

Una solución no simétrica aplicando un algoritmo genético con cruzamiento natural para la optimización estructural de armaduras

A Non-Symmetrical Solution Applying a Genetic Algorithm with Natural Crossover for the Structural Optimization of Truss Structures

Gutiérrez-Astudillo N.C.

*Facultad de Ingeniería
División de Estudios de Posgrado
Universidad Autónoma de Querétaro
Correo: nayarc@gmail.com*

Peniche-Vera R.R.

*Facultad de Ingeniería
División de Estudios de Posgrado
Universidad Autónoma de Querétaro
Correo: peniche@uaq.mx*

Herrera-Ruiz G.

*Facultad de Ingeniería
División de Estudios de Posgrado
Universidad Autónoma de Querétaro
Correo: gherrera@uaq.mx*

Alvarado-Cárdenas R.

*Facultad de Ingeniería
División de Estudios de Posgrado
Universidad Autónoma de Querétaro
Correo: ralvarad@itesm.mx*

Carrión-Viramontes F.J.

*Instituto Mexicano del Transporte
Querétaro, Qro.
Correo: carrion@imt.mx*

Información del artículo: recibido: agosto de 2009, reevaluado: abril y noviembre de 2010, aceptado: julio de 2011

Resumen

En este trabajo se propone un algoritmo genético con "cruzamiento natural" y se aplica sobre una representación continua-discreta con el fin de optimizar armaduras. El objetivo es disminuir el peso restringiendo los desplazamientos de los nodos y limitando los tipos de perfiles estructurales a usar. Las soluciones se combinan con dos tipos de cruzamientos en la misma representación, que permiten explorar de una manera efectiva el espacio de búsqueda. Los resultados se validan comparando los encontrados en este trabajo contra los de la literatura, para el caso del diseño de la armadura de un puente de 70 m de claro. Se obtienen soluciones más ligeras y con diferente topología. Adicionalmente se propone un caso de estudio, el diseño de la techumbre de un invernadero, que después se construye a escala real y se somete a cargas para verificar su resistencia.

Descriptores

- asimetría
- armadura de gran claro
- invernadero

Abstract

In this research it is proposed a genetic algorithm with "natural crossover" that was applied to a continuous-discrete representation in order to optimize truss structures. The objective is to reduce the weight by restraining node displacement and limiting the cross sections to use. The solutions are combined applying two types of crossovers to the same representation, thus allowing to effectively explore the search space. The results are validated by comparing those found herein against those found in current literature for the case of the design of a 70 m span bridge truss structure. Solutions obtained are lighter and with different topology. Additionally, a case study is proposed, a greenhouse roof truss structure, in order to generate an actual application that is built in a practical scale and it is loaded afterwards to verify its strength.

Keywords

- non-symmetry
- long span truss structure
- greenhouse asimetría

Introducción

Los algoritmos genéticos (AG) son herramientas computacionales que se aplican frecuentemente para optimizar un diseño mediante una secuencia automatizada de pasos. Los AG emulan el proceso de selección natural que ocurre en la evolución de una especie para encontrar soluciones óptimas usando un proceso similar. Durante el proceso de optimización (dadas las condiciones ambientales, restricciones propias del problema y la formulación del modelo) no es indispensable la participación ni la experiencia de un especialista para obtener una solución funcional. Sin embargo, en el caso de una solución óptima en un contexto de ingeniería la experiencia es esencial para definir las principales operaciones usadas en un AG, en este caso: cruzamiento, mutación y reproducción (Lyu y Saitou, 2003). Aquí se propone un operador genético que resuelve un problema complejo de manera efectiva y que genera soluciones que llegan a ser prácticas.

El algoritmo planteado se utiliza para disminuir el peso de armaduras con diferentes condiciones de carga. La optimización consiste en minimizar la cantidad de material empleado sin afectar la seguridad estructural representada por los criterios de diseño derivados de reglamentos estructurales. Estos algoritmos requieren pocos parámetros iniciales, permiten el uso de variables continuas y discretas, son robustos y permiten la emergencia de soluciones que replantean nuevos paradigmas. En este caso, "emergencia" se define como un atributo construido a partir de un concepto desconocido, cuya introducción pudiera simplificar y mejorar la efectividad o calidad de un proceso de diseño (Kicinger *et al.*, 2005).

Goldberg en 1989, escribe sobre la importancia del cruzamiento, y en su investigación se enfoca al Cruzamiento de un Punto en un esquema de optimización para representaciones binarias. De este tipo de cruzamiento se derivaron los de dos puntos y múltiples pun-

tos. Entre las referencias estudiadas se han detectado los siguientes tipos de cruzamientos en representaciones binarias: de un punto, dos puntos, múltiples puntos, uniforme y variable-a-variable, los cuales comparten un principio común que es dividir la información de dos soluciones en piezas; éstas después se unen con algún orden preestablecido o aleatorio. Sobre estas piezas no se hace ningún tipo de análisis para su colocación. El proceso de selección define cuáles individuos se aparean, pero entre las referencias estudiadas no se encontró ninguna que ofrezca un criterio para la afinidad entre la pareja propuesta, lo que puede provocar que al cruzar dos buenas soluciones se muestre una mala en lugar de una mejor.

Para inicializar las soluciones existe un esquema en donde una solución contiene el conjunto de todas las posibles soluciones de un problema topológico, en armaduras se le conoce como: *ground structure approach* (Hajela y Lee, 1995), o "estructura universal". En esta investigación se propone un criterio libre del esquema de la "estructura universal", además de que no considera aspectos de simetría y toma el dominio espacial continuo. El dominio espacial continuo implica que en el caso de las coordenadas de los nodos podemos tener una infinidad de ellas. Se propone un esquema de *algoritmo genético con cruzamiento natural* (AGCN) que no dispersa la información de los individuos o soluciones y permite un análisis de la afinidad entre los mismos y sus genes.

