

# Tabla de Contenido

<b>1. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.1.1. Desarrollo Histórico . . . . .	2
1.1.2. Monitoreo de Salud Estructural . . . . .	3
1.1.3. Axiomas de SHM . . . . .	5
1.2. Motivación . . . . .	6
1.3. Objetivo General . . . . .	7
1.4. Objetivos Específicos . . . . .	7
1.5. Hipótesis del Trabajo . . . . .	8
1.6. Organización y Alcances . . . . .	8
<b>2. IDENTIFICACION DE PROPIEDADES MODALES CON ESPACIO ESTADO</b>	<b>10</b>
2.1. Introducción . . . . .	10
2.2. Modelo Espacio Estado . . . . .	11
2.3. Eigenvalue Realization Algorithm - ERA . . . . .	15
2.4. Multivariable Output Error Space (MOESP) . . . . .	18
2.5. Modelo de Espacio Estado Estocástico . . . . .	21
2.5.1. Espacio Espacio Estocástico – Referencia Basada en Manejo de Covarianzas (SSI-COV) . . . . .	24
2.6. Fast Multi-Order (FMO) . . . . .	25
2.6.1. FMO Aplicado en ERA . . . . .	26
2.6.2. FMO Aplicado en MOESP . . . . .	27
2.6.3. FMO Aplicado en SSICOV . . . . .	28
2.7. Diagrama de Estabilización . . . . .	29
2.7.1. Criterio Fuerte de Selección . . . . .	30
2.7.2. División del Diagrama de Estabilización en Histograma . . . . .	30
2.7.3. Polos Estables en Frecuencia, Amortiguamiento y Criterio Modal de Certeza (MAC) . . . . .	31
2.7.4. Colinealidad de Fase Modal (MPC) . . . . .	32
2.7.5. Polos Estables y Valor Representativo . . . . .	33
2.7.6. Promedio Normalizado de la Densidad Espectral de Potencia (ANPSD) . . . . .	33
<b>3. IDENTIFICACIÓN DE DAÑO POR INTERPOLACIÓN LINEAL UTILIZANDO PRINCIPIO DE MÁXIMA ENTROPÍA</b>	<b>35</b>
3.1. Introducción . . . . .	35

3.1.1.	Detección y Localización de Daño Basado en Modelos . . . . .	35
3.1.2.	Enseñanza Supervisada . . . . .	37
3.1.3.	Vecinos Próximos . . . . .	38
3.1.4.	Interpolación Lineal . . . . .	39
3.2.	Aproximación Lineal con Máxima Entropía . . . . .	39
<b>4.</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE DAÑO CON INFORMACIÓN MUTUA, BASADO EN</b>	
	<b>IMÁGENES WAVELET</b>	<b>44</b>
4.1.	Introducción . . . . .	44
4.2.	Correspondencia de Imágenes . . . . .	45
4.3.	Transformadas Wavelet . . . . .	46
4.3.1.	Transformadas Wavelet Continua . . . . .	46
4.4.	Entropía, Entropía Relativa e Información e Información Mutua . . . . .	50
4.4.1.	Entropía . . . . .	50
4.4.2.	Entropía Conjunta y Entropía Condicional . . . . .	51
4.4.3.	Entropía Relativa . . . . .	52
4.4.4.	Información Mutua . . . . .	52
4.4.5.	Información Mutua Normalizada y Coeficiente de Correlación de Entropía . . . . .	53
4.5.	Redes Neuronales Artificiales . . . . .	54
4.5.1.	Funciones de Activación . . . . .	58
4.5.2.	Algoritmo de Levenberg-Marquardt . . . . .	59
4.5.3.	Problemas y Deficiencias de Implementación . . . . .	61
4.6.	SOM - Self Organization Map . . . . .	62
4.6.1.	Algoritmo SOM . . . . .	64
4.7.	Metodología de Detección de Daño . . . . .	65
<b>5.</b>	<b>APLICACIÓN EXPERIMENTAL EN LABORATORIO</b>	<b>67</b>
5.1.	Introducción . . . . .	67
5.2.	Descripción de la Estructura . . . . .	68
5.3.	Determinación Numérica de Parámetros Modales . . . . .	70
5.4.	Determinación Experimental de Propiedades Modales para la Estructura . . . . .	73
5.4.1.	Condición de Anomalía . . . . .	73
5.4.2.	Características de Ensayos Dinámicos . . . . .	74
5.4.3.	Instrumentación de la Estructura . . . . .	75
5.4.4.	Ensayos Experimentales . . . . .	77
5.5.	Aplicación de Daño Controlado en la Estructura y Determinación de Propiedades Modales . . . . .	88
5.6.	Identificación de Daño con Entropía Relativa . . . . .	97
5.6.1.	Construcción de la Base de Datos . . . . .	97
5.6.2.	Magnitud de Daño Asignado al Elemento . . . . .	99
5.6.3.	Análisis de Sensibilidad . . . . .	100
5.6.4.	Resultados Experimentales . . . . .	102
5.7.	Detección y Cuantificación de Daño con Información Mutua . . . . .	115
5.7.1.	Procesamiento de Imágenes con Transformadas Wavelet Continuas . . . . .	115
5.7.2.	Caracterización de Imágenes con Entropía e Información Mutua . . . . .	119
5.7.3.	Entrenamiento de la Red Neuronal SOM, para Detección de Daño . . . . .	131

