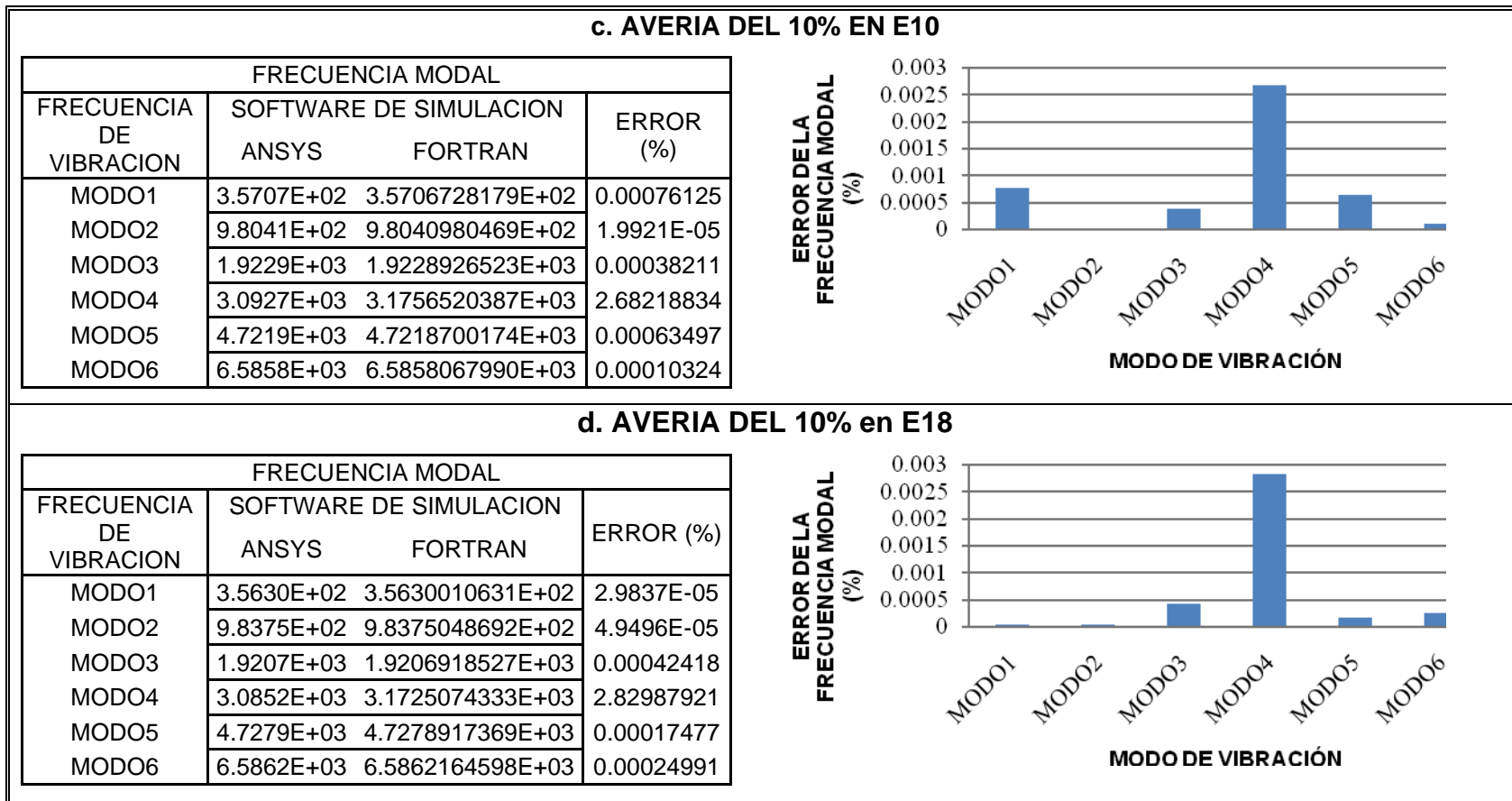
b. AVERIA DEL 10% en E5

FRECUENCIA MODAL			
FRECUENCIA DE VIBRACION	SOFTWARE DE SIMULACION		ERROR (%)
	ANSYS	FORTRAN	
MODO1	3.5772E+02	3.5771743118E+02	0.00071811
MODO2	9.8317E+02	9.8316858619E+02	0.0001438
MODO3	1.9208E+03	1.9207682635E+03	0.00165225
MODO4	3.0838E+03	3.1650322945E+03	2.63416222
MODO5	4.7182E+03	4.7181681346E+03	0.00067537
MODO6	6.5837E+03	6.5837242070E+03	0.00036768



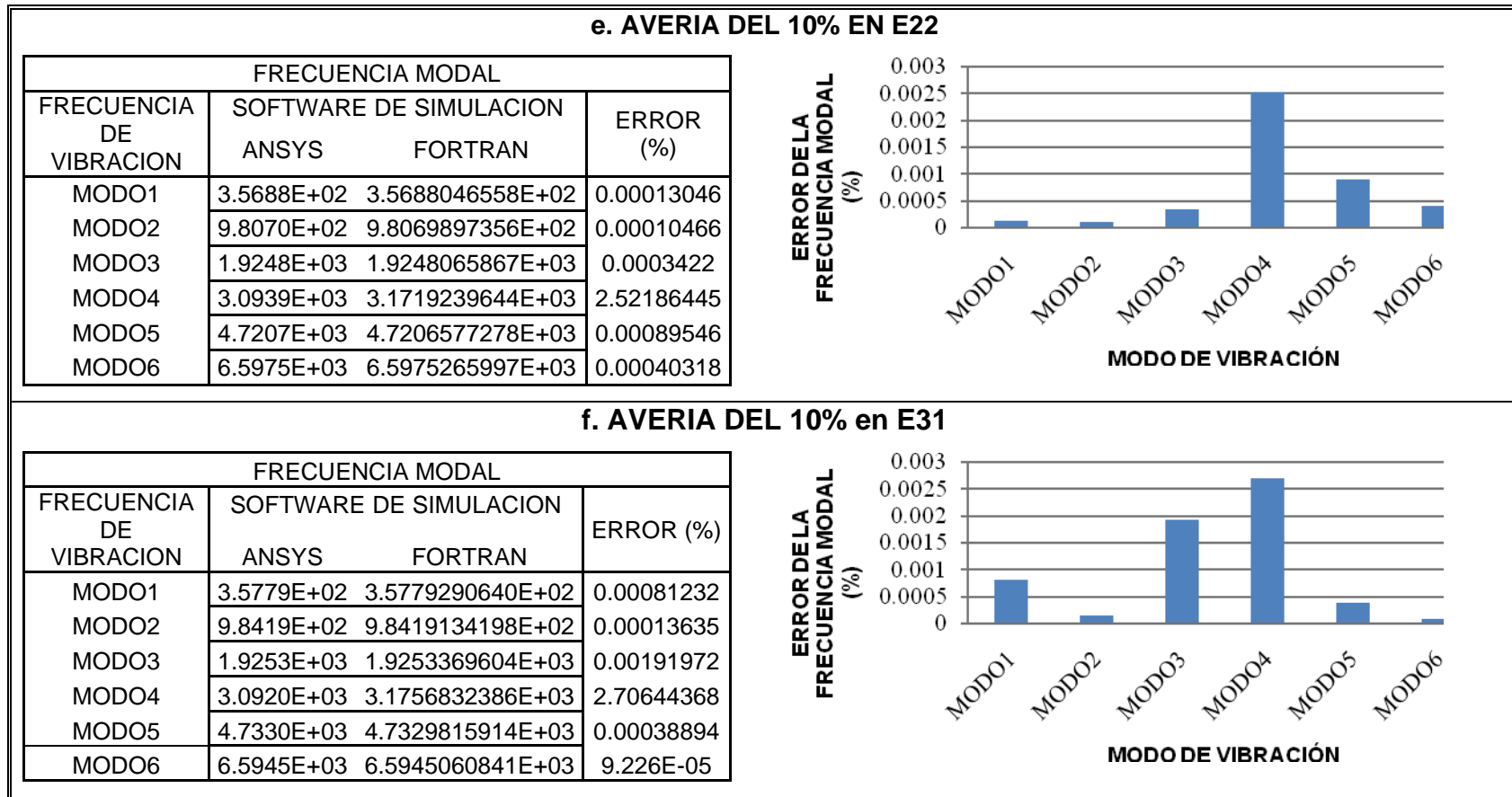
Nota: En el diagrama de barras de la figura b, el valor del MODO4 es escalado en una proporción 1000:1, para poder establecer un grado de comparación con los errores de los demás modos de vibración.

Tabla C.1 (Continuación). Validación de frecuencias modales “ANSYS vs FORTRAN”, para estructura en configuración Libre-Libre.



Nota: En el diagrama de barras de las figuras c y d, los valores del MODO4 son escalados en una proporción 1000:1, para poder establecer un grado de comparación con los errores de los demás modos de vibración.

Tabla C.1 (Continuación). Validación de frecuencias modales “ANSYS vs FORTRAN”, para estructura en configuración Libre-Libre.

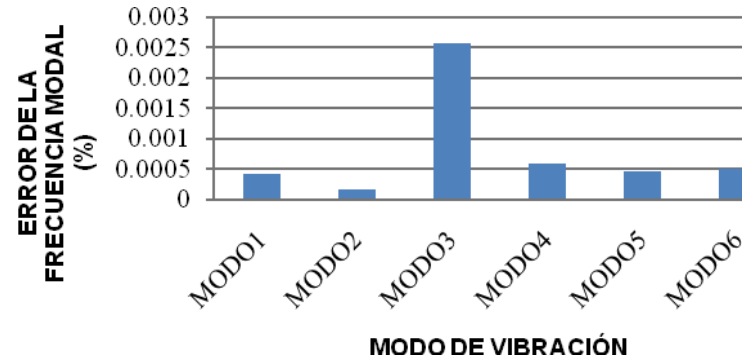


Nota: En el diagrama de barras de las figuras e y f, los valores del MODO4 son escalados en una proporción 1000:1, para poder establecer un grado de comparación con los errores de los demás modos de vibración.

Tabla C. 2. Validación de frecuencias modales “ANSYS vs FORTRAN”, para estructura en configuración Apoyo simple.

a. AVERIA DEL 10% EN E1

FRECUENCIA MODAL			
FRECUENCIA DE VIBRACION	SOFTWARE DE SIMULACION		ERROR (%)
	ANSYS	FORTRAN	
MODO1	1.5831E+02	1.5831066785E+02	0.00042186
MODO2	6.3322E+02	6.3322102928E+02	0.00016255
MODO3	1.4247E+03	1.4246633641E+03	0.00257148
MODO4	2.5325E+03	2.5325149828E+03	0.00059162
MODO5	3.9566E+03	3.9565817417E+03	0.00046146
MODO6	5.6966E+03	5.6965714220E+03	0.00050167



b. AVERIA DEL 10% en E5

FRECUENCIA MODAL			
FRECUENCIA DE VIBRACION	SOFTWARE DE SIMULACION		ERROR (%)
	ANSYS	FORTRAN	
MODO1	1.5821E+02	1.5821172106E+02	0.00108783
MODO2	6.3194E+02	6.3193959493E+02	6.41E-05
MODO3	1.4202E+03	1.4202148423E+03	0.00104509
MODO4	2.5247E+03	2.5247338829E+03	0.00134206
MODO5	3.9491E+03	3.9490664586E+03	0.00084934
MODO6	5.6941E+03	5.6941215404E+03	0.00037829

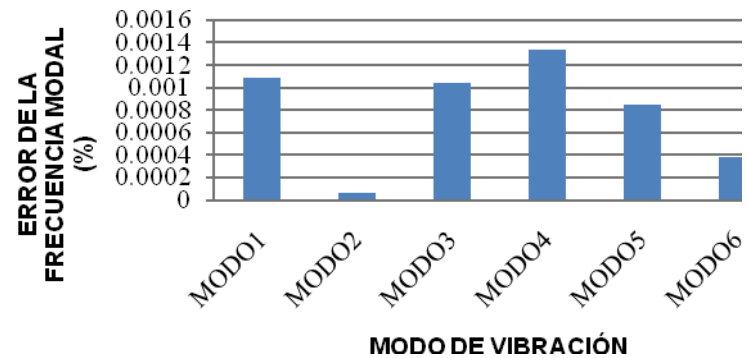
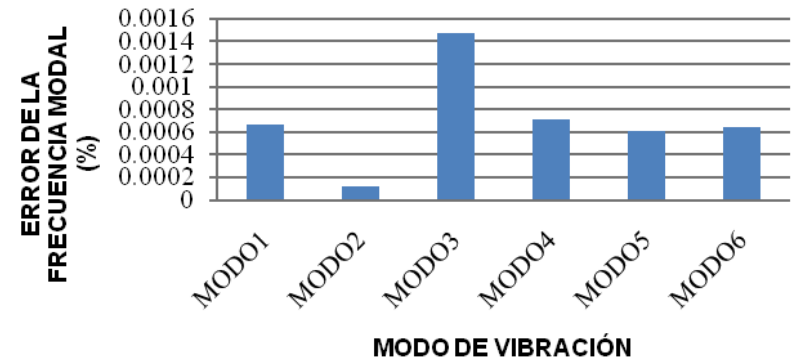