Para demostrar la capacidad de emergencia de la metodología, se resuelve el caso de un puente, de 70 m de claro por 10 m de alto, en el que se observan condiciones potenciales de asimetría, pero que en otros trabajos las simplifican para dar una solución simétrica, en este caso, se mejora con un diseño asimétrico; el problema lo propone Shresta y Ghaboussi (1998) y también lo resuelve Yang y Kion (2002). Adicionalmente se plantea el diseño de la techumbre de un invernadero donde las

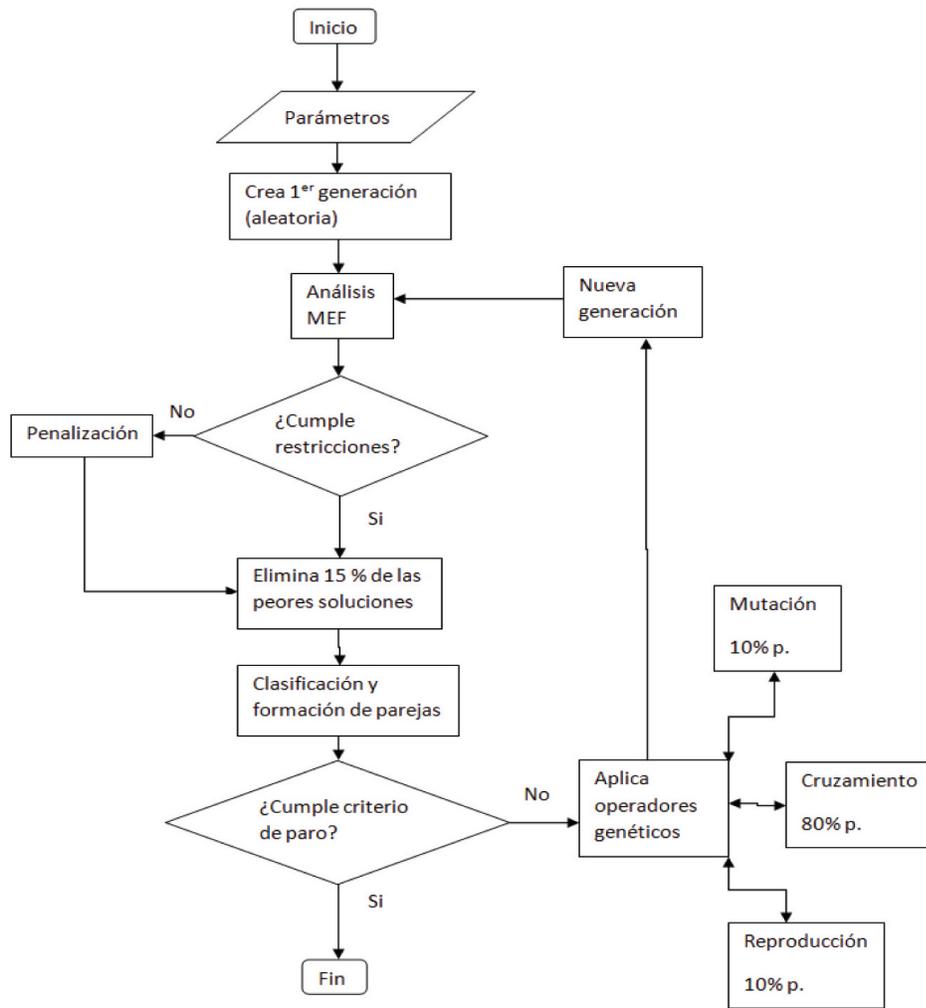


Figura 1. Diagrama del algoritmo

condiciones ambientales son asimétricas, pero la solución tiende a la simetría.

El objetivo de esta investigación es aproximarse a la solución global de los problemas mediante la premisa de que al quitar limitaciones en el dominio del diseño se amplía la posibilidad de encontrar el óptimo global (Kicinger *et al.*, 2005).

Modelo computacional

El procedimiento empleado se presenta en el diagrama de flujo de la figura 1. El modelo computacional del algoritmo genético requiere como parámetros iniciales: el número de generaciones, los individuos por generación, especificaciones del dominio del diseño (geometría, secciones comerciales disponibles, mallado del dominio o discretización del espacio geométrico de la solución).

En el segundo paso se genera la primera población de manera aleatoria, cuidando una distribución uniforme de los nodos.

En el siguiente paso se hace un análisis de los individuos por el *método de elemento finito* (MEF) para el caso de armaduras y se aplican las siguientes restricciones:

Si $maxd_i > (claro/1000)$ entonces aplica:

$$desp_i = (maxd/(claro/1000)-1)*w_i$$

$$w_i = w_i + desp_i$$

Si $esbeltez_i > 0$ entonces aplica:

$$w_i = w_i + esbeltez_i$$

Si $resistencia_i > 0$ entonces aplica:

$$w_i = w_i + resistencia_i$$

donde

w_i es el peso total de la estructura

$$w_i = \sum_{j=1}^m \rho A_j L_j$$

$\max d_i$ representa el máximo desplazamiento que se presenta en la estructura, w_i es el peso total de la estructura y claro es el claro del dominio espacial de la estructura. A_j es el área de la sección transversal j y se multiplica por la longitud de la barra L_j y por ρ que corresponde a la densidad del material.

En esta propuesta los valores de penalización de la esbeltez y la resistencia se obtuvieron revisando cada elemento del individuo y tomando como penalización del elemento la cantidad de material necesario para cumplir con la restricción; al final se suman todas las penalizaciones por elemento.

El diseño de la armadura cumple con lo impuesto por el reglamento de la AISC en su versión ASD de 1989, en donde los esfuerzos, σ_i^b , en los elementos deben cumplir lo siguiente:

En tensión deben ser menores o iguales que $0.6f_y$

En compresión:

$$\text{Si } \lambda_i > C, \text{ pandeo elástico, } \sigma_i^b = \frac{12\pi^2 E}{23\lambda_i^2}$$

$$\text{Si } \lambda_i < C, \text{ pandeo plástico, } \sigma_i^b = \frac{(1 - \frac{\lambda_i^2}{2C^2})f_y}{\frac{5}{3} + \frac{3\lambda_i}{8C} + \frac{\lambda_i^3}{8C^3}}$$

donde $\lambda_i = L_i/r_i$, $C = \pi\sqrt{2E/f_y}$, y L_i y r_i son la longitud de la barra y radio de giro de la sección transversal del elemento i , respectivamente. La relación de esbeltez para las barras en tensión debe ser menor o igual que 300 y que 200 cuando están en compresión.

Las propiedades observadas del acero fueron: $E = 2.039432 \times 10^{10}$ kg/m², $f_y = 2.537054 \times 10^7$ kg/m², $\rho = 7851.03$ kg/m³.

Clasificación, pareo y operadores genéticos

En los algoritmos evolutivos, como los AG, los operadores de variación son los mecanismos mediante los cuales la información genética se transforma al pasar de los padres a los descendientes (Kicinger *et al.*, 2005). Entre los operadores de variación encontramos el cruzamiento y la mutación, siendo el cruzamiento el que se emplea como herramienta principal (Kicinger *et al.*,

2005). Los porcentajes de aplicación entre un operador y otro varían según el problema.

