Detección de daños en estructuras: estudio comparativo entre los algoritmos de optimización AGs y PSO

Structural damage detection: comparison between GA and PSO techniques

Robinson Barrera*, Iván Gómez *, Jabid Quiroga¹*

* Universidad Industrial de Santander, Santander. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 01/06/2013

Fecha de Aceptación: 20/11/2013

PAG 61-70

Resumen

En este artículo se comparan las técnicas de optimización de enjambre de partículas, PSO (de sus siglas en inglés, Particle Swarm Optimization) y Algoritmos Genéticos (AG), ambas usadas en la implementación de un sistema para detectar y diagnosticar fallas en una estructura usando la respuesta modal. Diferentes episodios de daños (daño simple y daño múltiple) con y sin ruido, permiten simular las condiciones reales en una estructura tipo viga y armadura para determinar el desempeño en la detección y diagnóstico de los sistemas propuestos. Adicionalmente, ambos sistemas propuestos se evalúan variando los volúmenes de información, es decir, el número de modos de vibración. La respuesta dinámica de la estructura en condición normal o de falla se obtiene usando la herramienta de uso libre OPENSEES® y los algoritmos de optimización PSO y AGs se implementan en ambiente Matlab®. La comparación de desempeño de las dos técnicas en cuanto a sus capacidades de detección y diagnóstico se realizan en una viga segmentada en 10 partes y simplemente apoyada y una armadura de 13 elementos. Resultados experimentales mostraron la eficacia y robustez de los sistemas propuestos en la determinación del estado del sistema en diversos ambientes de ruido y con diferentes volúmenes de información. Sin embargo su desempeño varía según el sistema monitoreado y la función objetivo utilizada

Palabras claves: Algoritmos genéticos, optimización de enjambre de partículas, detección de daños, monitoreo estructural, respuesta dinámica de estructuras

Abstract

This study compares optimization techniques of Particle Swarm Optimization (PSO) with Genetic Algorithms (GA), both techniques employed for the implementation of a system intended to detect and diagnose structures failures by using a modal response. Different noisy and noiseless damage events (simple and multiple damages) enable the simulation of actual conditions of a beam structure and a framework structure, which are used to determine detection and diagnosis behaviors of proposed systems. Additionally, both proposed systems are evaluated by modifying the input amount, that is to say, the number of vibration modes. The structure dynamic response, under normal or failure condition, is obtained by using the OPENSEES® free-download tool, as well as the optimization algorithms PSO and GA, both implemented under Matlab® environment. Behavior comparison between the two techniques, as far as detection and diagnosis abilities are concerned, are carried out for a supported beam segmented in ten sections and a framework structure with 13 elements. Experimental results showed the effectiveness and robustness of proposed systems for the determination of system conditions, at different noise environmental levels and with different amount of inputs. However, the performance varies in accordance with the controlled system and the objective function, which are employed.

Keywords: Genetic algorithms, particle swarm optimization, damage detection, structural control, structural dynamic response

1. Introducción

Las estructuras civiles son sistemas susceptibles al deterioro por uso, envejecimiento, sobrecargas, fatiga o el acontecimiento de un evento sísmico o explosivo. Por lo tanto, la evaluación continua de su estado a través de un sistema de detección de fallas es una tarea imprescindible. Los sistemas de detección de fallas permiten tomar decisiones sobre la necesidad de reforzar o reparar las estructuras reduciendo al mínimo la posibilidad de daños mayores y protegiendo la integridad de las mismas y de sus posibles usuarios.

Actualmente, el desarrollo de técnicas de monitoreo se ha orientado hacia la formulación de procedimientos analíticos de mayor confiabilidad y versatilidad. Entre los procedimientos analíticos implementados sobresalen aquellos basados en la respuesta dinámica de la estructura (Doebbling et al., 1998), (Ren y Roeck, 2002), (Farevelli y Casciati, 2004), (Rahai et al., 2006) y (Humar et al., 2006). En este trabajo se implementa un sistema de detección de fallas en dos estructuras civiles a través del análisis de las características de la respuesta dinámica de estas. En esta propuesta se utiliza como indicador de falla la disminución del módulo de elasticidad en uno o varios elementos de la estructura.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:

Facultad de Ingeniería Mecánica, Ciudad Universitaria. Cra 27 calle 9.
Bucamaranga, Santander.