Tabla C.2 (Continuación). Validación de frecuencias modales “ANSYS vs FORTRAN”, para estructura en configuración Apoyo simple.

d. AVERIA DEL 10% EN E10

FRECUENCIA MODAL			
FRECUENCIA DE VIBRACION	SOFTWARE DE SIMULACION		ERROR (%)
	ANSYS	FORTAN	
MODO1	1.5796E+02	1.5795895356E+02	0.00066247
MODO2	6.3126E+02	6.3125927220E+02	0.00011529
MODO3	1.4242E+03	1.4242209725E+03	0.00147258
MODO4	2.5302E+03	2.5302179873E+03	0.0007109
MODO5	3.9444E+03	3.9444239726E+03	0.00060776
MODO6	5.6908E+03	5.6908366108E+03	0.00064333



e. AVERIA DEL 10% en E18

FRECUENCIA MODAL			
FRECUENCIA DE VIBRACION	SOFTWARE DE SIMULACION		ERROR (%)
	ANSYS	FORTAN	
MODO1	1.5778E+02	1.577776E+02	0.00149231
MODO2	6.3306E+02	6.330590E+02	0.00015308
MODO3	1.4208E+03	1.420823E+03	0.00163226
MODO4	2.5302E+03	2.530231E+03	0.00123572
MODO5	3.9502E+03	3.950228E+03	0.00072017
MODO6	5.6872E+03	5.687246E+03	0.00080219

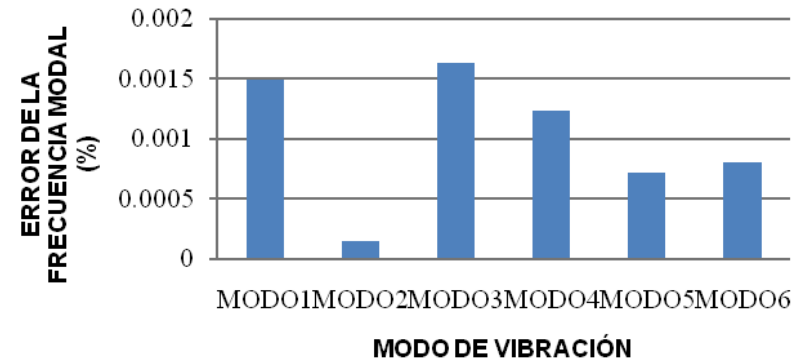
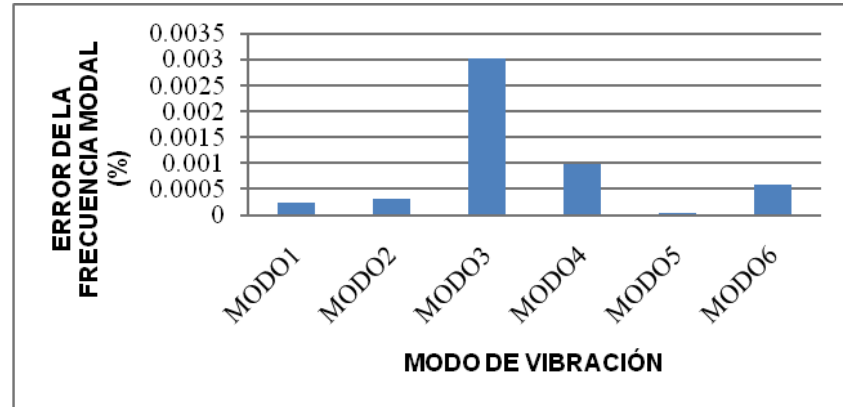


Tabla C.2 (Continuación). Validación de frecuencias modales "ANSYS vs FORTRAN", para estructura en configuración Apoyo simple.

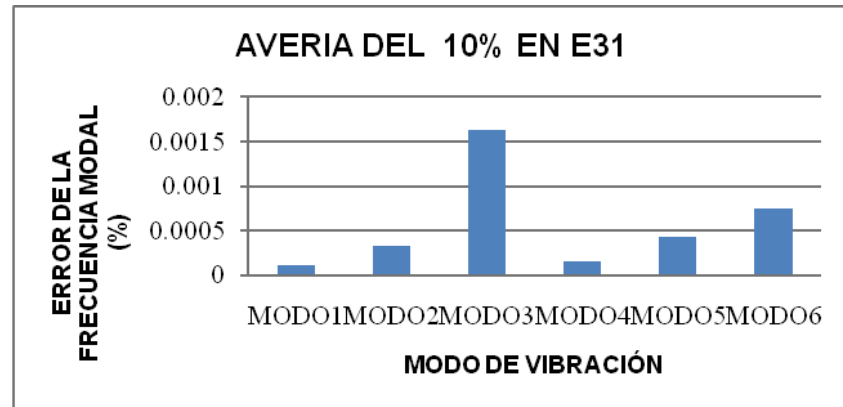
f. AVERIA DEL 10% EN E22

FRECUENCIA MODAL			
FRECUENCIA DE VIBRACION	SOFTWARE DE SIMULACION		ERROR (%)
	ANSYS	FORTAN	
MODO1	1.5791E+02	1.5790961450E+02	0.00024413
MODO2	6.3156E+02	6.3155798705E+02	0.00031873
MODO3	1.4248E+03	1.4247567218E+03	0.00303749
MODO4	2.5270E+03	2.5269754256E+03	0.00097247
MODO5	3.9468E+03	3.9468013780E+03	3.4914E-05
MODO6	5.6980E+03	5.6979669286E+03	0.0005804



g. AVERIA DEL 10% en E31

FRECUENCIA MODAL			
FRECUENCIA DE VIBRACION	SOFTWARE DE SIMULACION		ERROR (%)
	ANSYS	FORTAN	
MODO1	1.5830E+02	1.5830017380E+02	0.00010979
MODO2	6.3306E+02	6.3305791729E+02	0.00032899
MODO3	1.4239E+03	1.4238768134E+03	0.00162838
MODO4	2.5302E+03	2.5301958459E+03	0.00016418
MODO5	3.9514E+03	3.9514172055E+03	0.00043543
MODO6	5.6870E+03	5.6870423323E+03	0.00074437



ANEXO D

PRUEBAS DE VERIFICACIÓN A PARTIR DE LOS VALORES TEÓRICOS, PARA LAS MATRICES DE MASA Y RIGIDEZ ENSAMBLADA EN FORTRAN

A continuación, se describen cada una de las pruebas de validación efectuadas sobre las matrices de masa y rigidez de la estructura, obtenidas a partir de simulaciones realizadas con FORTRAN.

En primera instancia, dado el tamaño de las matrices ensambladas para una estructura seccionada en 32 elementos “64*64 grados de libertad idealmente”, el proceso de validación realizado se reporta para el mismo caso de análisis de la tabla B.1.1, en configuración de apoyo simple y modificando el número de particiones a 8 elementos.

Sin embargo, se realizaron múltiples pruebas de confrontación en diversos escenarios de daño con 8 y 32 elementos, en diferentes configuraciones de apoyo, bajo condiciones nominales y de falla. Así mismo, se simularon averías en uno y dos elementos de la estructura, ubicados en diferentes puntos de la misma y con diferentes porcentajes de daño. A continuación se describe dos ejemplos de la metodología empleada en la validación de las matrices M y K de la estructura seleccionada.

D.1 CÁLCULO DE VALORES TEÓRICOS PARA MATRIZ K

Teniendo en cuenta la información referenciada en la sección 2.1 y la tabla D.1.1, se efectuaron los cálculos teóricos correspondientes para cada componente de la matriz de rigidez pertinente a la estructura analizada. Posteriormente, se confrontaron dichos valores teóricos con los resultados obtenidos a partir de las simulaciones reportadas en la tabla D.1.2, efectuadas con la herramienta alternativa implementada en FORTRAN.

Tabla D.1. 1. Valores teóricos para la matriz K (Extendida), para viga simplemente apoyada.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 5$	$\phi 6$	$\phi 7$	$\phi 8$	$\phi 9$
V1	A	-A	0	0	0	0	0	0	0	B	B	0	0	0	0	0	0	0
V2	-A	2A	-A	0	0	0	0	0	0	-B	0	B	0	0	0	0	0	0
V3	0	-A	2A	-A	0	0	0	0	0	0	-B	0	B	0	0	0	0	0
V4	0	0	-A	2A	A	0	0	0	0	0	0	-B	0	B	0	0	0	0
V5	0	0	0	-A	2A	-A	0	0	0	0	0	0	-B	0	B	0	0	0
V6	0	0	0	0	-A	2A	-A	0	0	0	0	0	0	-B	0	B	0	0
V7	0	0	0	0	0	-A	2A	-A	0	0	0	0	0	0	-B	0	B	0
V8	0	0	0	0	0	0	-A	2A	-A	0	0	0	0	0	0	-B	0	B
V9	0	0	0	0	0	0	0	-A	A	0	0	0	0	0	0	0	-B	B
$\phi 1$	B	-B	0	0	0	0	0	0	0	D	C	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 2$	B	0	-B	0	0	0	0	0	0	C	2D	C	0	0	0	0	0	0
$\phi 3$	0	B	0	-B	0	0	0	0	0	0	C	2D	C	0	0	0	0	0
$\phi 4$	0	0	B	0	-B	0	0	0	0	0	0	C	2D	C	0	0	0	0
$\phi 5$	0	0	0	B	0	-B	0	0	0	0	0	0	C	2D	C	0	0	0
$\phi 6$	0	0	0	0	B	0	-B	0	0	0	0	0	0	C	2D	C	0	0
$\phi 7$	0	0	0	0	0	B	0	-B	0	0	0	0	0	0	C	2C	C	0
$\phi 8$	0	0	0	0	0	0	D	0	-B	0	0	0	0	0	0	C	2D	C
$\phi 9$	0	0	0	0	0	0	0	B	-B	0	0	0	0	0	0	0	C	D

Donde:

$$A = 12 \frac{EI}{L^3} = 3627942779352, \quad B = 6 \frac{EI}{L^2} = 5532612739, \quad C = 2 \frac{EI}{L} = 56248229.51, \quad D = 4 \frac{EI}{L} = 112496459, \quad 2A = 7255885559 \text{ y } 2D = 224992918$$

Tabla D.1. 2. Valores experimentales para la matriz K, para viga simplemente apoyada, obtenidos a partir de FORTRAN.

V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
7255884628	3627942314	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
3627942314	7255884628	3.6279E+09	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-5.5326E+08	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0	3627942314	7.2559E+09	-3.6279E+09	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-5.5326E+08	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0	0	3.6279E+09	7.2559E+09	-3.6279E+09	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-5.5326E+08	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0	0	0.0000E+00	-3.6279E+09	7.2559E+09	-3.6279E+09	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-5.5326E+08	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	-3.6279E+09	7.2559E+09	3.6279E+09	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-5.5326E+08	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00
0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-3.6279E+09	7.2559E+09	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-5.5326E+08	0.0000E+00	5.5326E+08
-553261216	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1250E+08	5.6248E+07	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0	-553261216	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.6248E+07	2.2499E+08	5.6248E+07	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
553261216	0	5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.6248E+07	2.2499E+08	5.6248E+07	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0	553261216	0.0000E+00	-5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.6248E+07	2.2499E+08	5.6248E+07	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0	0	5.5326E+08	0.0000E+00	-5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.6248E+07	2.2499E+08	5.6248E+07	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0	0	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	-5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.6248E+07	2.2499E+08	5.6248E+07	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.6248E+07	2.2499E+08	5.6248E+07	0.0000E+00	0.0000E+00
0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.6248E+07	2.2499E+08	5.6248E+07	0.0000E+00
0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.5326E+08	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.6248E+07	2.2499E+08	5.6248E+07
0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.6248E+07	1.1250E+08	0.0000E+00

Finalmente, en la tabla D.1.3, se observa el contraste realizado entre los valores teóricos y los simulados en FORTRAN, evidenciando así la validez de la herramienta alternativa para el cálculo de la matriz de rigidez ensamblada.

Tabla D.1. 3. Contraste entre los valores teóricos y experimentales de los parámetros de la matriz K

PARÁMETRO	VALOR		
	TEÓRICO	EXPERIMENTAL	ERROR
A	3627942779.35158000	3627942313.83899000	1.28313E-05
2A	7255885558.70315000	7255884627.67799000	1.28313E-05
B	553261273.85111500	553261215.83497900	1.04862E-05
C	56248229.50819670	56248224.92896710	8.14111E-06
D	112496459.01639300	112496449.85793400	8.14111E-06
2D	224992918.03278700	224992899.71586800	8.14111E-06

D.2 CÁLCULOS DE VALORES TEÓRICOS PARA MATRIZ M

El procedimiento para el cálculo de los valores teóricos de la matriz de masas concentradas, se realizó teniendo como punto de partida las ecuaciones correspondientes de la sección 2.1, Su valor teórico se reporta en la tabla D.2.1 y los resultados experimentales de simulación, en la tabla D.2.2.