El cruzamiento es la operación más representativa de un AG debido a su capacidad para explorar y explotar el espacio de soluciones. De acuerdo a Erbatur y Hasancebi (2000), la operación de cruzamiento representa 90% de la población creada y se aplica en los mejores individuos para crear dos descendientes de dos padres. Algunas aplicaciones y descripciones de diversos cruzamientos se pueden encontrar en Rajeev y Krishnamoorthy (1997), Erbatur y Hasancebi (2000), Ali *et al.* (2003), Dominik (2006) y Haupt (2008). Las técnicas de cruzamiento se aplican en representaciones con números binarios o reales y sus aplicaciones en diseños estructurales incluyen soluciones en espacios continuos (Rajeev y Krishnamoorthy, 1997). En esta investigación se usan representaciones con números reales y espacio continuo por su adaptación automática para cumplir las propiedades de no redundancia, legalidad, plenitud, causalidad y lamarkiana; cuya descripción presentan Kicinger *et al.* (2005). Al cumplir estas propiedades se espera poder representar todas las soluciones del dominio y visualizarlas sin decodificación, contrario al caso de una representación binaria.

Antes de aplicar los operadores genéticos se hace una clasificación de los individuos. En esta clasificación el individuo mejor adaptado a las condiciones del problema, esto es que no está penalizado o cumple con las restricciones, es el primero en una lista que ayuda a evaluar el comportamiento de una población con respecto a las condiciones del problema.

Para hacer las parejas, primero se selecciona un individuo aleatoriamente (madre) y se usa como pivote para escoger a su pareja. Con una distancia cualquiera dentro de un límite establecido, en este caso 20 individuos arriba o debajo de la madre en la lista de clasificación, se elige el que será el padre. Este límite se estableció probando diferentes valores en varias corridas de prueba.

Cruzamientos para variables continuas

El termino cruzamiento natural se aplica a la combinación de dos tipos de cruzamientos utilizados en una misma representación, pero en diferentes partes de ella.

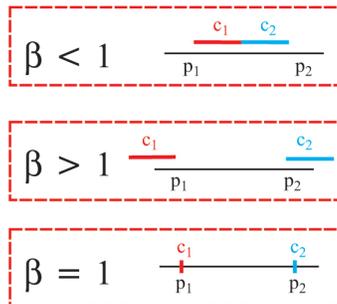
Una de las operaciones empleadas en el cruzamiento de representaciones reales es el Cruzamiento Binario Simulado (SBX por sus siglas en inglés) que se aplica de la siguiente manera y tiene las siguientes propiedades:

$$c_1 = \bar{x} - \frac{1}{2}\beta(p_2 - p_1)$$

$$c_2 = \bar{x} + \frac{1}{2}\beta(p_2 - p_1)$$

Donde c_i es el descendiente i , que dependiendo del valor β puede ser diferente o igual a los padres. Puede ocurrir que se encuentre en un intervalo intermedio entre los padres o con tendencia a parecerse más a alguno de ellos.

Si vemos lo anterior a manera de intervalo se pueden presentar las siguientes condiciones:



Con $\beta < 1$ los vectores hijo se generan dentro del intervalo de los padres en una forma lineal. Cuando $\beta > 1$ los vectores hijo salen del intervalo de los padres y en caso que se presente la tercera condición, los hijos serán iguales a los padres. El cruzamiento SBX se empleó para la parte de las coordenadas y el cruzamiento uniforme (Erbatur y Hasancebi, 2000) y para la parte de las secciones transversales.

Cruzamientos para variables discretas

El cruzamiento uniforme consiste en una selección donde se genera un vector del tamaño de los padres, que contiene ceros y unos distribuidos con una probabilidad uniforme en el vector. Este vector se llama máscara de selección y se usa de manera que un cero presenta la acción de no pasar el cromosoma del padre al hijo, y un uno sí le permite pasar. Entonces, con esta máscara se genera el primer padre, tal cual es creada, y con el segundo padre se usa invertida, los ceros se hacen uno y viceversa, para complementar los cromosomas de los hijos.

Ejemplos de cruzamiento

Los cruzamientos antes mencionados se aplicaron sobre una codificación con números reales en donde las columnas corresponden respectivamente a: conectivi-

dades (nodo i , nodo j), coordenadas de los nodos final e inicial (x_i, y_i, x_j, y_j), longitud (l_i) y sección transversal empleada (A_i), en total 8 columnas. Una fila representa, por lo tanto, las propiedades de una barra en la armadura. Esta representación puede tener cualquier número de filas pero las columnas están restringidas según las propiedades de la barra.

Si tomamos dos segmentos de cromosoma (en este ejemplo usamos coordenadas y secciones transversales) del padre 1 (p_1) y de la madre 2 (p_2), se efectuarán las operaciones de cruzamiento de la siguiente manera:

Ejemplo

$p = (x_i, y_i, x_j, y_j, A_i)$ ← formato de representación para ejemplo

$p_1 = (0, 2, 2, 3, A)$ ← padre 1

$p_2 = (0.1, 3, 1, 3, B)$ ← madre 2

Cruzamiento SBX

$$\bar{X} = (p_1 + p_2)/2 = (0.05, 2.5, 1.5, 3)$$

$$p_2 - p_1 = (0.1, 1, -1, 0)$$

Si $\beta = 0.25$

$$c_1 = (0.05, 2.5, 1.5, 3) - 0.5 \cdot (0.1, 1, -1, 0) \\ = (0.025, 2.25, 1.75, 3)$$

Para complementar, el valor A representa un número de sección transversal y B representa otro. La máscara de selección es un solo número, en este caso, un cero (0) que significa que la sección A no se usa con el hijo c_1 , pero sí la sección B. Por lo que el primero de los hijos queda:

$$c_1 = (0.025, 2.25, 1.75, 3, B)$$

El segundo hijo se genera aplicando las operaciones correspondientes indicadas con anterioridad, β varía aleatoriamente.

En esta investigación se optó por aplicar los porcentajes para el cruzamiento, mutación y reproducción que proponen Yang y Kiong (2002), que aunque difieren de las tomadas por Velázquez y Santillán (2006), ambas resuelven casos de armaduras similares. Se toman los de los primeros porque se realizaron ensayos que demostraron que esos valores tienen mejor convergencia. Las poblaciones se generaron con una participación de 10% por la operación de reproducción, 80% por cruce y 10% mediante la operación de mutación.

Mutación

La operación de mutación consistió en aplicar una mutación uniforme. El procedimiento fue elegir aleatoriamente 10% de la población, antes del operador de

cruzamiento, para que sufriera modificaciones. Estas modificaciones se hicieron escogiendo con una probabilidad p_{mu} generada aleatoriamente, un punto en la representación del individuo, este punto puede ser una ordenada o una sección transversal. A continuación, se multiplica por un valor aleatorio que represente un cambio pequeño en el individuo, en una ordena un movimiento hasta de 2 m y en una sección transversal un paso hasta de dos secciones, en ambos casos se respetan los límites del dominio.