E-mail: jabib@uis.edu.co

El cambio del módulo de elasticidad se predice a través del planteamiento de un problema inverso utilizando la respuesta dinámica para reconstruir los módulos de elasticidad en cada componente del sistema usando AG y PSO.

2. Marco teórico

El monitoreo de estructuras basado en las características dinámicas utiliza variables como la energía de deformación modal, variaciones de formas modales y/o frecuencias naturales, vectores de fuerza residual y variaciones en la matriz de flexibilidad de la estructura Villalba (2009). Los sistemas de detección de fallas basados en modelos comparan algunas de las anteriores variables dinámicas con un valor de referencia que corresponde al valor de la variable en condición normal, y a partir de esta diferencia se produce un residuo o indicador de falla con el cual se realiza el diagnóstico. En este trabajo en particular, se utilizan como variables de entrada al sistema la matriz de formas modales y el vector de frecuencias naturales

Respuesta dinámica de estructuras

La respuesta dinámica de una estructura con múltiples grados de libertad puede determinarse usando una aproximación modal, en la que se asume al sistema como no amortiguado usando la Fórmula 1.

$$M\ddot{q}(t) + Kq(t) = 0 \quad (1)$$

donde M , y K son las matrices de masa y rigidez de orden $n \times n$, respectivamente, con componentes m_{ik} y k_{ik} que representan las fuerzas generalizadas para cada coordenada i , cuando la aceleración es aplicada en una coordenada k y $q(t)$ es el vector de desplazamiento del sistema. La i -ésima solución para la Fórmula 1 está dada por la Fórmula 2.

$$q(t) = \Phi_i \sin(\omega_i t - \alpha_i) \quad (2)$$

Donde Φ_i es la i -forma del modo (vector propio) con una correspondiente frecuencia natural circular ω_i (valor propio) y ángulo de fase α_i . Substituyendo la Fórmula 2 en la Fórmula 1, y eliminando $\sin(\omega_i t - \alpha_i)$ se obtiene la Fórmula 3.

$$[K - \omega_i^2 M] \Phi_i = 0 \quad (3)$$

La solución de la Fórmula 3 corresponde a la determinación de los valores y vectores propios del sistema, los cuales se normalizan a través de la matriz de masa, ver Fórmula 4, donde Φ_{ni} es la forma modal normalizada.

$$\Phi_n^T M \Phi_n = I \rightarrow \Phi_{ni} = \Phi_i / \sqrt{\Phi_i^T M \Phi_i} \quad (4)$$

Función objetivo del problema propuesto

El problema propuesto en este trabajo es el de determinar los valores de los módulos de elasticidad de una estructura que emulen la respuesta dinámica obtenida de la misma estructura monitoreada. Esta emulación se obtiene a través de la minimización del error entre los valores supuestos y los valores que corresponden a la estructura. Los anteriores errores se evalúan usando las funciones objetivo Fórmula 5 (Friswell et al., 1998) y Fórmula 6 (Moslem y Nafaspour, 2002), las cuales se optimizan usando PSO y AGs. Este proceso de optimización busca minimizar la diferencia entre el comportamiento experimental en los modos de vibración y las frecuencias naturales y los de referencia, variando el módulo de elasticidad. El proceso de optimización permite determinar los módulos de elasticidad para cada elemento de la estructura y su comparación con los valores iniciales permiten la determinación de la condición normal o de falla en la estructura (Villalba y Laier, 2010).

$$Min f = \sum_{j=1}^r W_{wj} \left(\frac{\delta w_{mj} - \delta w_{aj}}{w_{mj}} \right)^2 + \sum_{j=1}^r W_{\phi j} [1 - MAC(\phi_{mj}, \phi_{aj})] + W_{ns} \delta_{ns} \quad (5)$$

$$Min f = \sum_{j=1}^r W_{wj} \left[1 - \left(\frac{w_{mj}}{w_{aj}} \right) \right]^2 + \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^s W_{\phi ji} (\phi_{mji} - \phi_{aij}) \quad (6)$$

