

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 Quiroga^{1*}

* 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 (Doebling 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. Introduction

Civil works structures are systems exposed to damages by usage, ageing, overloading, and fatigue or by potential seismic or explosive events. Therefore, the continuous evaluation of their condition, by means of a damage detection system, is an essential task. Damage detection systems allow us to take actions in relation to the reinforcement or repairing works to be performed on the structures, thus reducing great damages probabilities and protecting their and potential users integrity.

Nowadays, the progressive development of control techniques has been focused on establishing analytical, reliable and versatile procedures. Among the implemented analytical procedures, the ones based on structure dynamical responses are the ones standing out (Doebling et al., 1998), (Ren and Roeck, 2002), (Farevelli and Casciati, 2004), (Rahai et al., 2006) and (Humar et al., 2006). This research implements a damage detection system in two civil works structures, by means of a characteristic analysis of their dynamic response. This proposal uses a damage indicator based on the drop of elasticity modulus, which takes place in one or several structural elements.

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.

The variation of elasticity modulus is predicted by posing an inverse approach of the dynamic response, so as to restore elasticity modulus of each component by using GA and 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

2. Theoretical framework

Monitoring structures is based on dynamical characteristics which employ different variables, such as elastic energy mode, modal vibration and/or natural frequencies, residual strong force vectors and flexibility matrix variations of the structure, Villalba (2009). Model-based damage detection systems compare some of the abovementioned dynamic variables, using a benchmark value corresponding to the variable value under normal condition. From the resulting difference, a damage residue or indicator is obtained, which is used to carry out a diagnosis analysis. This particular study employs input variables on the modal matrix system and on the natural frequency vector.

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.

Structures dynamic responses

The dynamical response of a multiple-freedom level structure can be determined by using a modal approach; that assumes the system as non-damped element by using Equation 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.

where M and K are mass and stiffness matrixes of $n \times n$ order, respectively, with components m_{ik} and k_{ik} representing the common forces for each coordinate i , when acceleration is applied for a coordinate k and $q(t)$, which correspond to the system displacement vector. The i -th solution for Equation 1 is provided by Equation 2.

$$q(t) = \Phi_i \text{sen}(\omega_i t - \alpha_i) \quad (2)$$

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 $\text{sen}(\omega_i t - \alpha_i)$ se obtiene la Fórmula 3.

Where Φ_i is the i -form of a mode (own vector) with the corresponding circular natural frequency ω_i (own value) and phase angle α_i . By replacing Equation 2 by Equation 1, and eliminating $\text{sen}(\omega_i t - \alpha_i)$ Equation 3 is obtained.

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

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.

The solution of equation 3 corresponds to the determination of values and own vectors in the system, which are normalized by using the mass matrix, see Equation 4, where Φ_{ni} is the normalized modal form.

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



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).

$$\text{Min } f = \sum_{j=1}^r W_{w_j} \left(\frac{\delta w_{m_j} - \delta w_{a_j}}{w_{m_j}} \right)^2 + \sum_{j=1}^r W_{\phi_j} [1 - \text{MAC}(\phi_{m_j}, \phi_{a_j})] + W_{ns} \delta_{ns} \quad (5)$$

$$\text{Min } f = \sum_{j=1}^r W_{w_j} \left[1 - \left(\frac{w_{m_j}}{w_{a_j}} \right) \right]^2 + \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^s W_{\phi_{ji}} (\phi_{m_{ji}} - \phi_{a_{ij}}) \quad (6)$$

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.

$$\text{MAC}_{ij} = \frac{(\phi_i^T \phi_j)}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)} \quad (7)$$

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.

Objective function of the proposed problem

The objective proposed by this study is to determine the values of a structure elasticity modulus, which can emulate the dynamical response obtained by the same analyzed structure. Such emulation is obtained by minimizing errors between assumed values and the values corresponding to the structure itself. Above errors are evaluated by using the objective Equation 5 (Friswell et al., 1998) and Equation 6 (Moslem and Nafaspour, 2002), which are optimized by employing PSO and GA. This optimization process is intended to minimize the difference between the experimental behavior of vibration modes/natural frequencies and the benchmark ones, by only modifying the elasticity modulus. The optimization process enables the determination of elasticity modulus for each structure element. Their comparison to the initial values allows us to determine the normal condition or failure condition in a given structure (Villalba and Laier, 2010).

In Equations 5 and 6, the sub index m corresponds to measured or simulated data; sub index a corresponds to data obtained from the analytical model; δw are variations of natural frequencies; w_j y ϕ_j correspond to the j -th natural frequency and modal form, respectively. Terms W are weight factors for each dynamical characteristics; δ_{ns} assumes a zero value if it has a damaged spot and; it assumes a value one if it has more than one damaged spot; r is the amount of modal forms employed for comparison and; s is the amount of vector components of the j -ith modal form (number of freedom levels). The term MAC , corresponds to the Modal Assurance Criterion, which enables the estimation of correlation level among vibration modes, Equation 7.