Reproducción

Para aplicar la reproducción de igual manera se toman al azar 10% de los individuos de la población para pasar sin cambio a la siguiente generación.

Ciclo

Ya que se generó la nueva población, los individuos vuelven al análisis MEF, se clasifican y se les aplican los operadores genéticos siguiendo un ciclo hasta que se alcance el criterio de paro en la corrida, en este caso es el número de generaciones.

Casos de estudio

Puente de 70 m de claro

El primer problema de estudio fue el caso de un puente de 70 m de claro por 10 m de alto (figura 2), cuya carga

P fue 50,985.81 kg, en donde se emplearon los siguientes parámetros: 251 generaciones, 2,000 individuos por generación, 30 secciones transversales posibles que van de $W14 \times 22$ a $W14 \times 426$ de los perfiles tipo IPR encontrados comercialmente en México. Este mismo caso fue resuelto por Shrestha y Ghaboussi 1998; Yang y Kiong (2002). Aunque Yang y Kiong hacen consideraciones de simetría.

Acciones de diseño consideradas en el diseño de un invernadero

Se considera la norma europea EN 13031-1:2001 para el diseño de invernaderos. De acuerdo con esta norma se deben abarcar los siguientes aspectos para diseñar un invernadero.

Clasificación del invernadero:

- Por el tipo de invernadero a diseñar se considera que es una estructura tipo B, debido a que el cerramiento tolera desplazamientos, en este caso es una cubierta de film plástico.
- La clase del invernadero se da por la duración de la vida útil del invernadero y el tipo de cosechas y/o equipo que se vaya a contener, aquí se considera que tendrá una vida útil de 10 años, por lo tanto, el invernadero se designaría como un B10.

En cuanto a las acciones de diseño se calculan tomando en cuenta:

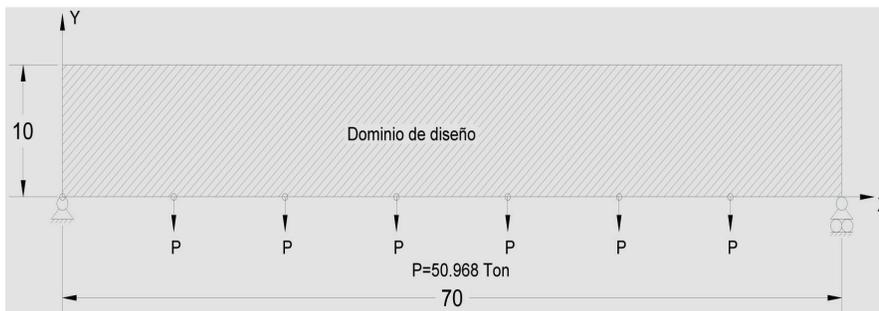


Figura 2. Dominio y condiciones de frontera caso puente

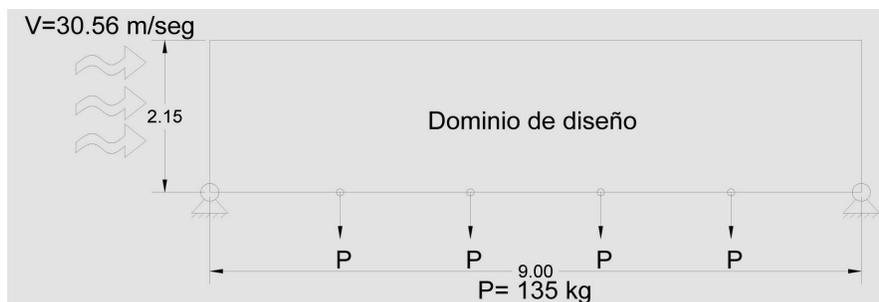


Figura 3. Dominio y condiciones de frontera caso invernadero

P = Acciones permanentes + acciones permanentes de instalaciones + acción del viento + acción de nieve + productos

Esta combinación es la única, debido a que sólo se está diseñando la estructura de cubierta y se penalizan las formas que pudieran llegar a acumular agua, granizo o nieve. Más combinaciones se encuentran en la tabla 5 de la EN 13031-1:2001. Tampoco se toman instalaciones permanentes en la estructura de cubierta, como pueden ser calentadores o lámparas. La combinación final queda:

$$P_u = \gamma_{G1} G_{k1} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \psi_0 \gamma_{Q3} Q_{k3}$$

donde

G_{k1} = valor característico de la acción permanente

Q_{k1} = valor característico de la acción del viento

Q_{k3} = valor característico de la acción de productos

γ = coeficiente parcial, valor de 1.5 para γ_{Q1}

y γ_{Q3} para $\gamma_{G1} = 1$

ψ = coeficiente de combinación, valor de 1

Para calcular el valor característico por producto se toman 15.3 kg/m² (cultivo ligero como pepino y jitomates) y se considera que las armaduras de las naves tienen un espaciamiento de 3 m. En el segundo diseño (figura 3) se presenta un invernadero en donde se analiza la primera armadura de un caso de varias naves adosadas, la carga P fue 150 kg. Además, se toman dos apoyos articulados como soporte de la nave del invernadero.

En el valor característico de la acción del viento se toman los coeficientes de presión calculados según las NTC-04 correspondientes. En ellas, se calculan coeficientes de presión según las inclinaciones de las barras de los elementos exteriores y su posición en la cubierta.

Se toma una sola nave representativa debido a que según Holmes (2001) la condición de carga máxima en una construcción de naves adosadas se presenta sobre la nave de barlovento. Generalmente se usan dos o más naves en un invernadero, por lo que en la primera nave que recibe inicialmente la presión de viento (nave de barlovento) se mantiene en el mismo sentido de la presión de viento. Por lo anterior, se elige una sola dirección de viento para este caso de estudio. La solución que emerge del algoritmo se analiza después en la otra dirección. Se usa el RCDF para colocar las presiones de viento según la NTC-04 correspondiente (Gobierno del DF, 2004), esto de manera automática en cada solución generada y traduciendo la presión a una carga puntual en el nodo de la estructura.

En el caso de los perfiles empleados del invernadero se tomaron ángulos de lados iguales y perfiles rectangulares, con las propiedades de la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de perfiles comerciales locales

# Secc.	Área m ²	Mínimo radio de giro m	Masa Kg/m
1	0.000242	0.009347	1.89994926
2	0.000271	0.01206	2.127621
3	0.000274	0.014803	2.151174
4	0.000317	0.015759	2.48877651
5	0.000515	0.015821	4.04328045
6	0.000581	0.019537	4.561431
7	0.00069	0.020039	5.4172107
8	0.000735	0.02053	5.770485
9	0.001452	0.023464	11.3996956

Fue necesario considerar, en el caso del invernadero, que la longitud de los elementos en el plano de la estructura se mantiene mediante conexiones perpendiculares al nodo y con rigidez suficiente. El caso del puente se tomó como un ejercicio académico por lo que sólo consideró lo planteado en el problema original, esto para poder hacer una comparación fiel. Adicionalmente el algoritmo no toma en cuenta consideraciones de simetría en las soluciones, como en Shrestha y Ghaboussi, 1998.