En las Fórmulas 5 y 6 el subíndice m corresponde a los datos que fueron medidos o simulados y el subíndice a corresponde a los obtenidos a partir del modelo analítico, δw son las variaciones en las frecuencias naturales, w_j y ϕ_j corresponden a la j -ésima frecuencia natural y forma modal, respectivamente. Los términos W son factores de peso para cada una de las características dinámicas, δ_{ns} asume un valor de cero si tiene un lugar damnificado y un valor de uno si tiene más que un lugar damnificado, r es el número de formas modales utilizadas para la comparación y s es el número de componentes del vector de la j -ésima forma modal (número de grados de libertad). El término MAC es el Criterio de Confianza Modal de sus siglas en inglés Modal Assurance Criterion, y permite estimar el grado de correlación entre los modos de vibración, Fórmula 7.

$$MAC_{ij} = \frac{(\phi_i^T \phi_j)}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)} \quad (7)$$

Donde ϕ_i es el vector propio del modo i que contiene solo los grados de libertad medidos y ϕ_j es el correspondiente al valor experimental del vector propio del modo j . Finalmente, como se puede observar las funciones objetivo utilizadas en esta investigación utilizan como parámetros de indicación del daño la frecuencia natural y los modos de vibración, de manera simultánea.

3. PSO y algoritmos genéticos

PSO y AGs son técnicas metaheurísticas apropiadas para resolver problemas de optimización con espacios de búsqueda altamente complejos, no lineales y con múltiples óptimos locales, Villalba (2009), como el caso de estudio.

Ambos algoritmos se clasifican como algoritmos estocásticos de optimización basados en población e inspirado en el comportamiento social de algunos animales en el caso de PSO y en el mecanismo de selección natural en el caso de los AG. Los algoritmos de PSO y AGs permiten explorar el espacio de la solución en múltiples direcciones simultáneamente evitando los mínimos locales.

En ejecución, PSO al igual que el comportamiento de los enjambres en la naturaleza, priorizan los buenos resultados, que en términos de optimización equivale a que si una solución aleatoria es clasificada como una buena solución, las otras posibles soluciones redireccionan la búsqueda a través de una ponderación entre la dirección indicada por el miembro y lo indicado por la colonia. En PSO, este comportamiento es imitado por partículas con ciertas posiciones y velocidades en un espacio de búsqueda. La población inicial se determina aleatoriamente, cada partícula se desplaza a través de dicho espacio de búsqueda y recuerda la mejor posición que ha encontrado. Cada partícula comunica las buenas posiciones a las demás y dinámicamente ajustan su propia posición y su velocidad con base en las buenas posiciones. La velocidad se ajusta con el comportamiento histórico de las partículas. Este procedimiento de búsqueda se describe en las Fórmulas 8 y 9.

$$v_i^{k+1} = w.v_i^k + c_1.rand_1.(pbest_i - x_i^k) + c_2.rand_2.(gbest - x_i^k) \quad (8)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (9)$$

En la Fórmula 8, c_1 y c_2 son constantes positivas definidas como coeficientes de aceleración, w es el factor inercial, $rand_1$ y $rand_2$ son dos números aleatorios (con distribución de probabilidad uniforme) en el rango $[0,1]$, x_i representa la *iésima* partícula y $pbest_i$ la mejor posición previa de x_i , $gbest$ es la posición de la mejor partícula de toda la población y v_i es la razón de cambio de la posición (velocidad) de la partícula x_i . Los cambios de velocidad en la Fórmula 8 se componen de tres partes: *momentum*, *cognitiva* y *social*. De esta forma se obtiene una velocidad que tiende a acercar la partícula a $pbest$ y $gbest$.