Posteriormente, en la tabla D.2.3, se determina el porcentaje de error existente entre los valores mencionados anteriormente. Comprobando así, la fiabilidad del código empleado por la herramienta alternativa de simulación "FORTRAN".

Tabla D.2. 1. Valores teóricos para la matriz M (Extendida), para viga simplemente apoyada.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 5$	$\phi 6$	$\phi 7$	$\phi 8$	$\phi 9$	
V1	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2	0	2A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3	0	0	2A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4	0	0	0	2A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V5	0	0	0	0	2A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V6	0	0	0	0	0	2A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V7	0	0	0	0	0	0	2A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V8	0	0	0	0	0	0	0	2A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V9	0	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\phi 9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Donde:

$$A = \frac{\rho AL}{2} = 3.63327956, \quad 2A = \rho AL = 7.26655912$$

Tabla D.2. 2. Valores experimentales para la matriz K, para viga simplemente apoyada, obtenidos a partir de FORTRAN.

V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
7.2666E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	7.2666E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	7.2666E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.2666E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.2666E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.2666E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.2666E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

Tabla D.2. 3. Contraste entre los valores teóricos y experimentales de los parámetros de la matriz K

PARÁMETRO	VALOR		
	TEÓRICO	EXPERIMENTAL	ERROR
2A	7255885558.70315000	7255884627.67799000	1.28313E-05

ANEXO E

DETECCIÓN DE DAÑOS SIMULADOS EN FORTRAN, A PARTIR DEL MÉTODO DE VARIACIÓN DE CURVATURA IMPLEMENTADO EN EXCEL

Finalizadas las pruebas de verificación de los procesos implementados en FORTRAN tanto para la generación de las matrices de ensamble de la estructura “M y K”, como de las frecuencias y formas modales para estructuras tipo viga y tubería, en diferentes condiciones de apoyo; se procedió a detectar los daños simulados a partir de un método clásico de diagnóstico, con el fin de verificar la fiabilidad de la información generada por cada uno de los escenarios de daño recreados.

El primer paso en este proceso de verificación, fue calcular la variación de la diferencia de curvatura “DC” de cada modo de vibración a partir de la ecuación 2-16. En segunda instancia, se estimó la variación promedio de la curvatura también conocida como FDC “el factor de diferencia absoluta de curvatura”, con base en la ecuación 2-17, para un número determinado de modos de vibración “La sumatoria de los N primeros modos”. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se verificó gráficamente la ubicación de daños inducidos.

A continuación se presentan las pruebas realizadas a la estructura de la tabla 7, en configuraciones Libre-Libre, y en apoyo simple. No obstante, dichas pruebas se realizaron para las 6 configuraciones de apoyo relacionadas en la tabla A2. Así mismo se recrearon escenarios con uno y dos elementos averiados ubicados para las posiciones señaladas en la figura C1, escogidas a partir del criterio descrito en la sección C.

En la sección E1, se realiza la detección para un daño en la estructura seleccionada. Posteriormente en la sección E2, se realiza el proceso análogo para dos daños. En la parte inicial de E1 y E2, se presenta la totalidad de

gráficas obtenidas, no obstante en los casos restantes solo se reportan los FDC.

E.1 DETECCIÓN DE UN DAÑO A PARTIR DEL MÉTODO DE VARIACIÓN DE CURVATURA, PARA UNA ESTRUCTURA EN CONFIGURACIÓN LIBRE-LIBRE

Tabla E.1. 1. Detección de daño para el elemento E1 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal

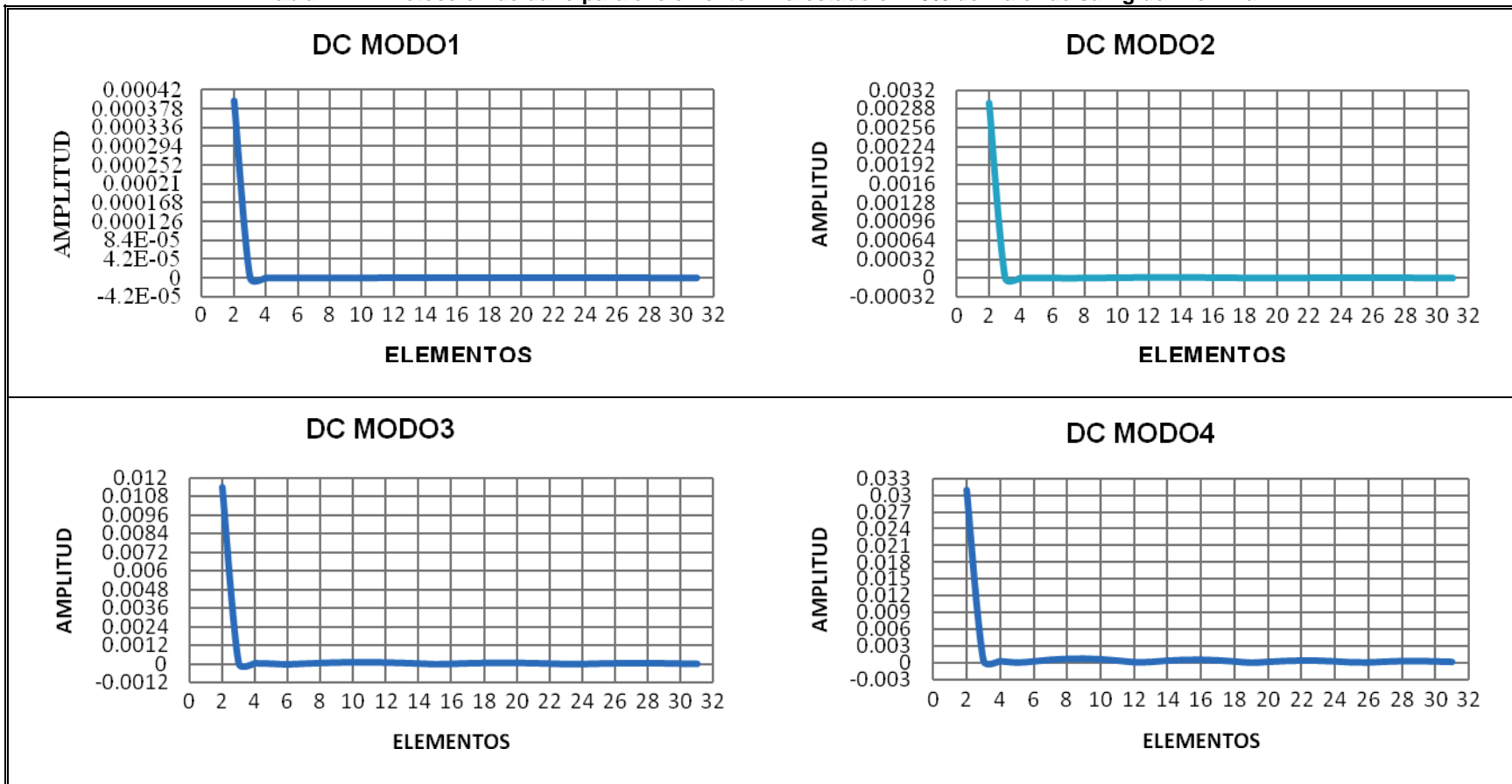


Tabla E.1.1 (Continuación). Detección de daño para el elemento E1 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal

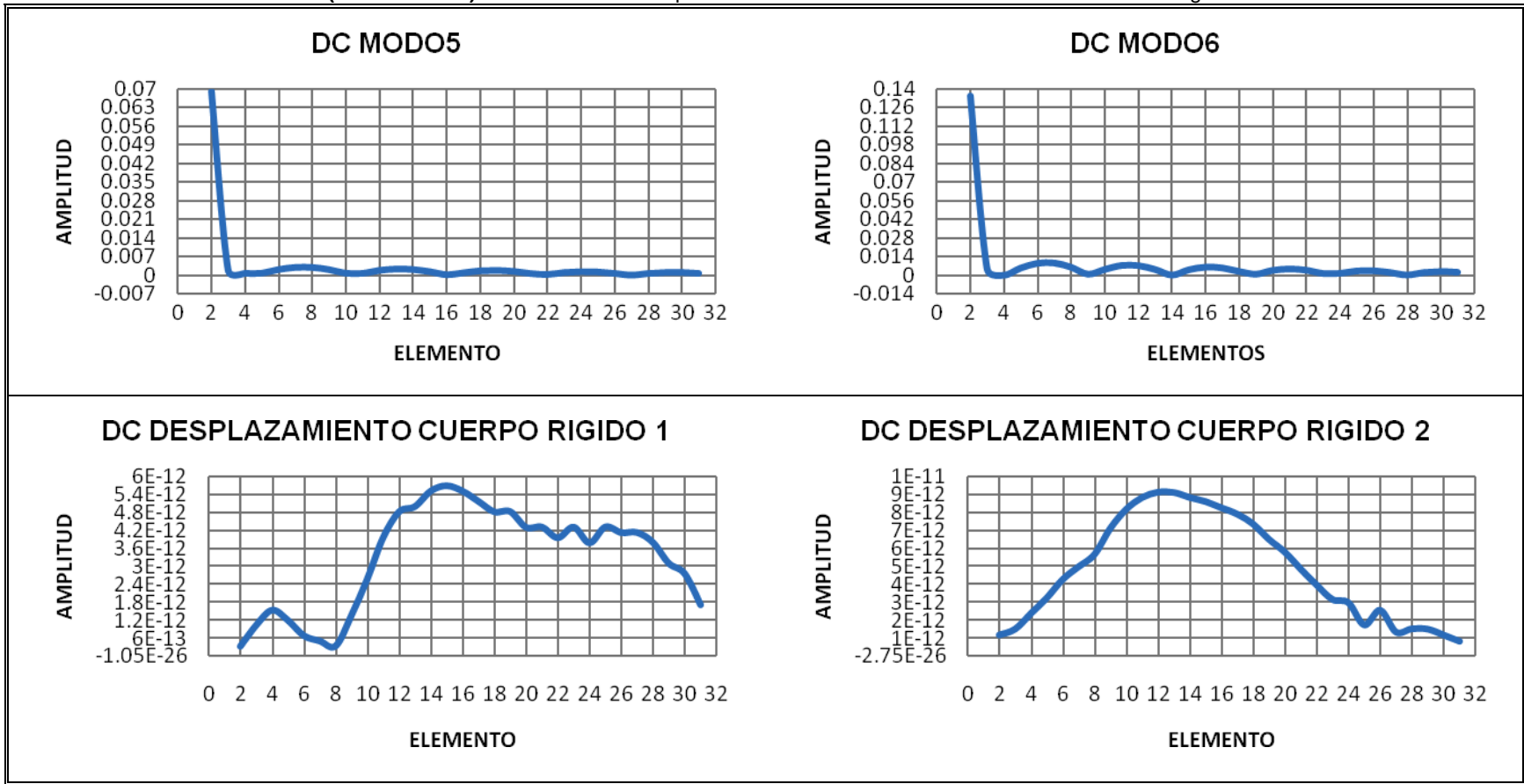


Tabla E.1.1 (Continuación). Detección de daño para el elemento E1 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal

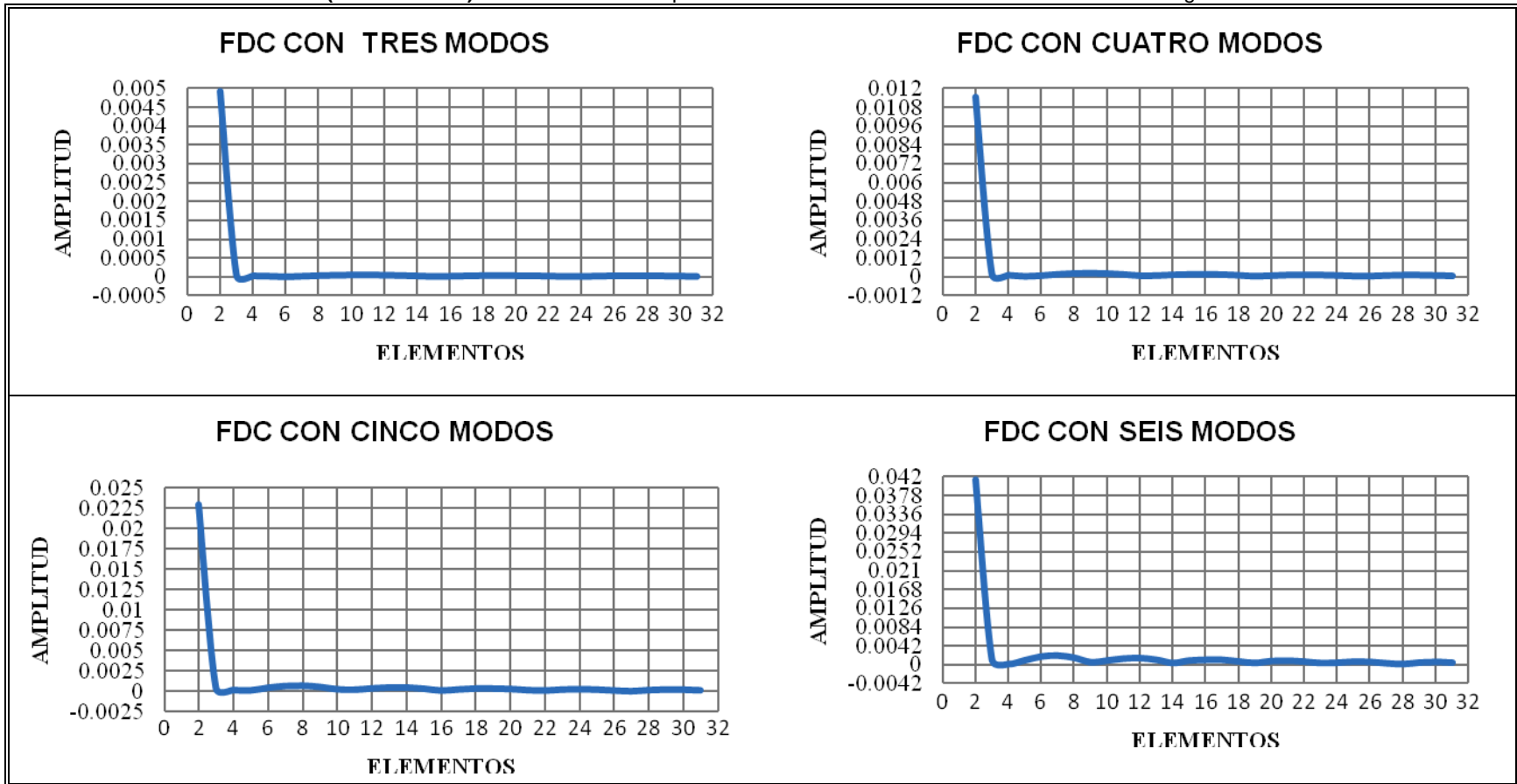


Tabla E.1. 2. Detección de daño para el elemento E5 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal

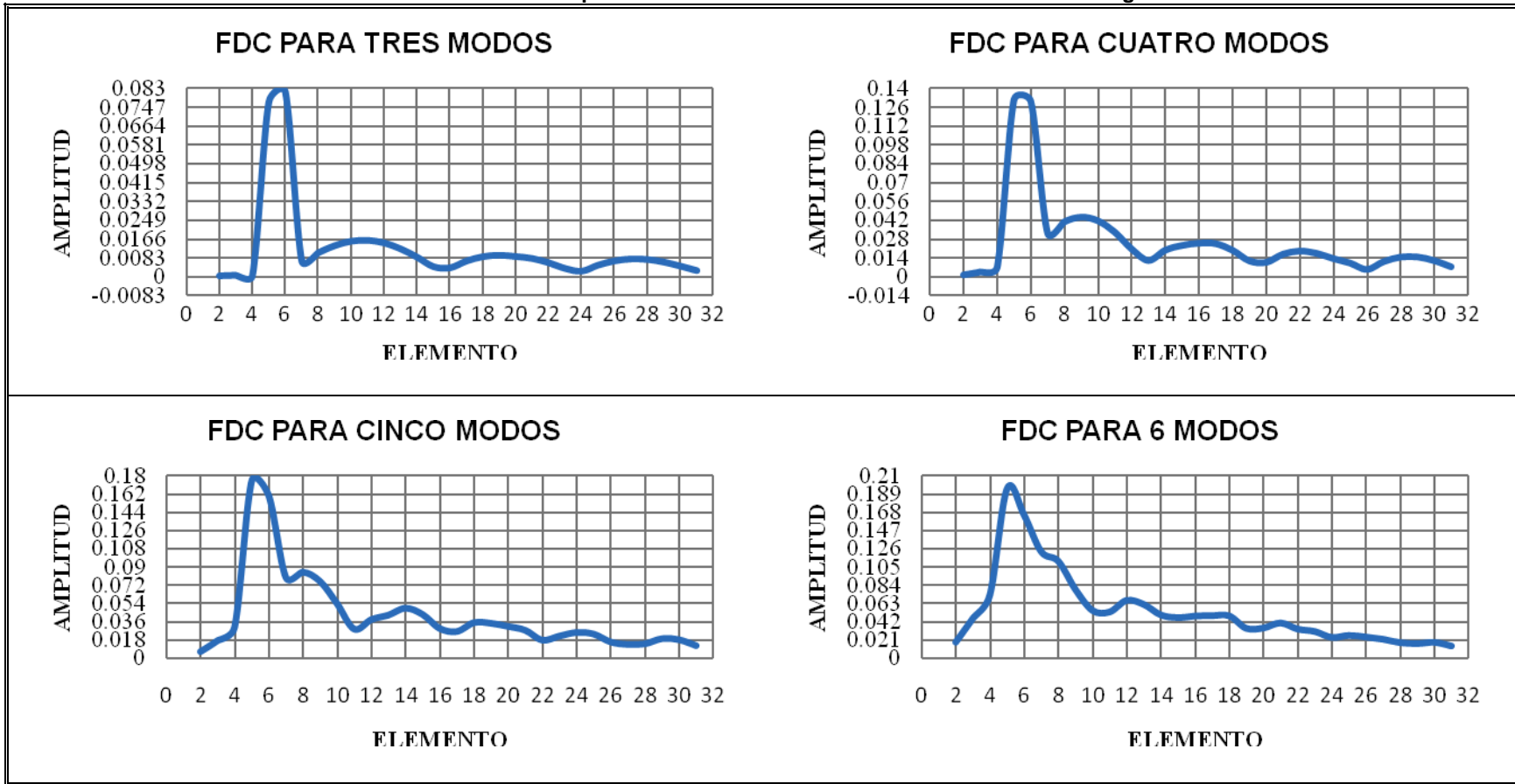


Tabla E.1. 3. Detección de daño para el elemento E10 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal

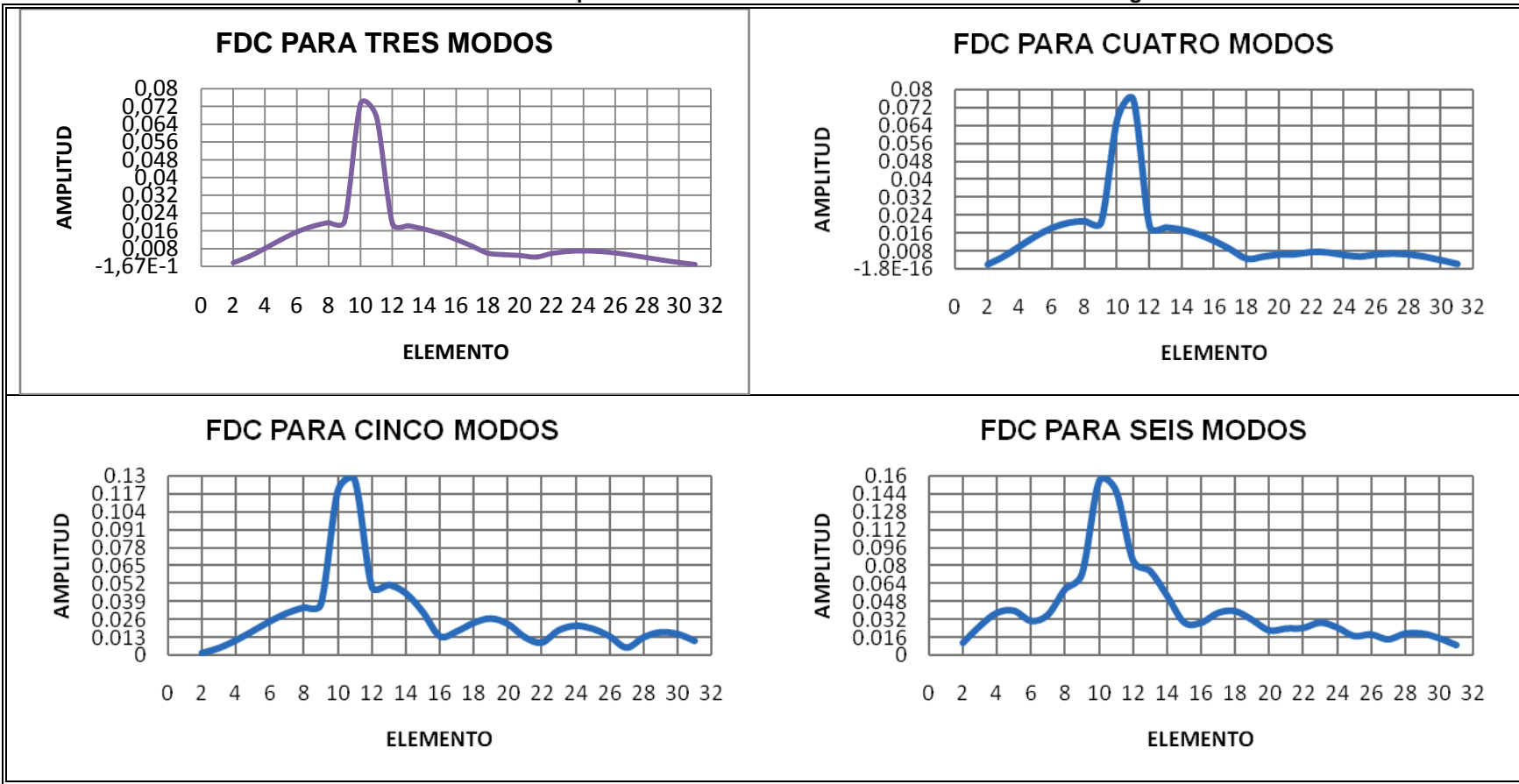


Tabla E.1. 4. Detección de daño para el elemento E18 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal

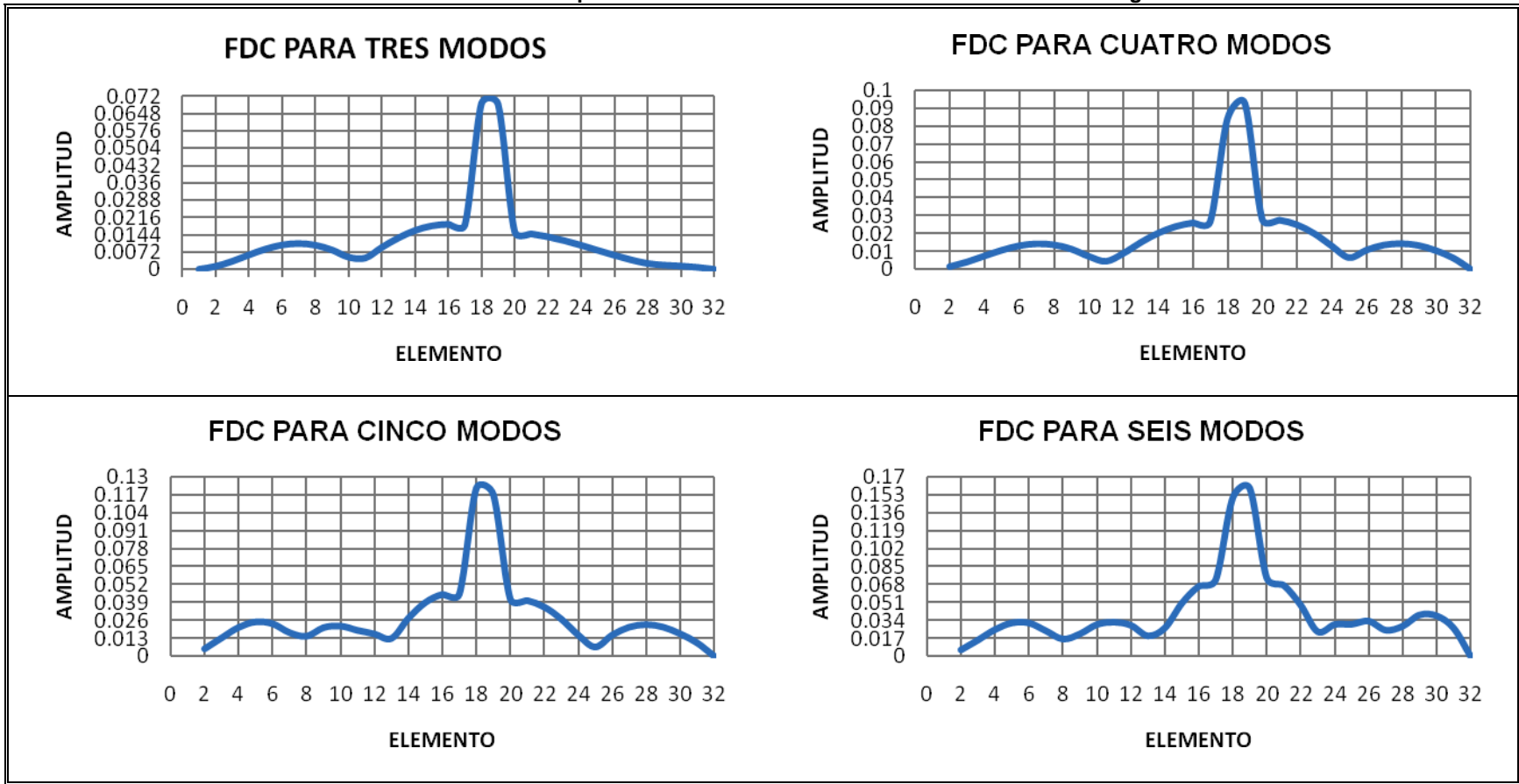


Tabla E.1. 5. Detección de daño para el elemento E22 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal

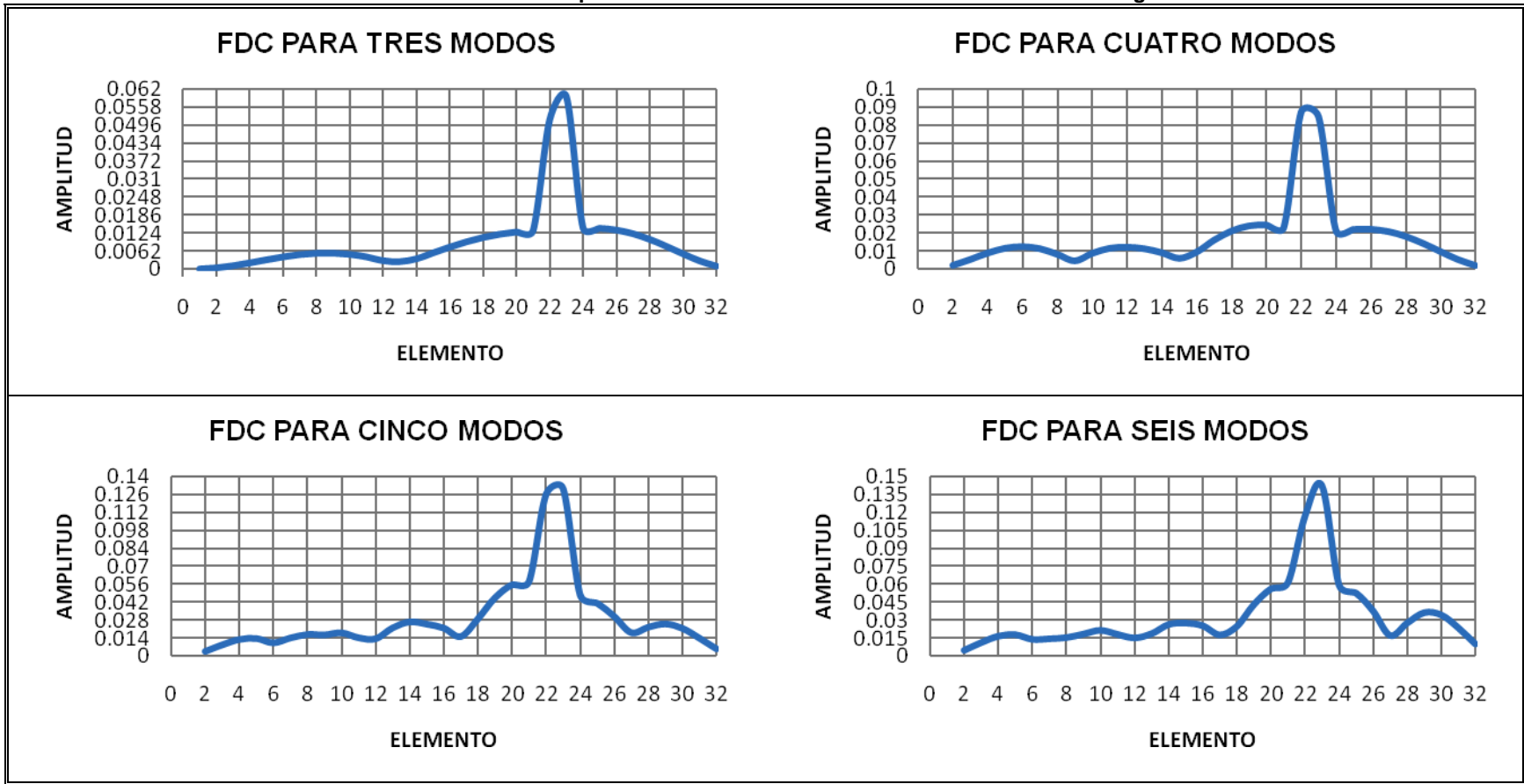
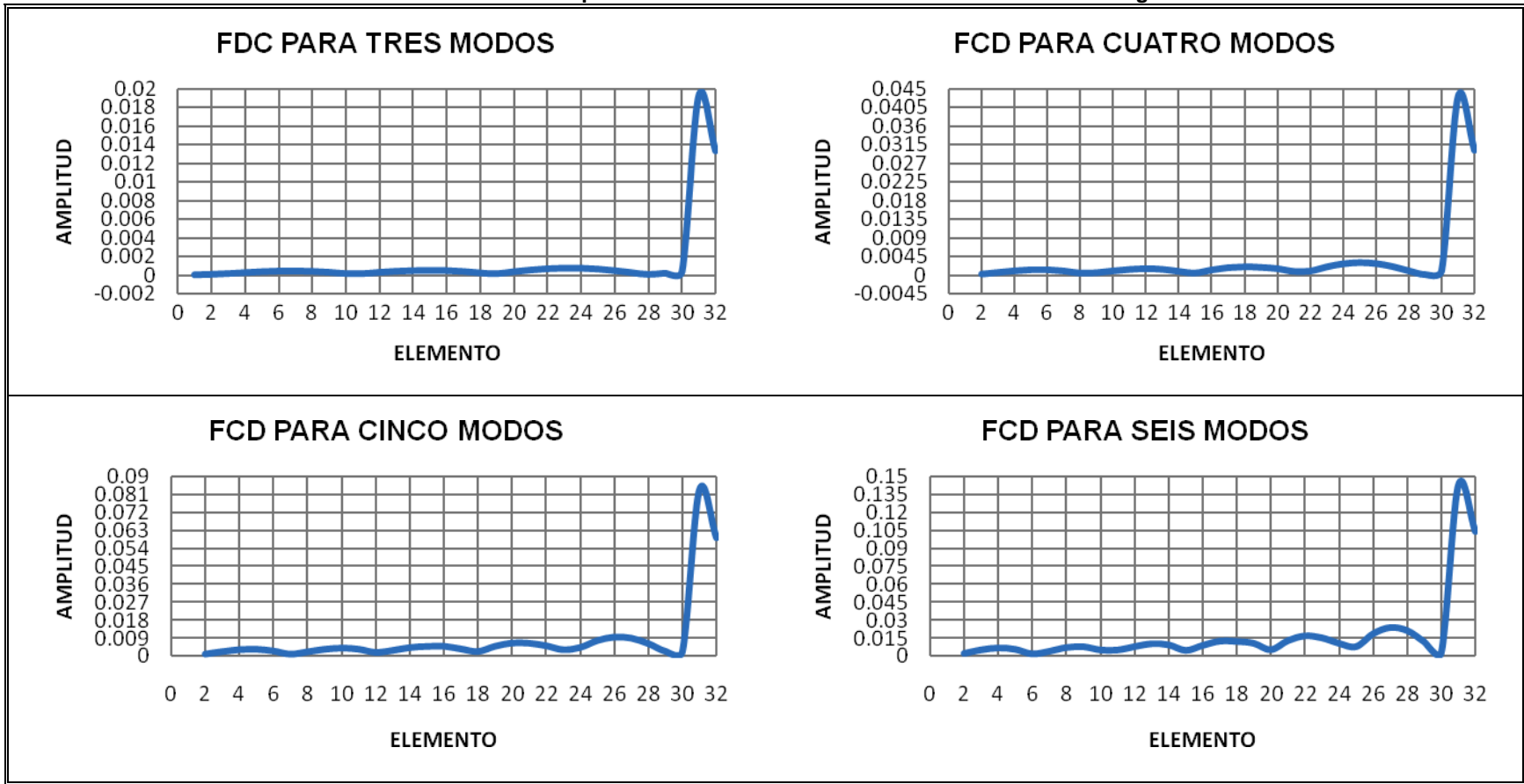


Tabla E.1. 6. Detección de daño para el elemento E31 afectado en 10% del valor de su rigidez nominal



E.2 DETECCIÓN DE UN DAÑO A PARTIR DEL MÉTODO DE VARIACIÓN DE CURVATURA, PARA UNA ESTRUCTURA EN CONFIGURACIÓN APOYO-SIMPLE

Tabla E.2. 1. Detección de daño para el elemento E1 afectado en 10% y E10 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal.

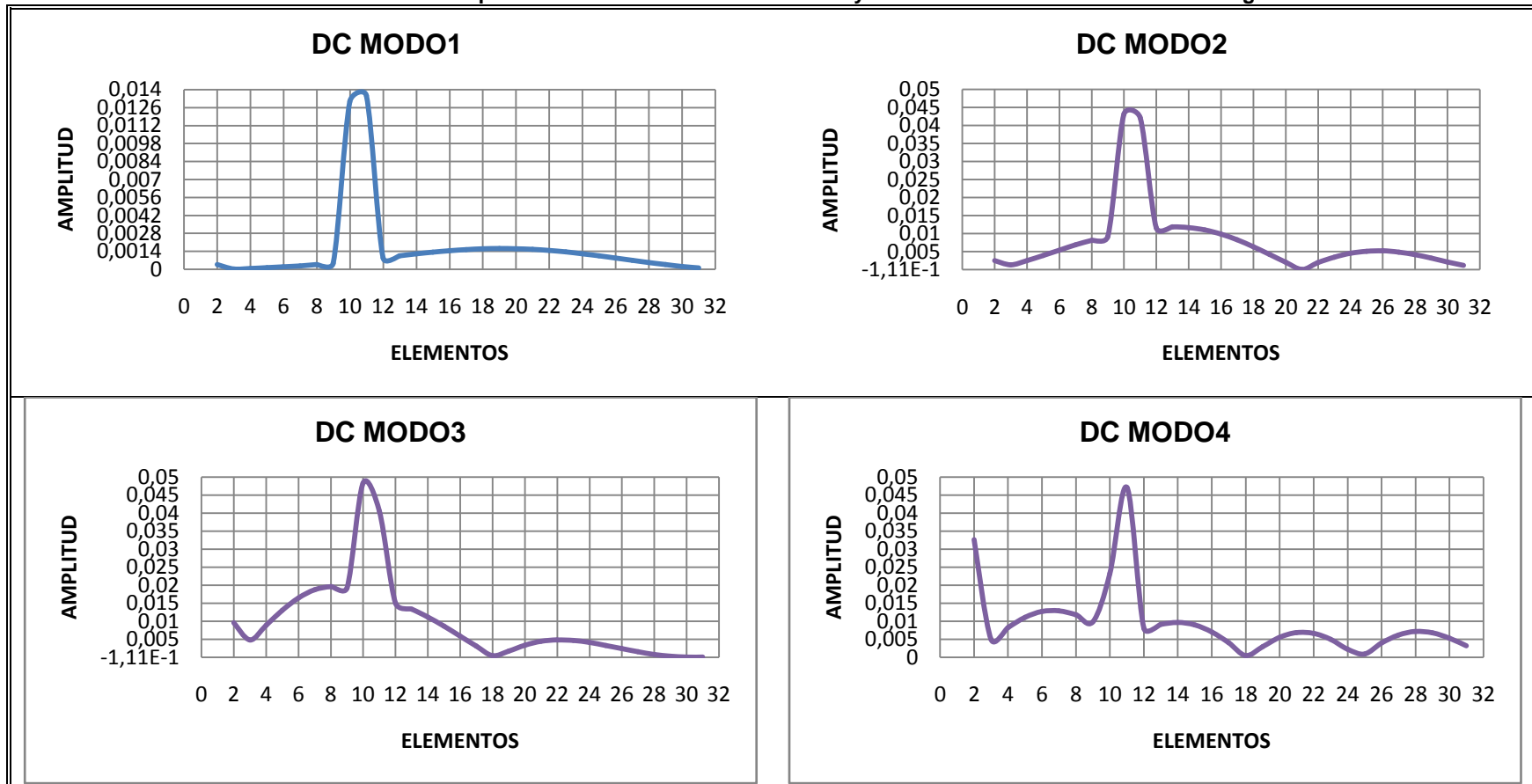


Tabla E.2.1 (continuación) Detección de daño para el elemento E1 afectado en 10% y E10 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal

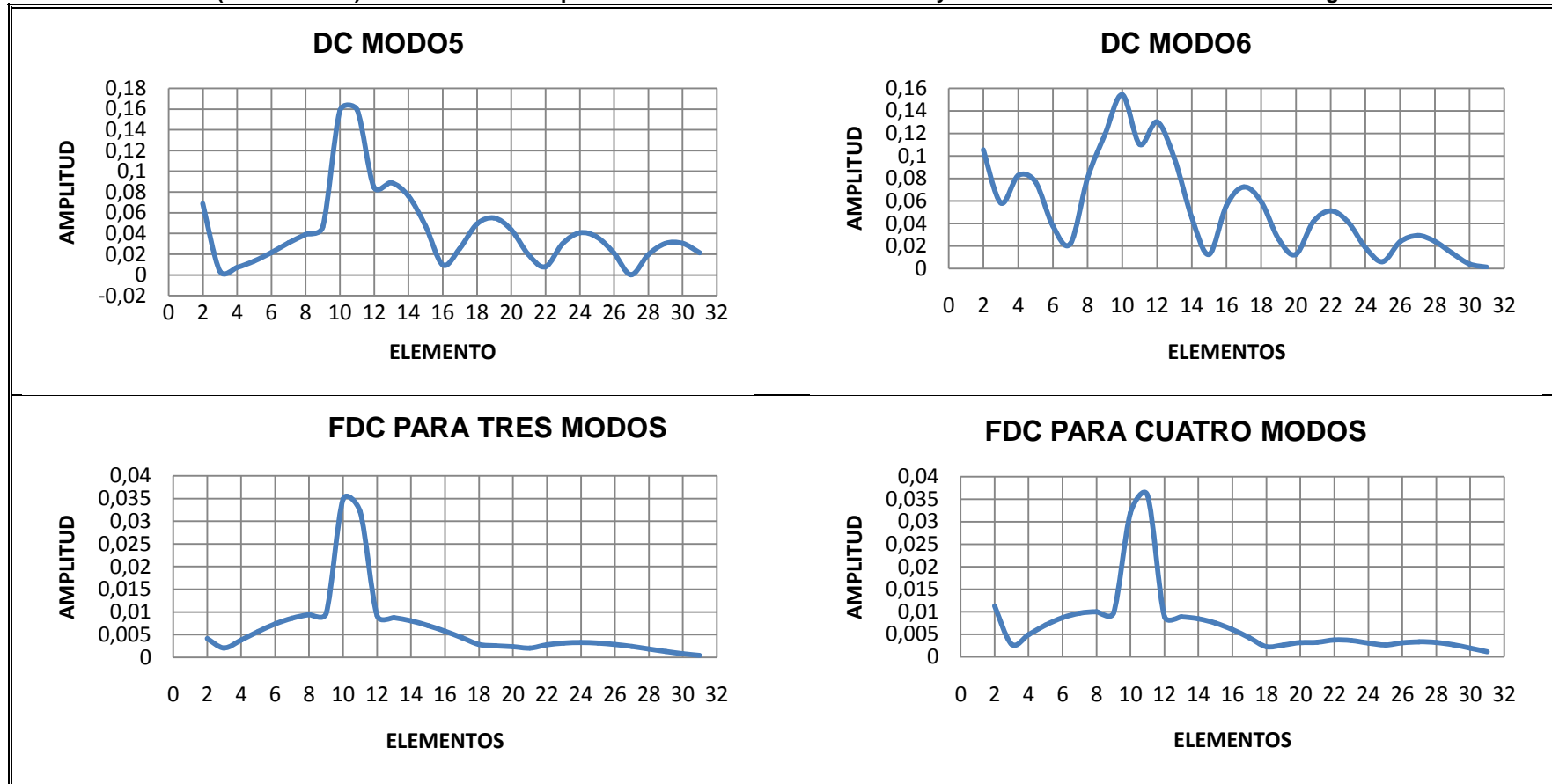


Tabla E.2. 2. Detección de daño para el elemento E1 afectado en 10% y E31 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal

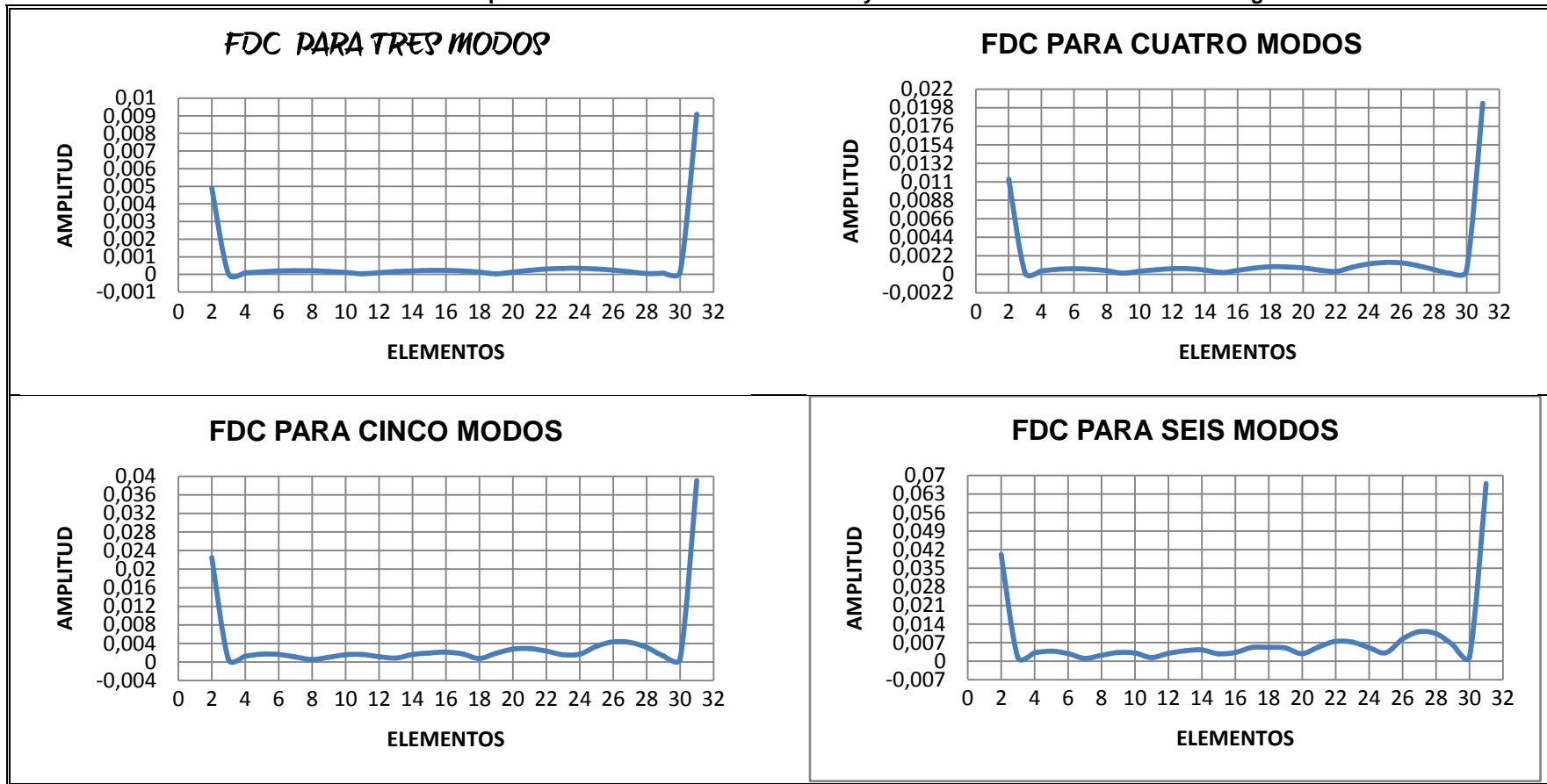


Tabla E.2. 3. Detección de daño para el elemento E5 afectado en 10% y E10 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal

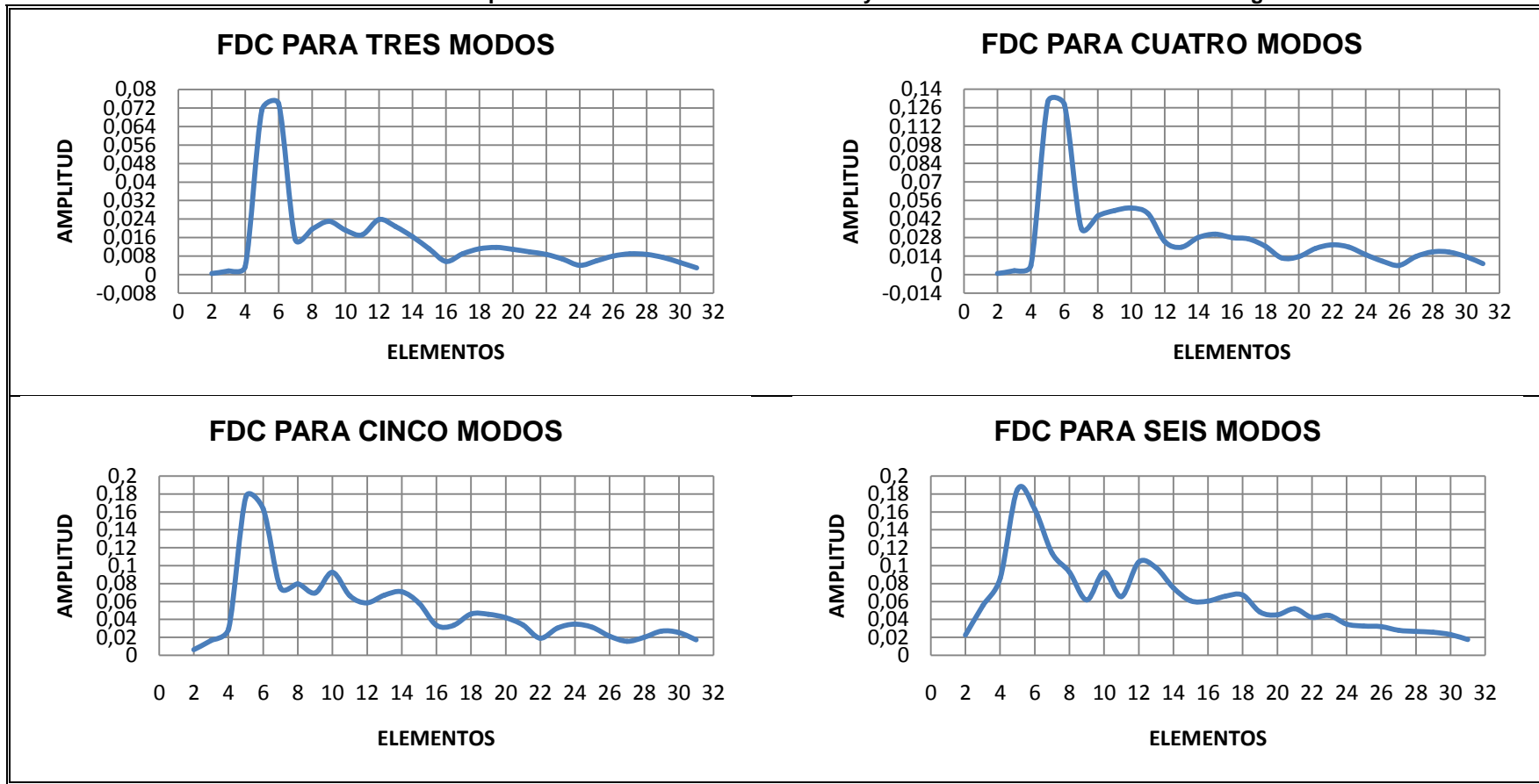


Tabla E.2. 4. Detección de daño para el elemento E5 afectado en 10% y E31 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal

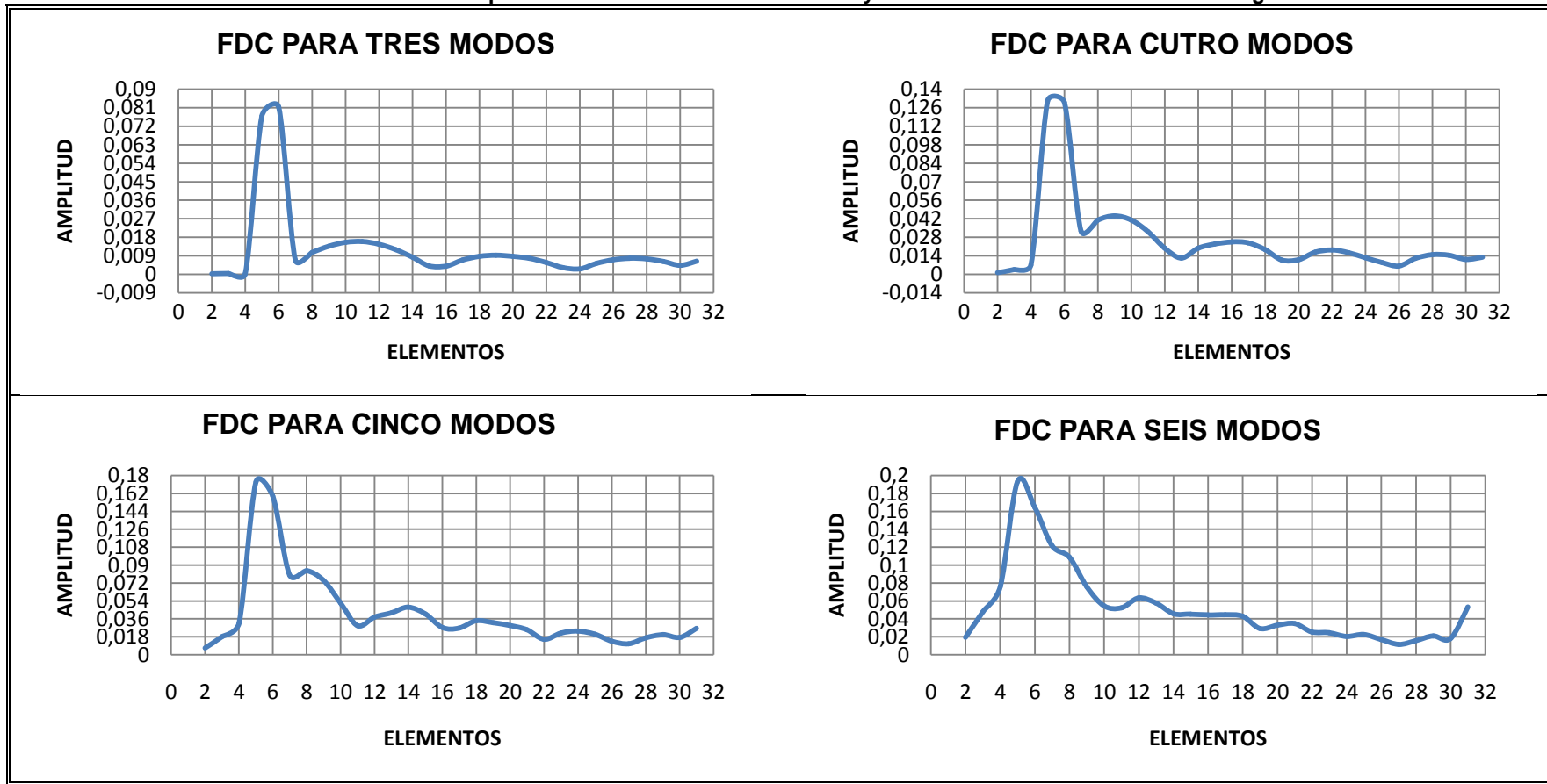


Tabla E.2. 5. Detección de daño para el elemento E10 afectado en 10% y E18 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal

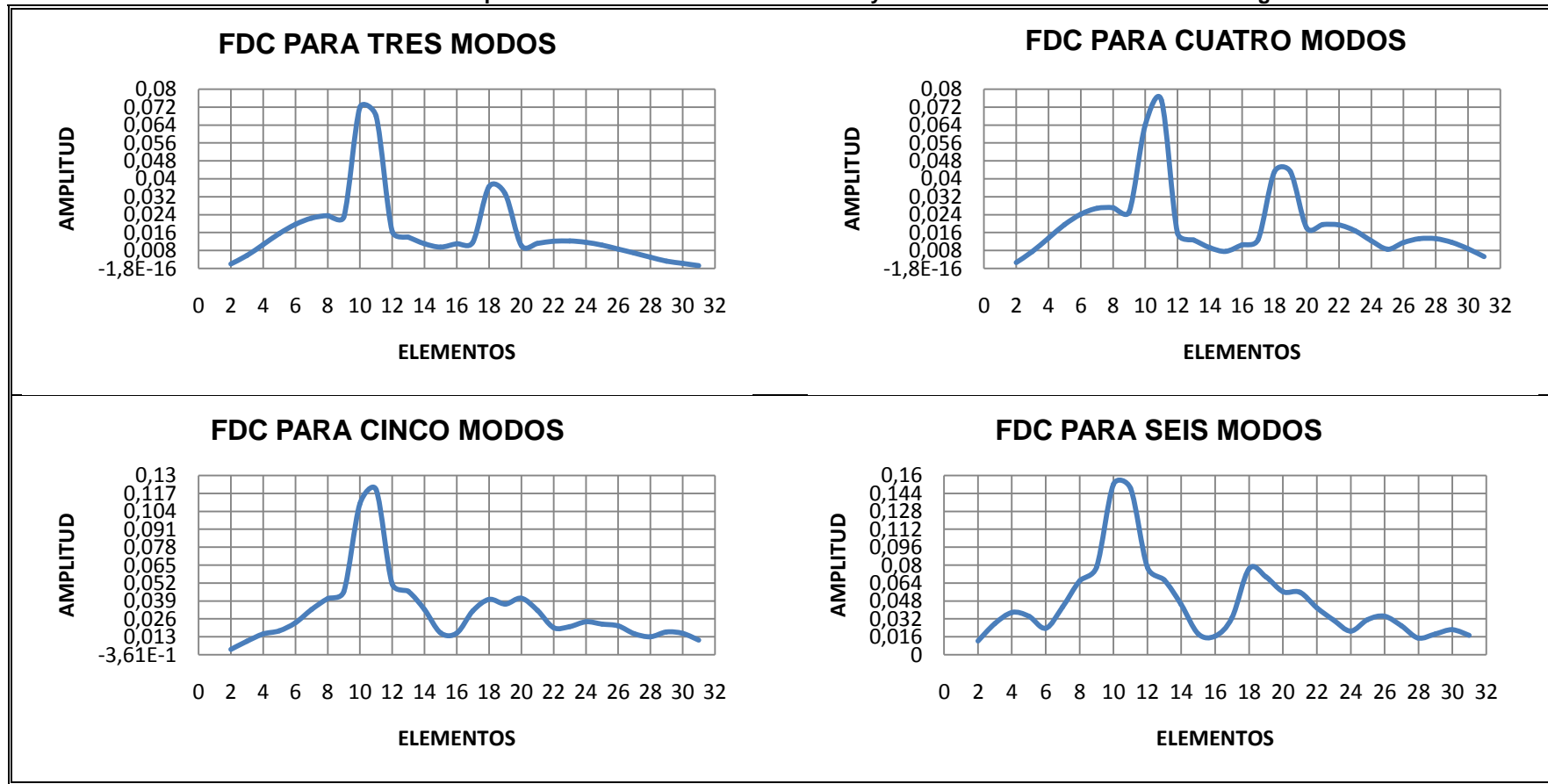


Tabla E.2. 6. Detección de daño para el elemento E10 afectado en 10% y E22 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal

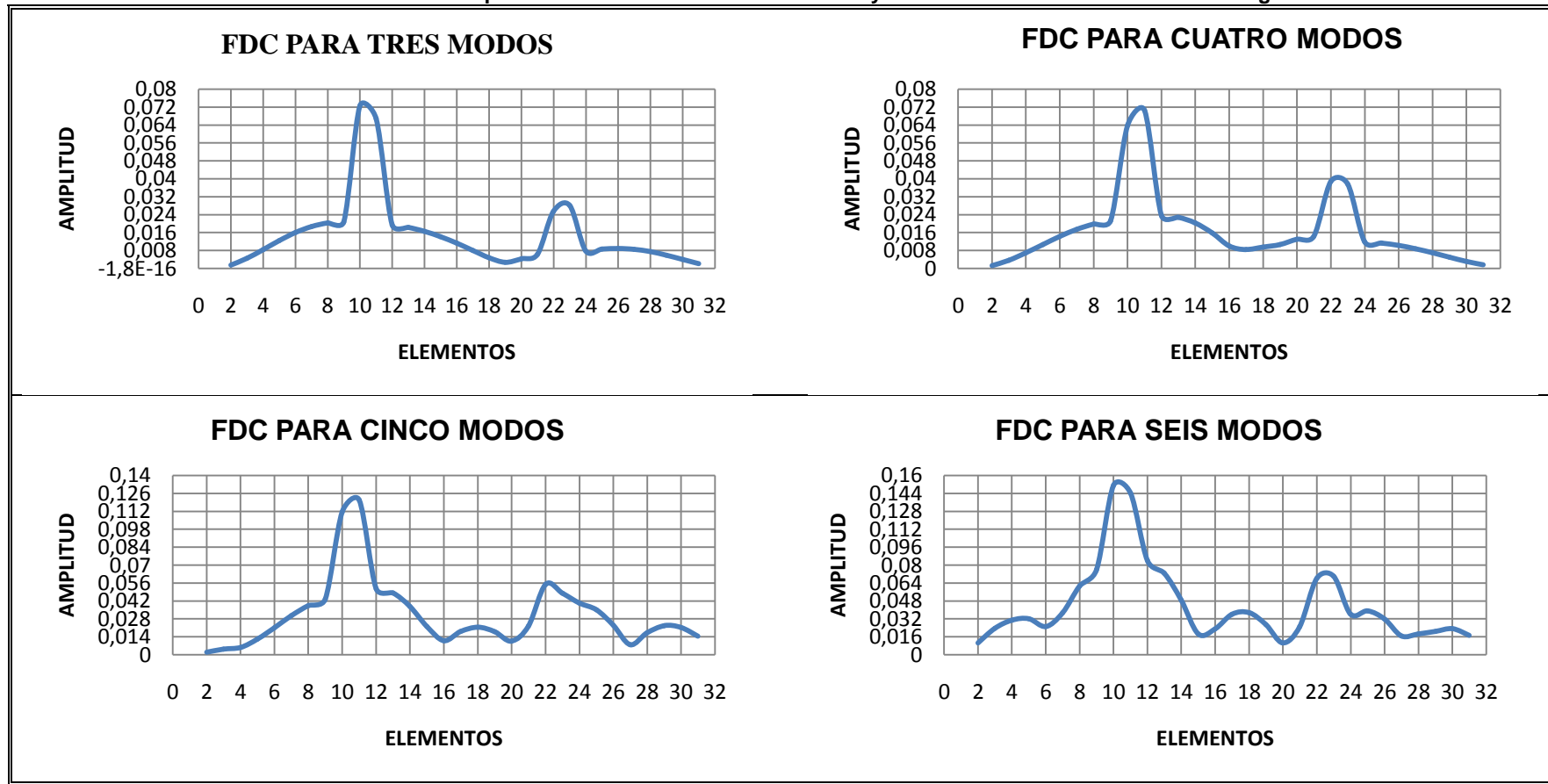


Tabla E.2. 7. Detección de daño para el elemento E18 afectado en 10% y E22 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal

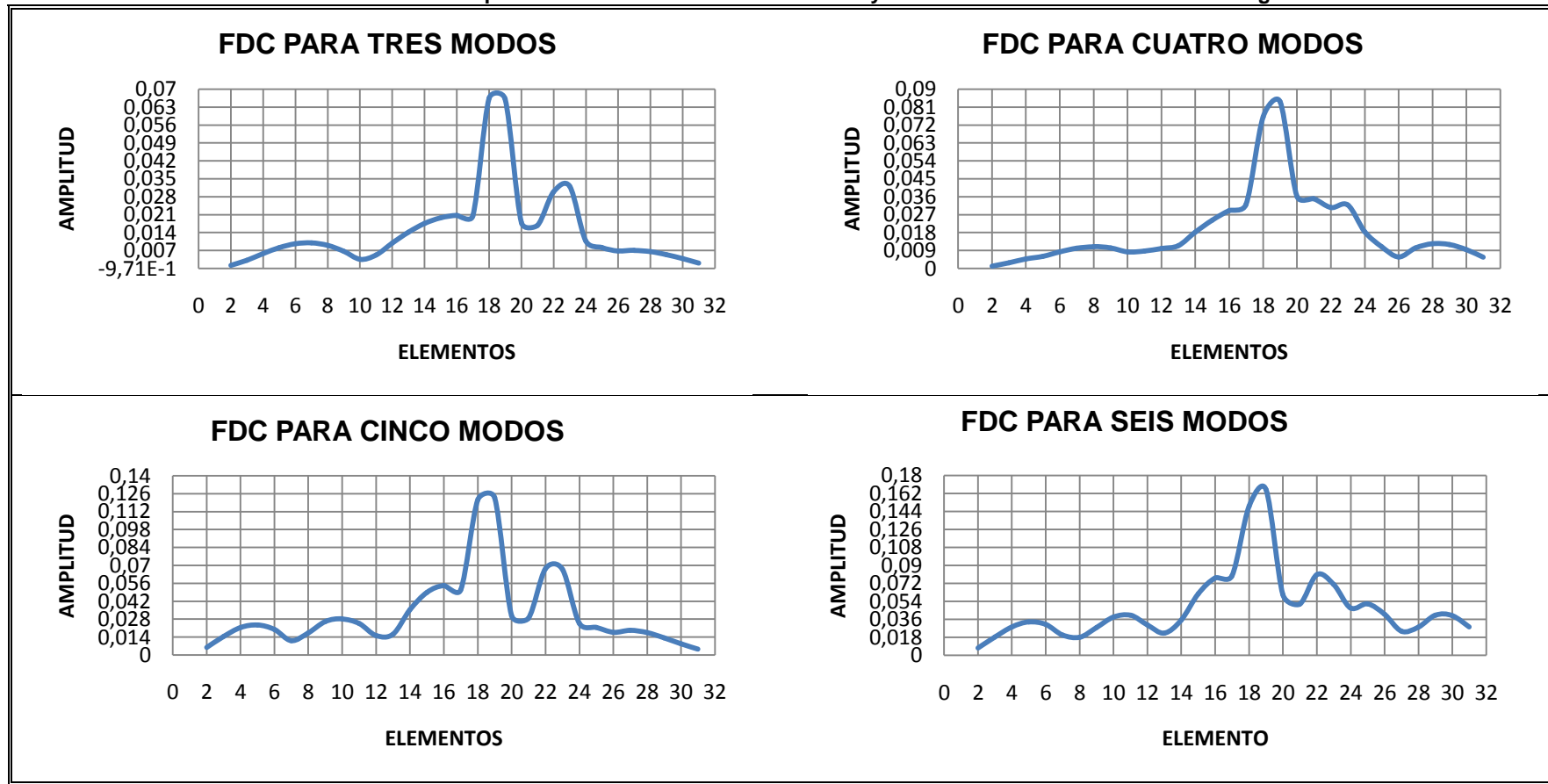
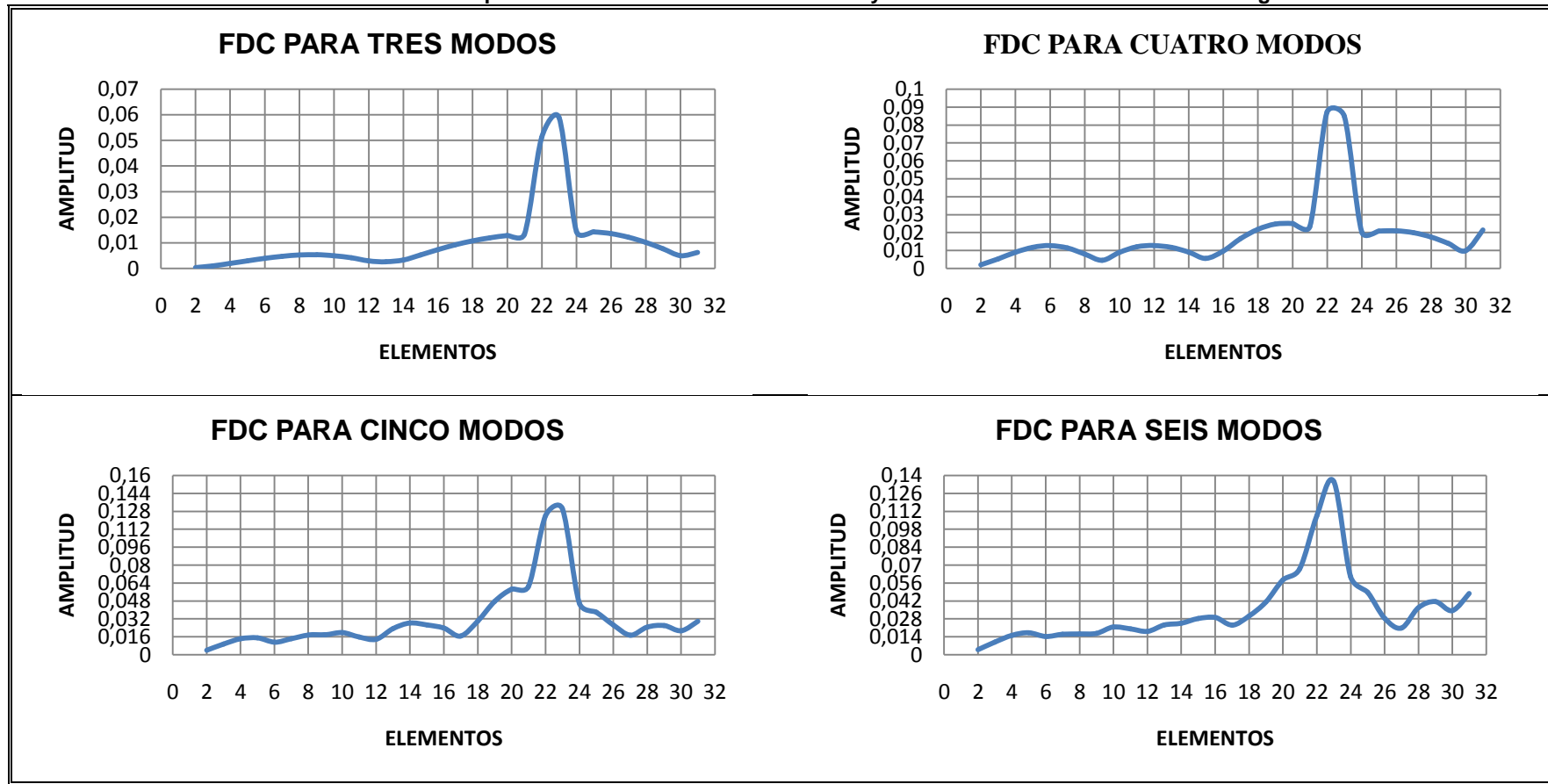


Tabla E.2. 8. Detección de daño para el elemento E22 afectado en 10% y E31 afectado en 5% del valor de su rigidez nominal



ANEXO F

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO, DISEÑADA PARA LA DETECCIÓN DE DEFORMACIONES GEOMÉTRICAS EN TUBERÍAS SIMULADAS A PARTIR DEL SE DE CBR

En primera instancia, la interfaz gráfica de usuario (GUI), cuenta con una ventana que permite efectuar la extracción de las señales de la librería de casos, de acuerdo con la ubicación “deseada” de los sensores, como se observa en la figura F.1. Así mismo, permite seleccionar el número de muestras de las señales almacenadas “2501” para efectos del procesamiento. Posteriormente, la información de a cada sensor seleccionado, es almacenada sistemáticamente en la carpeta B_CASOS_S, para su posterior uso.



Figura F. 1. Selección de sensores de interés

La segunda GUI, se diseñó con el fin de facilitar al usuario la selección de manera pseudo-aleatoria, los conjuntos de casos de entrenamiento y

evaluación del sistema experto, almacenando su distribución en dos listas. Adicionalmente, despliega la información correspondiente al número de casos de entrenamiento “críticos y no críticos” y de validación, como se observa en la figura F.2

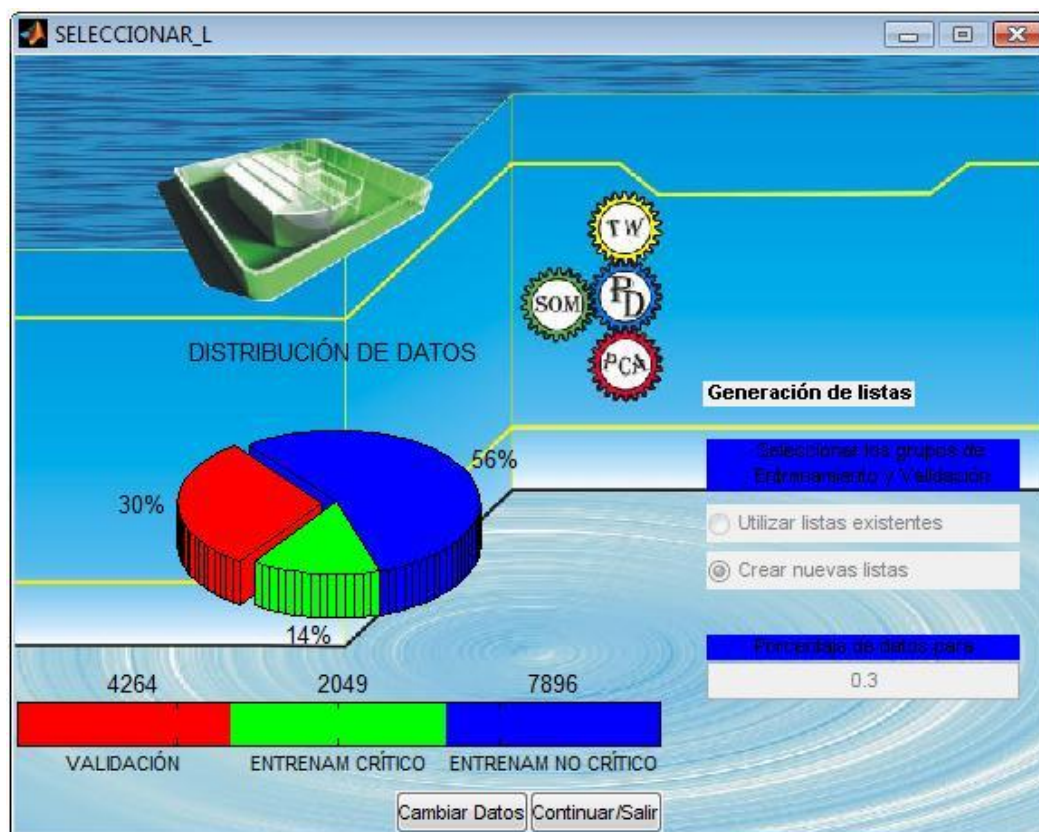


Figura F. 2. Selección de listas de entrenamiento y validación

Finalmente, la selección de los parámetros utilizados en la etapa de procesamiento de señales, es realizada a partir de la GUI de la figura F.3. Ésta, facilita la selección de subfamilias de wavelets, los descriptores a calcular de las señales y las herramientas matemáticas utilizadas en la etapa de procesamiento. Así mismo, almacena la información procesada, para su posterior uso en el sistema experto.

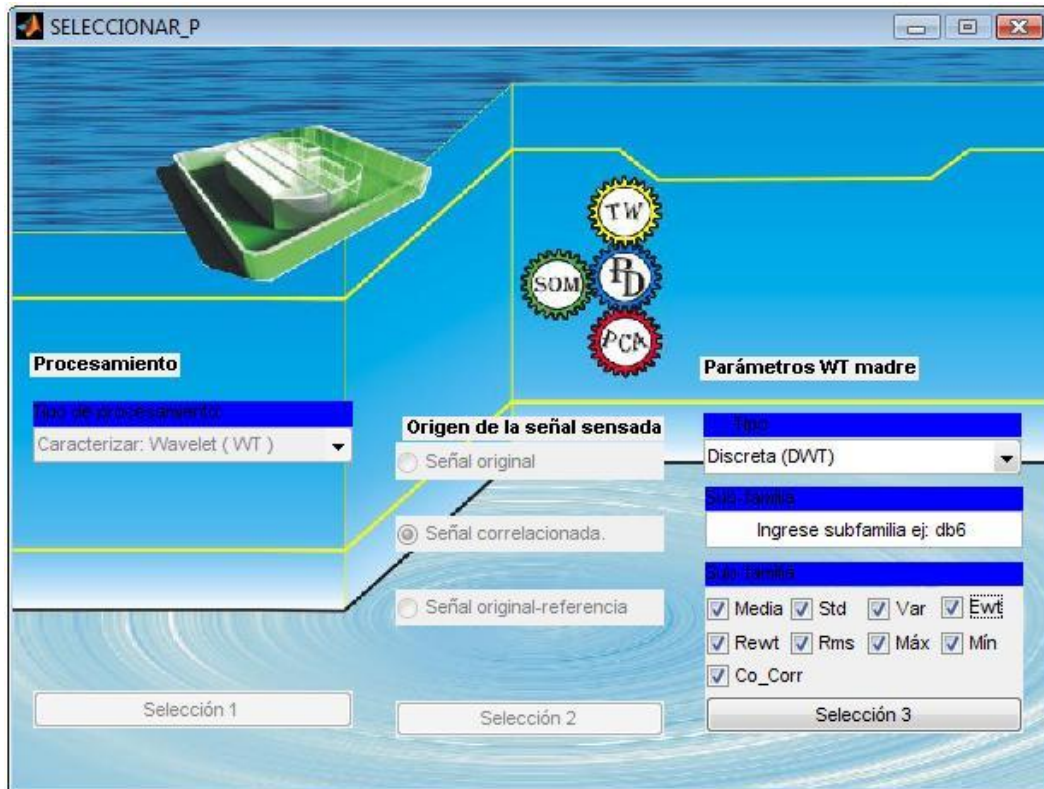


Figura F. 3. Selección de parámetros del procesamiento