Resultados

En la figura 4 se observan algunas soluciones obtenidas durante la corrida del puente de 70 m. Estas soluciones muestran cómo la solución parte de diseños completamente asimétricos y cómo el algoritmo va mejorando la solución hasta llegar a una solución que tiende a ser simétrica. Un punto importante a observar es la solución de la generación 42, en ella se muestra una solución con la topología similar a la final; sin embargo, el algoritmo la deja y vuelve a una topología similar en la generación 111. Debajo de cada solución se observa la generación en la que se encontró el peso del mejor individuo, el peso promedio de todos los individuos de la generación y la calificación del mejor individuo. En este caso, los pesos están expresados en toneladas métricas.

La tabla 2 presenta las propiedades de la mejor solución encontrada en el caso del puente. La primera y segunda columna son los nodos que se conectan y la tercer columna es la sección transversal comercial con la que se conectan.

Nodo i	Nodo j	Sec.trans.	Coordenadas de nodos (m)			Tabla 2. Datos generales de solución y corrida
			Nodo	X	Y	
1	3	W14X82	2	5.7697	5.5226	
1	2	W14X120	4	13.839	8.2526	
2	3	W14X53	6	23.296	9.82	
2	4	W14X145	8	31.311	10	
3	5	W14X132	9	39.275	10	
3	4	W14X68	11	46.915	10	
4	6	W14X176	13	55.403	8.378	
4	5	W14X74	15	64.677	5.0981	
5	7	W14X176				Datos corrida
5	6	W14X61			44077	Peso(kg)
6	8	W14X233			2000	Tamaño de población
6	7	W14X53			237	Número total de generaciones en la corrida
7	10	W14X176			474000	Total de pasos de iteración
7	8	W14X30			7.37	Tiempo de corrida (hrs)
8	10	W14X43	2	2.2	GHz	Procesador
8	9	W14X193		1.87	GB	Memoria RAM
9	11	W14X233				
9	10	W14X34				
10	12	W14X159				
10	11	W14X74				
11	13	W14X211				
11	12	W14X30				
12	14	W14X132				
12	13	W14X38				
13	15	W14X145				
13	14	W14X61				
14	16	W14X90				
14	15	W14X48				
15	16	W14X145				

Las soluciones mostradas en la figura 4 están relacionadas con cambios de pendiente en la evolución de los pesos promedio de la figura 5. En el caso del puente la solución de Yang y Kiong (2002) es 45,404 kg, es decir, 1,327 kg más pesada que la presentada. Con un análisis estructural se observa que ambas soluciones cumplen con las restricciones impuestas, desplazamientos y esfuerzos. La solución de Yang y Kiong (2002) fue encontrada en 166,000 pasos de iteración, 308,000 pasos menos que en esta investigación. Sin embargo, ellos toman un dominio discreto y en condiciones de simetría.

En el caso de la solución del invernadero, la evolución de las mejores soluciones se muestra en la figura 6. La evolución presenta un comportamiento diferente a la evolución de la corrida del puente, debido a que el algoritmo encuentra en generaciones tempranas (16 y 26) una topología con la cual se mantiene la solución. Igual que en las soluciones del puente, debajo de cada solución se

observa la generación en la que se encontró el peso del mejor individuo, el peso promedio de todos los individuos de la generación y la calificación del mejor individuo. La tabla 3 muestra los datos de la mejor solución encontrada en la generación 183 y con un peso de 70.9 kg.

En el gráfico de la figura 7 correspondiente al problema del invernadero, podemos observar la evolución de los valores de peso del mejor individuo, peso promedio de la generación y penalización del mejor individuo en toda la corrida y en el caso del invernadero. Los parámetros de la corrida fueron un total de 200 generaciones, 2,000 individuos y tomó 6.9 hrs en el mismo procesador que en el caso anterior.

En ambas gráficas de evolución (figuras 5 y 7) se muestran 4 etapas que definen procesos de optimización muy marcados de la solución y que se asocian a diferentes tipos de optimización con las siguientes características:

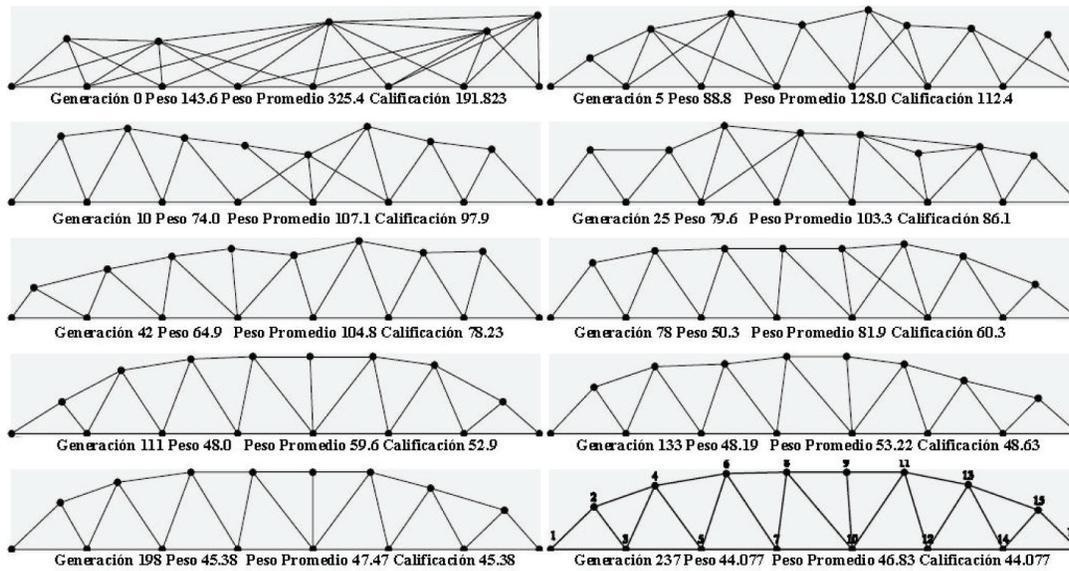


Figura 4. Evolución de las soluciones caso puente

Etapa 1: generación de la 1 a la 15 aproximadamente, optimización de topología y secciones transversales, se reducen elementos por nodos y nodos en las soluciones.
 Etapa 2: se tiende a fijar una topología sin cambio de secciones transversales.