En el caso de los AGs, estos combinan la idea de supervivencia de las mejores soluciones con un intercambio estructurado de información aleatoria configurando un algoritmo de búsqueda con inferencia humana. Los AG usan eficientemente información histórica para especular nuevas y mejores soluciones. El proceso de búsqueda de la mejor solución se inicia con un conjunto aleatorio de posibles soluciones, *población*. Luego, la adaptación al ambiente de los individuos de la presente generación se evalúa a partir de la función objetivo definida para el problema. Dicha adaptación determina la probabilidad de un determinado individuo de continuar y de reproducirse con otro individuo.

La etapa de reproducción producirá nuevos individuos, los cuales tienen altas posibilidades de tener características mejores que las que tenían los individuos de la generación anterior. Además, estos individuos nuevos pueden ser sometidos a un proceso de mutación que cambia levemente las características del mismo. El procedimiento anterior es realizado de forma iterativa hasta encontrar el mejor valor en la función objetivo o hasta alcanzar un número predeterminado de generaciones. Adicionalmente, en la implementación de este esquema de optimización se utiliza el operador de elitismo el cual permite preservar la convergencia del método. En resumen, cada generación de individuos requiere de tres operaciones: selección, cruzamiento y mutación. Para una mejor comprensión de cada uno de estos procesos se recomienda que el lector se dirija a textos clásicos como Goldberg (1989) y Michalewicz (1994).

4. Implementación de la metodología

La respuesta dinámica de la estructura, frecuencias y formas modales, en condición normal o en los distintos escenarios de daño, se determina usando el software de uso libre OPENSEES®. El problema de la detección de fallas propuesto en este estudio usando ambos esquemas de optimización se implementa considerando variaciones entre 0-40% del módulo de elasticidad, la respuesta de la estructura se encuentra en un régimen lineal sin amortiguamiento.

Para el estudio de la condición en falla, el daño a la estructura es emulado disminuyendo el valor del módulo de elasticidad a uno o varios elementos de la estructura a través de un algoritmo de MATLAB®. Esta nueva versión de la estructura se introduce a OPENSEES, el cual determina las características dinámicas, frecuencias naturales y sus respectivos modos de vibración. Estas características serán utilizadas para realizar el procedimiento inverso, es decir, a partir de ellas se determinan los módulos de elasticidad de cada elemento usando el AG y PSO. Una vez que se optimiza la función de costo, la estructura emulada es comparada con la original y a partir de esta comparación se establece la diferencia en cada elemento, residuo, con lo cual se diagnostica la estructura.

La metodología consiste en: 1) Crear los distintos escenarios de daños a las estructuras a partir de la reducción de los módulos de la elasticidad de los elementos usando MATLAB, y determinar las frecuencias y formas modales de la estructura damnificada $[\omega_m, \Phi_m]$ usando OPENSEES. 2) A partir de los algoritmos de optimización establecer los módulos de elasticidad de los elementos y determinar las características dinámicas para las diferentes soluciones de módulos de elasticidad usando OPENSEES $[\omega_a, \Phi_a]$. Estas características dinámicas son comparadas con las características dinámicas de la estructura damnificada por medio de la función objetivo. Luego, los valores de la función objetivo son retornados a los esquemas basados en AG y PSO para que produzca nuevas soluciones. 3) El paso 2 se repite iterativamente hasta que se cumpla un error mínimo considerado en la función objetivo o se alcance un máximo número de iteraciones. El esquema de detección de fallas implementado se aplica a dos tipos de sistemas estructurales planos: una viga y una armadura, ver Figuras 1a) y 1b). La viga simplemente apoyada es discretizada en 10 elementos,

cada uno de los cuales es considerado uniforme y con un módulo de elasticidad inicial e igual al valor asumido como condición normal. Los demás parámetros como área, momento de inercia, y densidad se consideran sin cambio. Para el análisis de daño en la viga sólo se consideraron los grados de libertad verticales en los modos de vibración. En cuanto a la armadura, ésta se compone de 13 elementos, es simplemente apoyada y los elementos horizontales están uniformemente espaciados.

