

JESÚS DANIEL VILLALBA MORALES

Detección de Daño en Estructuras a través de Inteligencia Computacional y Análisis Dinámico

Tesis presentada al Departamento de
Ingeniería de Estructuras de la EESC-USP
como parte de los requisitos necesarios
para la obtención del título de Doctor en
Ingeniería Civil –

Área de concentración: Estructuras.

Asesor: Prof. Dr. José Elias Laier.

Programa de Posgrado en Estructuras

VERSIÓN CORREGIDA

La versión original está disponible en el
programa

São Carlos, 2012.

La traductora oficial – Luz Adriana Sánchez Segura – certifica por medio de su
firma y sello que esta es una traducción fiel del documento original.

23 de marzo de 2026

Luz Adriana Sánchez Segura
LUZ ADRIANA SÁNCHEZ SEGURA
Traductora e intérprete oficial
Português-Espanhol-Português
Licencia N° 467 – 2016
Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN

VILLALBA MORALES, J. D. (2012). **Detección de Daño en Estructuras a través de Inteligencia Computacional y Análisis Dinámico**. Tesis (Doctorado) - Escuela de Ingeniería de São Carlos, Universidad de São Paulo, São Carlos.

En esta tesis doctoral se estudian formas de resolver el problema de la detección de daño en estructuras a partir de la aplicación de técnicas de inteligencia computacional y de la respuesta dinámica de la estructura. Se consideran dos opciones para la formulación del problema. Primero, se establece un problema de optimización a partir de la minimización de la diferencia entre los parámetros dinámicos experimentales de la estructura en la condición con daño y los calculados utilizando un modelo de elementos finitos que representa tal condición. Se emplean diferentes técnicas metaheurísticas (algoritmos genéticos, *particle swarm optimization*, evolución diferencial), algunas en versiones con adaptación de parámetros. También se estudia, la formulación del problema de optimización como uno con múltiples objetivos. Se propone una nueva forma de evaluar el desempeño de una metodología de detección de daño, basada en su capacidad para obtener un nivel determinado de exactitud en el cálculo de la extensión del daño y en la presencia de falso-negativos y falso-positivos en los resultados. Segundo, se aplican redes neurales para determinar el mapeo entre los parámetros dinámicos experimentales de la condición actual de la estructura y la extensión o posición del daño en ella. Estructuras del tipo viga y cercha fueron sometidas a diferentes escenarios de daño con la intención de determinar el desempeño de las metodologías propuestas. Los resultados muestran la capacidad de las técnicas de inteligencia computacional para la detección de escenarios de daño con unos pocos elementos damnificados; no obstante, no es posible garantizar que las metodologías serán exitosas en el 100% de los casos. Se recomienda la utilización de técnicas de búsqueda local para mejorar la solución encontrada por los algoritmos globales. Finalmente, se observó que se requiere la determinación de la cantidad mínima de información a ser utilizada, una función objetivo adecuada y una alta calidad en las mediciones para garantizar una detección de daño confiable.

Palabras clave: detección de daño, inteligencia computacional, parámetros dinámicos.

SUMARIO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	7
1.3 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	8
2. INTELIGENCIA COMPUTACIONAL.....	11
2.1 INTRODUCCIÓN.....	11
2.2 REDES NEURALES ARTIFICIALES.....	12
2.3 METAHEURÍSTICAS BASADAS EN POBLACIONES.....	15
2.4 APLICACIÓN DE INTELIGENCIA COMPUTACIONAL EN INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS.....	24
3. REVISIÓN DE METODOLOGÍAS DE DETECCIÓN DE DAÑO.....	29
3.1 INTRODUCCIÓN.....	29
3.2 TÓPICOS EN DETECCIÓN DE DAÑO UTILIZANDO LA RESPUESTA DINÁMICA DE LA ESTRUCTURA.....	30
3.3 METODOLOGÍAS DE DETECCIÓN DE DAÑO QUE UTILIZAN INTELIGENCIA COMPUTACIONAL.....	36
3.4 METODOLOGÍAS DE DETECCIÓN DE DAÑO QUE HACEN REDUCCIÓN DEL ESPACIO DEL PROBLEMA.....	39
3.5 METODOLOGÍAS DE DETECCIÓN DE DAÑO BASADAS EN CAMBIOS EN LA MATRIZ DE FLEXIBILIDAD MODAL.....	41
3.6 METODOLOGÍAS DE DETECCIÓN DE DAÑO BASADAS EN DIFERENTES TIPOS DE RESPUESTA ESTRUCTURAL.....	43
3.7 DISCUSIÓN.....	45
4. EJEMPLO I: ESQUEMA DE EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE DETECCIÓN DE DAÑO.....	47
4.1 INTRODUCCIÓN.....	47
4.2 METODOLOGÍA DE DETECCIÓN DE DAÑO BASADO EN HEURÍSTICAS.....	48
4.3 CARACTERÍSTICAS DEL ALGORITMO GENÉTICO DE CÓDIGO REAL.....	51
4.4 NUEVO SISTEMA DE EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE METODOLOGÍAS DE DETECCIÓN DE DAÑO DE NIVEL III.....	54
4.5 ESTRUCTURA ANALIZADA.....	56
4.6 RESULTADOS.....	57
4.7 DISCUSIÓN.....	62

La traductora oficial – Luz Adriana Sánchez Segura – certifica por medio de su
firma y sello que esta es una traducción fiel del documento original.