Etapa 3: convergencia en las secciones transversales.
 Etapa 4: se cumplen todas las restricciones y se minimiza el peso de la solución mediante pequeños ajustes en geometría y secciones transversales.

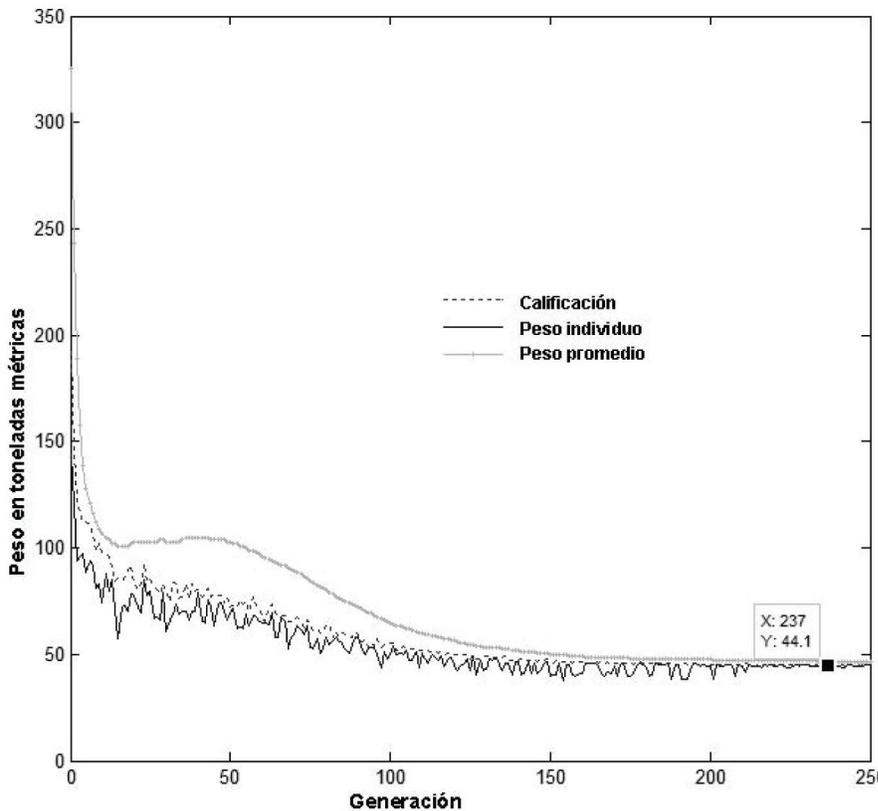


Figura 5. Evolución de valores en caso del puente

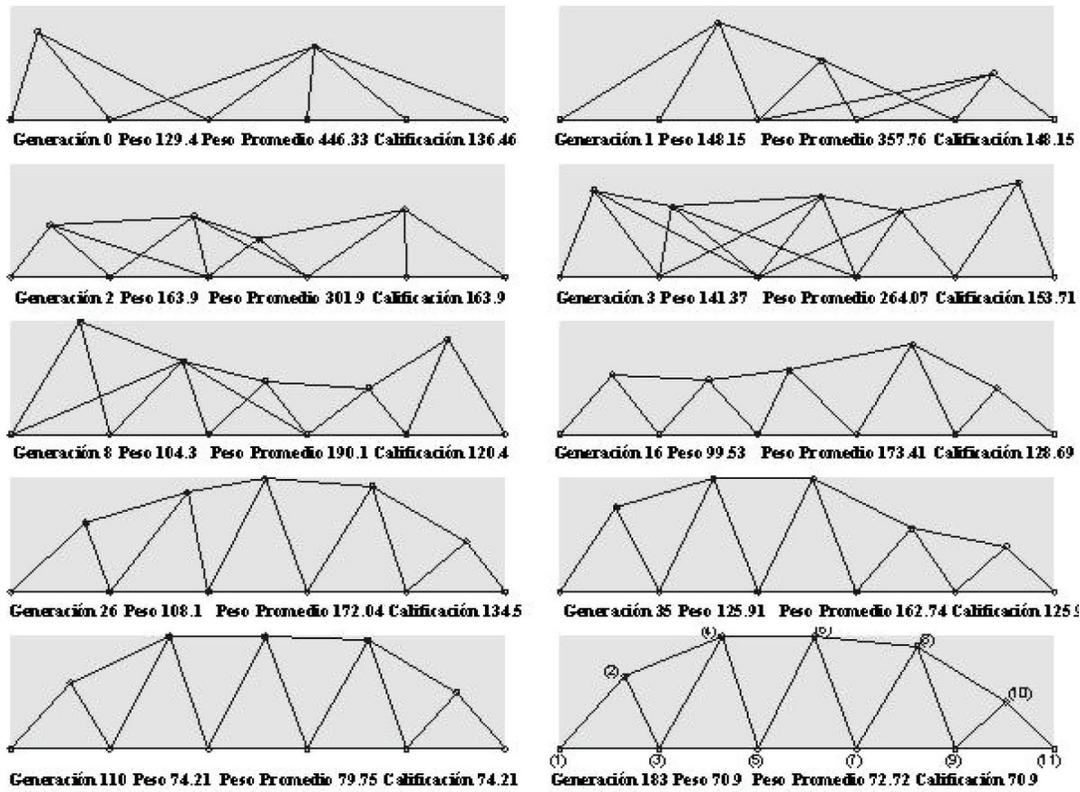


Figura 6. Evolución de las soluciones caso invernadero

Nodo i	Nodo j	Coord ix	Coord iy	Coord jx	Coord jy	Sección ("x" x mm)
1	3	0.000	0.000	1.800	0.000	PTR1X1X2.66
1	2	0.000	0.000	1.181	1.385	L2X2X3.175
2	3	1.181	1.385	1.800	0.000	PTR1.5X1.5X1.89
2	4	1.181	1.385	2.950	2.150	PTR1X1X2.66
3	5	1.800	0.000	3.600	0.000	PTR1X1X2.66
3	4	1.800	0.000	2.950	2.150	PTR1X1X2.66
4	5	2.950	2.150	3.600	0.000	PTR1X1X2.66
4	6	2.950	2.150	4.629	2.150	PTR1X1X2.66
5	7	3.600	0.000	5.400	0.000	PTR1X1X2.66
5	6	3.600	0.000	4.629	2.150	PTR1X1X2.66
6	7	4.629	2.150	5.400	0.000	PTR1X1X2.66
6	8	4.629	2.150	6.506	1.965	PTR1X1X2.66
7	9	5.400	0.000	7.200	0.000	PTR1X1X2.66
7	8	5.400	0.000	6.506	1.965	PTR1.5X1.5X1.89
8	9	6.506	1.965	7.200	0.000	PTR1.25X1.25X2.3
8	10	6.506	1.965	8.121	0.903	PTR1X1X2.66
9	11	7.200	0.000	9.000	0.000	PTR1X1X2.66
9	10	7.200	0.000	8.121	0.903	PTR1X1X2.66
10	11	8.121	0.903	9.000	0.000	PTR1X1X2.66