Figure 1. (a) Supported beam and (b) 13-elements supported framework structure
Figura 1. (a) Viga simplemente apoyada y (b) Armadura de 13 elementos simplemente apoyada

La presencia de ruido en las mediciones se considera mediante la introducción de pequeñas perturbaciones en las frecuencias naturales y las formas modales usando las Fórmulas 10 y 11.

$$f_{nr} = f_n(1 + \text{Rand}(-1,1) * \text{Ruido}_f) \quad (10)$$

$$\Phi_{nr} = \Phi_n(1 + \text{Rand}(-1,1) * \text{Ruido}_f) \quad (11)$$

Donde f_n y Φ_n corresponden a las frecuencias naturales y formas modales sin presencia de ruido respectivamente, f_{nr} y Φ_{nr} son los valores de los mismos parámetros con ruido. Ruido_f y Ruido_ϕ son los porcentajes de ruido introducidos. Las frecuencias naturales y formas modales son contaminadas por ruido con un error promedio de $\pm 0.15\%$ y $\pm 3\%$ respectivamente (Chen y Nagarajaiah, 2007).

La selección de los parámetros asociados a los algoritmos de PSO y genéticos tiene un impacto significativo en el desempeño de estos. En este caso específico, los parámetros relevantes utilizados en la implementación del algoritmo PSO que se obtuvieron después de un proceso exhaustivo de experimentación tanto para la viga como para la armadura, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros escogidos para las estructuras en el PSO
Table 1. Chosen PSO parameters for structures

PARÁMETROS DEL PSO/ PSO PARAMETERS	PARÁMETRO SELECCIONADO (Viga/Armadura)/ CHOSEN PARAMETER (Beam/Framework structure)
Máxima velocidad de las partículas/ <i>Particles maximum speed</i>	0.4
Máximo número de épocas del ciclo/ <i>Maximum number of cycle stages</i>	1500
Tamaño de la población/ <i>Population size</i>	60
Influencia del mejor valor <i>pbes</i> / <i>Influence from the best position value pbest t</i>	10
Influencia del mejor valor <i>Gbest</i> / <i>Influence from the best value Gbest</i>	10
Peso inicial de inercia/ <i>Initial inertial weight</i>	0.9
Peso final de inercia/ <i>Final inertial weight</i>	0.4
Mínimo gradiente de error global/ <i>Global error minimum gradient</i>	1.0E-05
Máximas épocas con igual error/ <i>Maximum stages with equal error</i>	50

En el caso de los algoritmos genéticos los valores en los parámetros variaron de acuerdo a si el sistema correspondía a la viga o la estructura. Dentro de los parámetros el *cruzamiento* fue crucial para la obtención de buenos resultados. Los valores utilizados en cada caso se listan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros escogidos para las estructuras en el AG
Table 2. AG parameters chosen for structures

PARÁMETROS DEL AG/ GA PARAMETERS	PARÁMETRO SELECCIONADO (Viga/Armadura)/ CHOSEN PARAMETER (Beam/Framework structure)
Generaciones/ <i>Generations</i>	500/300
Población inicial/ <i>Initial population</i>	50/150
Selección/ <i>Selection</i>	Ruleta/ <i>Roulette</i>
Cruzamiento/ <i>Crossover</i>	Heurístico/ <i>Heuristic</i>
Taza de cruce/ <i>Crossover rate</i>	0.9
Elitismo/ <i>Elitism</i>	1
Mutación/ <i>Mutation</i>	Uniforme/ <i>Uniform</i>
Rata de mutación/ <i>Mutation rat</i>	0.08/0.15
Criterio de parada/ <i>Stop criterion</i>	1.0E-05

En cuanto a las funciones objetivo se encontró que la función objetivo Fórmula 6 mostró mejores resultados que la Fórmula 5 en la viga para ambos enfoques y en la armadura cuando se usó PSO. Por otro lado, en el caso de la armadura con el enfoque de AGs la función objetivo, Fórmula 5, presentó mejores resultados detectando y diagnosticando que la Fórmula 6.

La evaluación del desempeño de los dos esquemas se realiza atendiendo a los siguientes criterios: *detección del daño* (identifica él o los elementos dañados), *diagnóstico del daño* (detecta él o los elementos dañados con una posible incertidumbre del 5 % del daño real), *falsos positivos* (son el o los elementos que sin estar afectados aparecen como si lo estuvieran con un margen superior al 10 % de cambio en el modulo de elasticidad). Adicionalmente, los resultados presentados corresponden a los mejores entre varias corridas de cada algoritmo en cada escenario de falla en particular.