5.7.4.	Entrenamiento de la Red Neuronal FeedFoward para Cuantificación de Daño	133
<b>6.</b>	<b>DETECCIÓN DE CAMBIO</b>	<b>139</b>
6.1.	Introducción . . . . .	139
6.2.	Test de Hipótesis . . . . .	139
6.2.1.	Nivel de Significancia . . . . .	140
6.2.2.	Tipos de Error y Potencia del Test . . . . .	140
6.2.3.	Teorema de Neyman Pearson . . . . .	142
6.2.4.	Test de Uno y Dos Lados . . . . .	142
6.2.5.	Detección de Cambio . . . . .	144
6.3.	Inferencia Bayesiana . . . . .	146
6.3.1.	Proceso Gaussiano de Generación de Datos . . . . .	147
6.4.	Evaluación de Normalidad . . . . .	148
6.4.1.	Histograma . . . . .	149
6.4.2.	Representación Q-Q . . . . .	151
6.4.3.	Test de Kolmogorov-Smirnov . . . . .	152
6.5.	Procedimiento del Algoritmo para Detección de Cambio . . . . .	153
6.6.	Aplicación . . . . .	154
6.6.1.	Señal Senosoidal . . . . .	154
6.6.2.	Mediciones en Torre Central FCFM . . . . .	158
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>174</b>
7.1.	Conclusiones y Recomendaciones . . . . .	174
7.2.	Limitaciones . . . . .	179
7.3.	Líneas Futuras de Investigación . . . . .	180
<b>A.</b>	<b>TERMINOLOGÍA</b>	<b>189</b>
A.1.	Estado y Señales . . . . .	189
A.2.	Funciones . . . . .	189
<b>B.</b>	<b>ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN CON FAST MULTI-ORDER</b>	<b>191</b>
B.1.	FMO para ERA . . . . .	191
B.1.1.	Desarrollo de Formulación . . . . .	191
B.1.2.	Algoritmo FMO-ERA . . . . .	192
B.2.	FMO para MOESP . . . . .	192
B.2.1.	Desarrollo de Formulación . . . . .	192
B.2.2.	Algoritmo FMO-MOESP . . . . .	193
B.3.	FMO para SSICOV . . . . .	194
B.3.1.	Desarrollo de Formulación . . . . .	194
B.3.2.	Algoritmo FMO-SSICOV . . . . .	195
<b>C.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN</b>	<b>196</b>
C.1.	Introducción . . . . .	196
C.1.1.	Descripción de la Estructura . . . . .	196
C.1.2.	Proceso de Identificación de Parámetros Modales . . . . .	200

<b>D. MODELO ANALÍTICO PARA DETECCIÓN DE DAÑO POR MÁXIMA ENTROPÍA</b>	<b>216</b>
D.1. Introducción . . . . .	216
D.1.1. Descripción de la Estructura . . . . .	217
D.1.2. Proceso de Identificación de Parámetros Modales . . . . .	218
D.2. Identificación de Daño . . . . .	222
<b>E. ENTRENAMIENTO REDES NEURONALES SOM</b>	<b>226</b>
E.1. Calibración de Datos con Redes Neuronales Auto-Organizadas . . . . .	226
E.1.1. Resultado de Entrenamiento Red 1 . . . . .	227
E.1.2. Resultado de Entrenamiento Red 2 . . . . .	227
E.1.3. Resultado de Entrenamiento Red 3 . . . . .	227
E.1.4. Resultado de Entrenamiento Red 4 . . . . .	228
E.1.5. Resultado de Entrenamiento Red 5 . . . . .	228
E.1.6. Resultado de Entrenamiento Red 6 . . . . .	229
E.1.7. Resultado de Entrenamiento Red 7 . . . . .	229
E.2. Análisis de sensibilidad 2 . . . . .	230
E.2.1. Resultado de Entrenamiento Red 2 . . . . .	230
<b>F. ENTRENAMIENTO REDES NEURONALES FEEDFORWARD</b>	<b>231</b>
F.1. Calibración de Datos con Redes Neuronales Levenberg-Marquardt . . . . .	231
F.2. Análisis de Sensibilidad 1 . . . . .	232
F.2.1. Resultado de Entrenamiento Red 1 . . . . .	232
F.2.2. Resultado de Entrenamiento Red 2 . . . . .	233
F.2.3. Resultado de Entrenamiento Red 3 . . . . .	233
F.2.4. Resultado de Entrenamiento Red 4 . . . . .	234
F.2.5. Resultado de Entrenamiento Red 5 . . . . .	234
F.2.6. Resultado de Entrenamiento Red 6 . . . . .	235
F.2.7. Resultado de Entrenamiento Red 7 . . . . .	235
F.3. Análisis de Sensibilidad 2 . . . . .	236
F.3.1. Resultado de Entrenamiento Red 2 . . . . .	236
F.4. Análisis de Sensibilidad 3 . . . . .	237
F.4.1. Resultado de Entrenamiento Red 2 . . . . .	237
F.5. Cantidad de Datos para Entrenamiento . . . . .	237
F.5.1. Variación Porcentual 1 . . . . .	238
F.5.2. Variación Porcentual 2 . . . . .	238
<b>G. Análisis ROC</b>	<b>239</b>
G.1. Introducción . . . . .	239
G.2. Clasificador de rendimiento . . . . .	239
G.3. Curvas en espacio ROC . . . . .	241
G.4. Área bajo la curva ROC (AUC) . . . . .	241
G.5. Curva ROC aplicados a detección de cambio en Torre Central FCFM . . . . .	241