Tabla 3. Dimensiones de la mejor solución para la armadura del invernadero

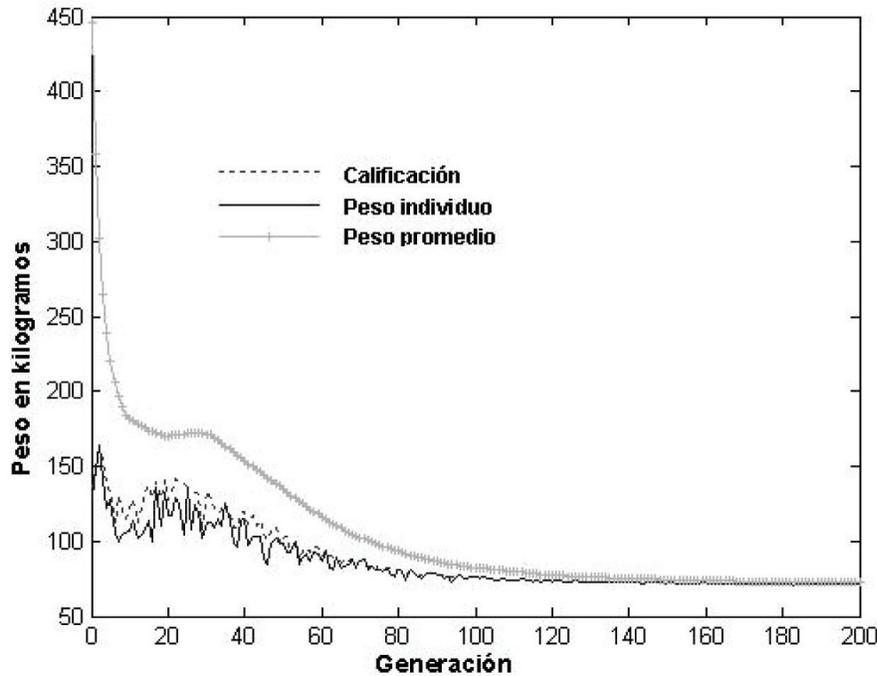


Figura 7. Evolución de valores en caso invernadero

Tabla 4. Comparación de resultados en el caso del puente de 70 m

Investigación	Año	Masa kg	Pasos de iteración
Shrestha y Ghaboussi	1998	60,329	975,400
Yang y Kiong	2002	45,404	166,000
En esta investigación	2009	44,077	474,000

La tabla 4 muestra los pesos o masa de las soluciones del puente encontradas en otras investigaciones, un dato importante es que las investigaciones anteriores no mencionan tiempos de cómputo.

La figura 8 muestra el caso de la armadura del invernadero probada y construida. En la parte superior se observan los sujetos de prueba y las armaduras, son los modelos que se desean remplazar.

Los resultados mostraron soluciones factibles y por las necesidades actuales de desarrollo se construyó la solución del invernadero en el Campus Amazcala de la UAQ. El modelo teórico requirió varios ajustes para tener una aplicación práctica. El primero fue ajustar a una curva el perfil exterior de la solución obtenida por el algoritmo. El siguiente ajuste fue generar rigidez fuera del plano de la armadura, que resultó muy esbelta en

el sentido perpendicular a su plano, lo que condicionó a que las armaduras se subieran en pares. También un perfil L se cambió a PTR para usar un solo tipo de perfil.

Símbolos y anotaciones

$maxd_i$: máximo desplazamiento que se presenta en la estructura

w_i : peso total de la estructura en kg

$claro$: es el claro del dominio espacial de la estructura en m

A_j : área de la sección transversal j número entero

L_j : longitud de la barra en m

ρ : densidad del material en kg

$resistencia_j$: penalización por resistencia de la barra j en kg

$esbeltez_j$: penalización por esbeltez de la barra j en kg

$despi$: penalización por desplazamiento en la solución en kg

c_1 : cromosoma o representación generada por el cruzamiento, hijo 1

c_2 : cromosoma o representación generada por el cruzamiento, hijo 2

\bar{X} : cromosoma promedio de dos padres

β : factor aleatorio en el rango de (0,2)

p_1 : cromosoma del progenitor 1

p_2 : cromosoma del progenitor 2

Conclusiones

La computación evolutiva permite liberarse de paradigmas que sesgan la búsqueda y que limitan el potencial de exploración de algoritmos tan robustos como los algoritmos genéticos. Lo anterior, se observó al encontrar una solución más ligera y con características distintas (asimétrica) a la presentada por Yang y Kiong (2002). Este caso es relevante porque generalmente se simplifican los dominios para encontrar las soluciones en menos pasos de iteración. Sin embargo, aquí se demostró que se pueden dejar fuera soluciones más ligeras que pudieran ayudar a economizar la construcción final.

El algoritmo propuesto demostró, al resolver el caso del puente, que su capacidad de exploración es superior al caso de Shrestha y Ghaboussi (1998), que aunque su solución tiende a la simetría, se queda en un peso alto. En el caso de la solución de Yang y Kiong (2002), queda una diferencia importante en pasos de iteración, 166,000 contra 474,000. Sin embargo, en la solución presentada se encontró un dominio sin simetría y sin ser discreto, Yang y Kiong usan coordenadas cada 50 cm. En esta investigación se considera un dominio de coordenadas continuo y asimetría en la solución, igual que con Shrestha y Ghaboussi.

Las consideraciones de asimetría y continuidad en el dominio se usaron pensando en aplicar el algoritmo en el problema del invernadero, donde se esperaba que la solución fuera asimétrica por la carga de viento. El

reto para el algoritmo fue que las cargas de viento representan un valor que cambia de posición, magnitud, sentido y dirección en cada nodo según la geometría en estudio. La geometría, además, incide en la posibilidad de almacenar agua o granizo en la techumbre. Lo anterior nos indica que el algoritmo encontró un diseño que disminuye las cargas que actúan sobre la techumbre adicionalmente al objetivo de disminuir el peso de la estructura que soportará las demandas estructurales.