A continuación se muestra en la Tabla 3 los mejores resultados para la viga usando ambos esquemas, algoritmos genéticos y PSO.

Tabla 3. Resultados en detección, diagnóstico y falsos positivos para algoritmo genético y PSO en la viga
Table 3. Detection, diagnosis and false-positives results for genetic algorithm and PSO, in the beam structure

Tipo de daño/ Type of damage	Modos/ Modes	Sin Ruido/ Noiseless			Ruido <1%/ Noise <1 %			Ruido <3%/ Noise <3 %			Ruido <5%/ Noise <5 %		
		Det	Diag	F.P	Det	Diag	F.P	Det	Diag	F.P	Det	Diag	F.P
Simple/ Simple	4	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	0/1	0
	6	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0
	8	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0
2 Elementos/ Elements	4	2/2	2/2	0	2/2	2/2	0	2/2	2/2	3	2/2	1/2	1
	6	2/2	2/2	0	2/2	2/2	0	2/2	2/2	0	2/2	1/2	1
	8	2/2	2/2	0	2/2	2/2	0	2/2	2/2	0	2/2	2/2	2
3 Elementos/ Elements	4	4/4	4/4	0	4/4	4/4	0	4/4	1/4	2	4/4	3/4	2
	6	4/4	4/4	0	4/4	4/4	0	4/4	3/4	1	4/4	1/4	1
	8	4/4	4/4	0	4/4	4/4	0	4/4	1/4	2	4/4	3/4	4

Verde: Mejor comportamiento AG

Green: Best AG behavior

Det: Detecta

Det: detects

Diag: Diagnostica

Diag: Diagnoses

Amarillo: Mejor comportamiento PSO.

Yellow: Best PSO behavior

F.P: Falso Positivo

F.P: False-positive

Según se observa en la Tabla 3, los resultados obtenidos con el uso de los AGs en cuanto a la detección, diagnóstico y falsos positivos superan los obtenidos usando PSO con un total de 11 episodios con mejor comportamiento que PSO que mostró 6 episodios con mejor comportamiento. En cuanto al tiempo computacional, algoritmos genéticos presentó un menor tiempo de cálculo en todos los casos estudiados en una relación de 1 a 2 aproximadamente.

Adicionalmente, se puede observar que cuando se presenta daño simple, los dos enfoques detectan y diagnostican la totalidad de los casos sin la presencia de falsos positivos. El incremento en el porcentaje de ruido produce un detrimento en ambos esquemas en sus capacidades de diagnóstico y en la presencia de falsos positivos. En cuanto a los modos de vibración resulta difícil de concluir algún comportamiento debido a que al aumentar el número de modos de vibración en algunos casos mejoró y otros decayó el diagnóstico y los falsos positivos.

En cuanto a la armadura, los resultados se muestran en la Tabla 4. En este caso en particular las funciones objetivo son distintas para PSO y AG. A diferencia del caso anterior, PSO mostró un mejor desempeño en diagnóstico para el caso de daño múltiple con un total de 8 episodios con mejor comportamiento que algoritmos genéticos que mostró 4 episodios. Los comportamientos en cuanto al ruido y al número de modos son similares a los obtenidos con la viga.

Tabla 4. Resultados de algoritmo genético Vs PSO en la armadura
Table 4. Genetic algorithm results v/s PSO results in the frame structure

Tipo de daño/ Type of damage	Modos/ Modes	Sin Ruido/ Noiseless			Ruido <1%/ Noise <1%			Ruido <3%/ Noise <3%			Ruido <5%/ Noise <5%		
		Det	Diag	F.P	Det	Diag	F.P	Det	Diag	F.P	Det	Diag	F.P
Simple/ Simple	4	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0
	5	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0
	6	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0	1/1	1/1	0
2 Elementos/ Elements	4	2/2	2/2	0	2/2	2/2	0	2/2	1/2	2	2/2	2/2	1
	5	2/2	1/2	0	2/2	2/2	0	2/2	1/2	0	2/2	0/2	0
	6	2/2	0/2	0	2/2	0/2	0	2/2	0/2	0	2/2	1/2	0

Verde: Mejor comportamiento AG

Green: Best AG behavior

Det: Detecta

Det: detects

Diag: Diagnostica

Diag: Diagnoses

Amarillo: Mejor comportamiento PSO.