23 de marzo de 2026

Luz Adriana Sánchez Segura
LUZ ADRIANA SÁNCHEZ SEGURA
Traductora e intérprete oficial
Portugués-Español-Portugués
Licencia N° 467 – 2016
Universidad Nacional de Colombia

5	EJEMPLO II: PARTICLE SWARM OPTIMIZATION.....	65
5.1	INTRODUCCIÓN.....	65
5.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y DE LA ESTRUCTURA ANALIZADA.....	66
5.3	CARACTERÍSTICAS DEL PSO UTILIZADO.....	68
5.4	FUNCIÓN OBJETIVO.....	70
5.5	DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD IDEAL DE MEDICIONES.....	70
5.6	VERIFICACIÓN DE LA CANTIDAD IDEAL ESCOGIDA.....	74
5.7	INFLUENCIA DEL NÚMERO DE MODOS UTILIZADOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL DAÑO.....	76
5.8	DISCUSIÓN.....	78
6	EJEMPLO III: ALGORITMO DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL.....	81
6.1	INTRODUCCIÓN.....	81
6.2	ESTRUCTURA ANALIZADA Y ESCENARIOS DE DAÑO.....	82
6.3	MODIFICACIONES DEA.....	83
6.4	FUNCIONES OBJETIVOS.....	84
6.5	RESULTADOS.....	86
6.6	DISCUSIÓN.....	90
7	EJEMPLO IV: ALGORITMO GENÉTICO MULTICROMOSÓMICO	93
7.1	INTRODUCCIÓN.....	93
7.2	ESTRUCTURA ANALIZADA Y ESCENARIOS DE DAÑO.....	94
7.3	GA MULTICROMOSÓMICO.....	96
7.4	RESULTADOS.....	99
7.5	DISCUSIÓN.....	105
8	EJEMPLO V: REDES NEURALES ARTIFICIALES-CUANTIFICACIÓN.....	107
8.1	INTRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA ANALIZADA.....	107
8.2	ARQUITECTURA DE LA RED.....	108
8.3	DEFINICIÓN DE ETAPAS ANTERIORES AL ENTRENAMIENTO DE LA RED.....	110
8.4	APLICACIÓN DE LA RED Y REFINAMIENTO DE LOS RESULTADOS.....	112
8.5	RESULTADOS PARA ERROR TIPO A.....	113
8.6	RESULTADOS PARA ERROR TIPO B Y C.....	116
8.7	RESULTADOS PARA ESCENARIOS DE DAÑO INDIVIDUALES	117
8.8	RELACIÓN ENTRE LA CANTIDAD DE MODOS MEDIDOS Y EL DESEMPEÑO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	118

8.9	DISCUSIÓN.....	119
9.	EJEMPLO VI: REDES NEURALES ARTIFICIALES - LOCALIZACIÓN.....	121
9.1	COMO UTILIZAR REDES NEURALES EN LOCALIZACIÓN DE DAÑO.....	121
9.2	EJEMPLOS DE DEFINICIONES DE ZONAS.....	123
9.3	CARACTERÍSTICAS DE LA RED NEURAL UTILIZADA.....	125
9.4	ESQUEMA DE POSPROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS....	126
9.5	INFLUENCIA DEL TIPO DE ALGORITMO DE ENTRENAMIENTO ESCOGIDO EN EL DESEMPEÑO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA...	129
9.6	INFLUENCIA DEL RUIDO EN EL DESEMPEÑO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	131
9.7	INFLUENCIA DE LA EXTENSIÓN DEL DAÑO EN EL DESEMPEÑO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	131
9.8	DISCUSIÓN.....	132
10.	EJEMPLO VII: FORMULACIÓN MULTIOBJETIVO.....	135
10.1	INTRODUCCIÓN.....	135
10.2	"NON-DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM II (NSGA-II)"	137
10.3	"STRENGTH PARETO EVOLUTIONARY ALGORITHM II (SPEA-II)".....	138
10.4	ESTRUCTURA ANALIZADA Y DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL NSGA-II Y EL SPEA-II.....	139
10.5	DETERMINACION DE LA VIABILIDAD DE LA FORMULACIÓN MULTIOBJETIVO.....	140
10.6	CARACTERÍSTICAS DEL CONJUNTO DE PARETO OBTENIDO.....	142
10.7	PÉRDIDA DE DIVERSIDAD EN LA POBLACIÓN.....	145
10.8	DISCUSIÓN.....	146
11.	CONCLUSIONES.....	149
	REFERENCIAS.....	155

La traductora oficial – Luz Adriana Sánchez Segura – certifica por medio de su firma y sello que esta es una traducción fiel del documento original.

23 de marzo de 2026

Luz Adriana Sánchez Segura

LUZ ADRIANA SANCHEZ SEGURA
Traductora e intérprete oficial
Português-Español-Português
Licencia N° 467 – 2016
Universidad Nacional de Colombia