Where ϕ_i is the own vector of i mode, which only contains the measured freedom levels and, ϕ_j corresponds to the own vector experimental value of j mode. Finally, as observed in the employed objective functions, this research simultaneously employs natural frequency and vibration modes as damage indicator parameters.

3. PSO and genetic algorithms

PSO and GA are meta-heuristic techniques employed to solve optimization problems with high-complexity, non-linear search spaces and with multiple local best known position, Villalba (2009), the same as in the case under study.



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.

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

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

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.

Both algorithms are classified as stochastic optimization algorithms based on a given population. The algorithms are inspired by some animals' social behavior, in the PSO case and; by the natural selection mechanism developed by GA. PSO and GA allow us to simultaneously explore the solution space in multiple directions avoiding local minimums.

PSO as well as the behavior of swarms, in nature, work by prioritizing best outcomes. In terms of optimization, it means that if one random solution is classified as a best solution, then the other potential solutions address the search through a weighting factor between the direction instructed by the member or directed by the colony. In PSO, this behavior is emulated by particles at given positions and speeds within the search space. The initial population is randomly determined; each particle moves across such search space and remembers the best position achieved. Each particle broadcasts the best positions to the other particles, which adapt their own position and speed based on the best positions. Speed is adjusted according to the historical particles behavior. This search procedure is described by Equations 8 and 9.

In Equation 8, c_1 and c_2 are positive constants defined as acceleration coefficients; w is the inertial factor; $rand_1$ and $rand_2$ are two random numbers (with uniform probability distribution) in the range [0.1]; x_i represents the i -th particle and $pbest_i$ the best previous position of x_i ; $gbest$ is the position of the best particle of the whole population and v_i is the change of position (speed) of particle x_i . Speed variations in Equation 8 comprise three parts: momentum, cognitive and social. In this way, a speed is obtained that tends to approximate the particle towards $pbest$ and $gbest$.

In the case of GA, they combine the best solution survival principle, with a structured random information exchange, by configuring a human-inference search algorithm. GA efficiently employs historical information to speculate new and better solutions. The best solution search process is based on a random set of possible solutions: population. Then, the adaptation of the individuals to the environment of the current generation is evaluated by means of the objective function defined for the analysis. Such adaptation determines the probability for a given individual to continue and to reproduce with another individual.



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 dañificada $[\omega_m, \Phi_m]$ 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 dañificada 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,

The reproduction process will produce new individuals, who have high possibilities of owning better characteristics than those the previous generations had. Furthermore, such individuals can be subjected to a mutation process that slightly changes their own characteristics. Above procedure is carried out in an iterative manner, until reaching the best value in the objective function, or until reaching a predetermined number of generations. Furthermore, in the implementation of this optimization scheme an elitism operator is employed, who enables the convergence of this method. Summarizing, each generation requires three stages: selection, crossover and mutation. For a better understanding of each process, we recommend the reader to examine classic texts by Goldberg (1989) and Michalewicz (1994).

4. Methodology implementation

The structure dynamical response, frequencies and modal forms, under normal conditions or different damage stages, are determined by using the free-download software OPENSEES[®]. The failure detection problem, proposed by this study, employs both optimization techniques considering elasticity modulus variations between 0 - 40%. The structure dynamical response is under a non-damped linear regimen.

So as to study the damage condition, the structure failure is emulated by decreasing the elasticity modulus value down to one or several elements in the structure, by using a MATLAB[®] algorithm. The new version introduces OPENSEES, which determines dynamical characteristics, natural frequencies and their corresponding vibration modes. Such characteristics will be employed to carry out an inverse procedure, that is to say, they will be used to determine the elasticity modulus for each element by employing GA and PSO. Once the cost function is optimized, the emulated structure is compared to the original one. From this comparison, the difference is established for each element, residue, which is used for the structure diagnosis.

The methodology involves three stages: 1) creating different structure damage scenarios by reducing the elements elasticity modulus by using MATLAB and; determine frequencies and modal forms in the damaged structure $[\omega_m, \Phi_m]$ by using OPENSEES. 2) Establishing the elements elasticity modulus based on the optimization algorithms and; determine dynamical characteristics for different elasticity modulus solutions employing OPENSEES $[\omega_a, \Phi_a]$. Such dynamical characteristics are compared to the damaged structure dynamical characteristics by means of an objective function. Afterwards, the objective function values go back to the schemes based on GA and PSO, in order to produce new solutions. 3) Stage 2 is iteratively repeated until reaching a minimum error considered by the objective function, or until achieving a maximum number of iterations. Damage detection system is applied on two types of plain structural systems: beam structure and framework structure, see Figures 1a) and 1b). The supported beam is discretized in 10 elements,



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.

each considered as uniform element, with an initial elasticity modulus e equal to the value assumed as normal condition. Other parameters, such as area, inertial moment and density do not consider variations. For the analysis of damaged beam structure, only vertical freedom levels on vibration mode were considered. The framework structure comprises 13 elements; it is simply supported and the horizontal elements are uniformly spaced.