Yellow: Best PSO behavior

F.P: Falso Positivo

F.P: False-positive

Los tiempos promedio de respuesta usando algoritmos genéticos fueron menores en comparación con la técnica de optimización PSO.

5. Conclusiones

Una viga y una armadura bajo diversos escenarios de daño, simple y múltiple, fueron estudiadas bajo los enfoques de PSO y AGs. Los resultados experimentales mostraron la eficacia y robustez de los dos sistemas propuestos en identificar consistentemente la condición de falla. Las pruebas muestran que con ruidos menores al 5%, ambas metodologías detectan confiablemente los elementos damnificados. Mayores niveles de ruido afectan significativamente el desempeño de ésta. Se encontró que la función objetivo, Fórmula 5, mostró mejor desempeño en la viga para PSO y AGs y la Fórmula 6 en la armadura usando AGs. Los tiempos de procesamiento dependen del tipo de estructura analizada y de los valores iniciales asumidos aleatoriamente en PSO y AGs. En la medida en que el número de elementos en la estructura aumenta, el tiempo de procesamiento por las metodologías se puede tornar prohibitivo. En cuanto al desempeño se concluye que AGs presenta un mejor desempeño detectando y diagnosticando en la viga y PSO mostró mejores capacidades de monitoreo en el caso de la armadura. Por lo tanto, ambos sistemas son susceptibles de ser escogidos en tareas de monitoreo estructural, un estudio de desempeño previo es necesario para evaluar cual de los dos enfoques se desempeña mejor.

6. Referencias/References

- Bagchi J. A. y XU H. (2006)**, Performance of Vibration-based Techniques for the Identification of Structural Damage, Structural Health Monitoring, Vol. 5, No. 3, 215–227.
- Chen B. y Nagarajaiah S. (2007)**, Flexibility-based structural damage identification using Gauss-Newton method. Proc. of SPIE, Vol. 6529.
- Doebeling S., Farrar C. y Prime M. (1998)**, A Summary Review of Vibration- Based Damage Identification Methods, The Shock and Vibration Digest. Vol. 30, No. 2, 91-105.
- Faravelli L., Casciati S. (2004)**, Structural damage detection and localization by response change diagnosis, Progress in Structural Engineering and Materials. Vol. 6, No. 2, 104–115.
- Friswell M., Penny J. y Garvey S. (2002)**, A combined genetic eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures,” Computers and Structures, vol. 69, pp. 547 -556, 1998.
- Goldberg D. (1989)**, Genetic Algorithms in Search Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing Company. United States
- Michalewicz Z. (1994)**, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 2da ed., Berlin: Springer-Verlag
- Moslem K., Nafaspour R. (2002)**, Structural Damage detection by genetic algorithms. AIAA Journal Vol. 40, No 7, 1395-1401
- Rahai A., Bakhtiari-Nejad F. y Esfandiari A. (2006)**, Damage assessment of structure using incomplete measured mode shapes, Structural Control and Health Monitoring. Vol. 14, No.5, 808-829.
- Ren W., Roeck G. (2002)**, Structural Damage Identification using Modal Data. I: Simulation Verification, Journal of Structural Engineering, Vol.128, No.1, 87– 95.
- Villalba Morales J.D. (2009)**, Detecção de Dano em Estruturas Utilizando Algoritmos Geneticos e Parametros Dinamicos, MSc thesis, Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos, Brazil.
- Villalba J. y Laier J. (2010)**, Detección de daño estructural por algoritmos genéticos: una comparación de diferentes tipos de codificación de individuos. Ingeniería y Desarrollo, No. 27, 170-186.