Se considera que la mayor contribución del algoritmo propuesto es la capacidad de exploración en situaciones complejas, donde existe la combinación de variables discretas con continuas y variaciones en las condiciones de carga-apoyos. Esto se logró sin cambiar los parámetros de la corrida principal como los porcentajes generados por los operadores genéticos o los factores de penalización. La herramienta que permitió esto fue el trato sobre la representación, contrario a la práctica común donde todos tratan a la solución con una sola operación de cruzamiento, aquí se aplican diferentes cruzamientos para segmentos de la solución. Debido a que el espacio de coordenadas es diferente al espacio de las secciones transversales y éste al de la topología, se induce a los cruzamientos escogidos para cada espacio encontrar soluciones que de otra manera no habrían surgido.

El trabajo futuro se enfocará al estudio del problema en circunstancias de igualdad con las investigaciones anteriores, tratando de ampliar la capacidad del algoritmo a estructuras en tres dimensiones. Con lo anterior, se busca cubrir el problema de estabilidad fuera del plano encontrado al construir la solución del caso del invernadero.

Agradecimientos

Agradecemos al CONACYT la confianza depositada durante los años de estudio, esperamos que esta publicación contribuya a reforzarlos. Agradecemos las aportaciones de los revisores, que enriquecieron el contenido del artículo, así mismo a los asesores que hicieron posible esta contribución.



Figura 8. Estructura de invernadero terminada y cargada

Referencias

- AISC, *Manual of Steel Construction-Allowable Stress Design*, 8a ed., Chicago, IL, American Institute of Steel Construction, 1989.
- Ali N., Behdinan K. y Fawaz Z. Applicability and Viability of a GA based Finite Element Analysis Architecture for Structural Design Optimization. *Computer and Structures*, (número 81) 2003: 2259-2271.
- Dominik-Gwiazda T. *Genetic Algorithms Reference, Volume I, Crossover for Single-Objective Numerical Optimization Problems*, Poland, Tomasz Gwiazda, 2006, 412 p.
- Erbatur F. y Hasancebi O. Evaluation of Crossover Techniques in Genetic Algorithm Based Optimum Structural Design. *Computers and Structures*, (número 78), 2000: 435-448.
- Gobierno del Distrito Federal. Normas técnicas complementarias para el diseño por viento. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, 2004.
- Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Reading, MA, Addison-Wesley, 1989.
- Hajela P. y Lee E. Genetic Algorithms in Truss Topological Optimization. *J Solids Struct*, volumen 32 (número 22), 1995: 3341-3357.
- Haupt Randy L. *Practical Genetic Algorithms*, Reading, MA, Wiley-Interscience, 2008.
- Holmes D.J. *Wind Loading of Structures*, Londres, Spon Press, 2001, pp. 162-180.
- Kicinger R, Arciszewski T. y De-Jong K. Evolutionary Computation and Structural Design: A Survey of the State-of-the-Art. *Computers and Structures*, (número 83) 2005: 1943-1978.
- Lyu N. y Saitou K. Topology Optimization of Multi-Component Structures via Decomposition-Based Assembly Synthesis, en: Proceeding of DETC'03 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, IL. 2003.
- Rajeev S. y Krishnamoorthy C.S. Genetic Algorithms-Based Methodologies for Design Optimization of Trusses. *J Struct Engrg*, volumen 123 (número 3), 1997: 350-8.
- Shrestha S.M. y Ghaboussi J. Evolution of Optimum Structural Shapes Using Genetic Algorithm. *J Struct Engrg ASCE*, volumen 124 (número 11), 1998: 1331-8.
- Velázquez-Villegas F. y Santillán-Gutiérrez S.D. Diseño óptimo evolutivo. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen 3 (número 3), 2006: 139-150.
- Yang Y. y Kiong S.C. Automated Optimum Design of Structures Using Genetic Programming. *Computers and Structures*, (número 80), 2002: 1537-1546.

Este artículo se cita:

Citación Chicago

Gutiérrez-Astudillo, Nayar C., Rebeca de R. Peniche-Vera, Gilberto Herrera-Ruiz, Roberto Alvarado-Cárdenas, Francisco J. Carrión-Viramontes. Una solución no simétrica aplicando un algoritmo genético con cruzamiento natural para la optimización estructural de armaduras. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIII, 03 (2012): 325-338.

Citación ISO 690

Gutiérrez-Astudillo N.C., Peniche-Vera R.R., Herrera-Ruiz G., Alvarado-Cárdenas R., Carrión-Viramontes F.J. Una solución no simétrica aplicando un algoritmo genético con cruzamiento natural para la optimización estructural de armaduras. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIII (número 3), julio-septiembre 2012: 325-338.

Semblanza de los autores

Nayar C. Gutiérrez-Astudillo. Ingeniero civil por el Departamento de Ciencias de la Tierra del Instituto Tecnológico de Tepic. Maestro en ciencias de la ingeniería estructural. Actualmente realiza estudios de doctorado en el área de optimización diseño estructural. Desde los estudios de maestría su línea de investigación es el área de diseño evolutivo y computación evolutiva. Otras áreas de su interés incluyen materiales sustentables para la construcción y diseño de estructuras ligeras. Colabora como profesor de tiempo parcial en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Rebeca del R. Peniche-Vera. Licenciada en matemáticas por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y doctora en investigación de operaciones por la Universidad Científica y Médica de Grenoble (Francia). Su investigación se enfoca en modelos de optimización matemática, métodos de programación matemática y heurísticas aplicadas a problemas de ingeniería. Actualmente es coordinadora del doctorado en ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Gilberto Herrera-Ruiz. Ingeniero en sistemas electrónicos por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Maestro en ingeniería eléctrica con especialidad en sistemas electrónicos. Doctor en ingeniería con especialidad en automatización por la Universidad Tecnológica de Budapest e Instituto de Computación y Automatización de la Academia de Ciencias de Hungría. Posdoctorado en automatización industrial y técnicas modernas de manufactura por el Instituto de Ingeniería Mecánica, Tsukuba Japón. Actualmente funge como director de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Roberto Alvarado-Cárdenas. Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), grado de maestro en administración de empresas por el Instituto Tecnológico de Monterrey, otro grado de maestría en arquitectura por la Universidad Autónoma de México (UNAM). Actualmente colabora como profesor de tiempo parcial en la Facultad de Ingeniería de la UAQ y es estudiante del programa doctoral de la misma.

Francisco J. Carrión-Viramontes. Licenciado en física y matemáticas por la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional, maestro en ciencias en ingeniería nuclear por el Massachusetts Institute of Technology y doctor en ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro. Ha trabajado como investigador en el ININ, IIE, y actualmente en el IMT, como jefe de la división de Laboratorios de Desempeño Vehicular. Ha realizado investigación en las áreas de mecánica de la fractura para la predicción de vida de elementos estructurales y la detección y evaluación de daño en puentes carreteros a partir de pruebas de vibración y por propagación de onda.