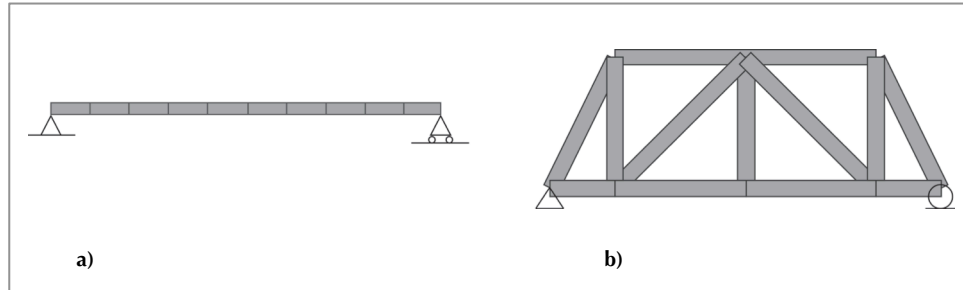


Figure 1. (a) Supported beam and (b) 13-elements supported framework structure
Figura 1. (a) Viga simplemente apoyada y (b) Armadura de 13 elementos simplemente apoyada

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.

The presence of noise in the measurements is achieved by introducing small disturbances into natural frequencies and modal forms by using Equations 10 and 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.

Where f_n and ϕ_n correspond to natural frequencies and modal forms without noise, respectively; f_{nr} and ϕ_{nr} are the values of the same noise parameters. Noise_f and Noise_ϕ are the introduced noise percentages. Natural frequencies and modal forms are polluted with noise, with an average error of $\pm 0.15\%$ and $\pm 3\%$, respectively (Chen and Nagarajaiah, 2007).

The selection of parameters associated with PSO and genetic algorithms significantly affect their behavior. In this particular case, the relevant parameters employed by the PSO algorithm implementation were obtained after completing a thorough test process, as much for the supported beam as for the framework structure, see Table 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>pbest</i> / <i>Influence from the best position value pbest</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.

In the case of genetic algorithms, the parameter values varied when the system corresponded to the beam structure or to the framework structure. Crossover was the key parameter used to obtain the best results. The values employed in each case are listed by Table 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.

In the case of objective functions, it was found that the objective function in Equation 6 showed better results than Equation 5 for the beam structure, under both systems and; for the framework structure when PSO was employed. On the other hand, in the case of the framework structure under GA system, the objective function in Equation 5, showed better results related to detection and diagnosis than Equation 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.

The performance evaluation of both systems is carried out taking into consideration the following criteria: *damage detection* (identifies the damaged element or damaged elements); *damage diagnosis* (detects the damage element or damaged elements with a 5% real damage probable uncertainty), *false-positive* (correspond to the non-affected element or elements, that seems to be affected, with a margin higher that 10% in the elasticity modulus variation). Additionally, the results achieved correspond to the best ones obtained from several algorithm runs for each given damage scenario.

Additionally, Table 3 shows the best results for beam structure by using systems, genetic algorithms and 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.

According to Table 3, the results obtained from the use of GA, in relation to detection, diagnosis and false-positives exceed the PSO results, yielding a total of 11 events showing better behavior results than PSO. The PSO system only showed 6 events with better behavior. Regarding the computer processing time, genetic algorithms showed a shorter calculation time for all analyzed cases, with a ratio of 1:2 approximately.

Additionally, it is observed that when dealing with a simple damage, both systems detect and diagnose the total cases amount without the presence of false-positives. The noise percentage increment produces a detriment in both systems as far as diagnosis abilities and false-positive presence are concerned. In regards to vibration modes, it is hard to achieve a given behavior, since when increasing the amount of vibration modes, in some cases diagnosis and false-positives increased but in other cases they decreased.



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.

Table 4 shows the results for the framework structure. In this particular case, the objective functions are different for PSO and GA. Contrarily to the previous case, PSO showed a better diagnosis behavior for the multiple damage case, yielding a total of 8 events with better behavior than the genetic algorithms, which only showed 4 events. The behaviors related to noise and modes amount are similar to the ones obtained for the beam structure.

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

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.

The average response times using genetic algorithms were shorter in comparison to the optimization technique 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 dañificados. 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.

5. Conclusions

A beam structure and a framework structure were studied under different simple and multiple damage conditions, employing PSO and GA techniques. Experimental results showed the effectiveness and robustness of both proposed systems in consistently identifying the damage condition. Tests showed that when considering noises lower than 5%, both techniques reliably detect damaged elements. Higher noise levels significantly affect the behavior of damage condition. It was found that the objective function, Equation 5, showed the best beam structure behavior under PSO and, the best framework behavior under GA using Equation 6. Calculation processing times depend on the type of analyzed structure and also on the initial values, which were randomly assumed for PSO and GA. As far as the number of elements increases in the structure, the techniques processing time might become unaffordable. Regarding behavior, it is concluded that GA shows a better behavior detecting and diagnosing the beam structure; PSO showed better control capabilities in the framework structure case. Therefore, both systems are likely to be chosen for structural control tasks. A previous behavior analysis is necessary before evaluating which technique has the best behavior.



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.
- Doebling 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)**, Deteccao 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.

