

**USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE COLUMNAS NO PRISMÁTICAS
SOMETIDAS A CARGA AXIAL**

Carlos Artemio Coello Coello

Francisco Alberto Alonso Farrera

**Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Chiapas
México**

Teléfono : 52+(961) 5-03-22

Fax : 52+(961) 5-05-27

**Dirección : Escuela de Ingeniería Civil
Boulevard Belisario Domínguez km. 1081
Apartado Postal 61
C.P. 29000
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
México**

E-mail : coello@eecs.tulane.edu

USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE COLUMNAS NO PRISMÁTICAS SOMETIDAS A CARGA AXIAL

Carlos Artemio Coello Coello

Francisco Alberto Alonso Farrera

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Chiapas
Boulevard Belisario Domínguez km. 1081
Apartado Postal 61, C.P. 29000
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
coello@rex.cs.tulane.edu

RESUMEN

Este trabajo presenta una forma de aplicar los Algoritmos Genéticos al diseño óptimo de columnas no prismáticas sometidas a carga axial. Para poder usar esta técnica se requirió replantear el problema de diseño de una columna de forma que se convirtiera en uno de optimización en el que se busque obtener el diseño con el volumen mínimo de material. Asimismo, se requirió idear un esquema apropiado de representación del espacio de búsqueda del problema que es continuo en este caso, y no discreto como suele suceder en los problemas típicos a los que se aplica esta técnica. Los resultados obtenidos son muy razonables y confiables, demostrándose así que el algoritmo genético es un instrumento de gran valía en la solución de este complejo problema de diseño, lo que nos podría conducir a considerables ahorros en la producción en masa de este tipo de elemento estructural.

1.INTRODUCCION

El estudio de la optimización de miembros sujetos a compresión ha atraído la atención desde hace bastante tiempo. Leonhard Euler fue el primero en obtener la fórmula para la carga crítica de pandeo de una columna ideal y esbelta [1] y el primero en resolver el problema de la elástica. El problema que abordó fue el de una columna empotrada en la base y libre en el extremo superior. Posteriormente [2] amplió su trabajo sobre columnas, y todavía hoy en día su influencia se deja sentir en prácticamente todos los textos de resistencia de materiales del mundo. En efecto, durante varios años hubieron pocas contribuciones a su trabajo en columnas, hasta que Lamarle [3] hizo notar que la fórmula de Euler debía emplearse sólo para relaciones de esbeltez más allá de cierto límite y que los datos experimentales debían aplicarse sólo en relaciones pequeñas. Más adelante, el ingeniero francés A. Considère [4] realizó una serie de 32 pruebas sobre columnas, estableciendo la teoría del módulo reducido. En el mismo año, y en forma completamente independiente, el ingeniero alemán F. Engesser [5] sugirió la teoría del módulo tangencial. De estas 2 teorías, la primera dominó el panorama hasta 1946, cuando el profesor e ingeniero aeronáutico estadounidense F. R. Shanley señaló las paradojas lógicas de ambas teorías. En una notable divulgación científica de sólo una página [6] no sólo explicó el error de las teorías generalmente aceptadas, sino que también propuso su propia teoría que resolvió las paradojas.

Por su parte, el problema de las columnas no prismáticas (i.e., con sección transversal variable) ha sido abordado más recientemente. A. N. Dinnik [7] discutió el diseño de columnas en las que el momento de inercia de las secciones transversales varía de acuerdo a una potencia de la distancia a lo largo del eje del miembro.

Keller [8] y Tadjbakhsh [9] derivaron las formas geométricas óptimas que resistieran mayores esfuerzos. El problema se planteó de la siguiente forma: "para una columna de longitud y volumen de material conocidos, encontrar la forma geométrica para la cual la carga de pandeo de Euler sea máxima". Los autores antes mencionados establecieron la condición necesaria para un máximo usando técnicas de variación en las ecuaciones diferenciales de equilibrio y sus condiciones de frontera asociadas. Su éxito se basó en el hecho de que la restricción de volumen constante no viola la condición necesaria que ellos establecieron.

El trabajo de Keller ha despertado gran interés en el área. Taylor [10] estudió el mismo problema usando un enfoque energético, y presentó un límite inferior para el máximo eigenvalor. Spillers y Levy [11] extendieron el problema del pandeo de una columna al del diseño óptimo para el pandeo de una placa y más tarde al del pandeo de una cubierta cilíndrica simétrica a lo largo de un eje [12]. Un problema con todos estos trabajos, sin embargo, es que sus respectivos autores sujetaron sus diseños óptimos a sólo una restricción: un volumen constante. En la práctica, sin embargo, las restricciones impuestas por la resistencia del material usado juegan un papel igualmente importante.

Fu y Ren [13] retomaron los trabajos antes mencionados, aunque agregando las restricciones de esfuerzo necesarias, planteando así el problema de minimizar el volumen de una columna sujeta a una cierta carga mediante el ajuste de su forma geométrica. El método que ellos utilizaron para resolver este problema fue el del gradiente reducido generalizado, obteniendo resultados muy favorables.

En este trabajo se aplicó el algoritmo genético simple al problema de minimización planteado por Fu y Ren, surgiendo en el proceso una serie de contratiempos que debieron superarse, tales como el esquema de representación a utilizarse, el ajuste de los parámetros y el tipo de operadores más idóneo. En las siguientes secciones se hablará acerca de estos puntos, y se mostrarán los resultados obtenidos, así como la comparación de los mismos con los producidos mediante el método del gradiente usado por Fu y Ren.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada una columna sujeta a carga axial a lo largo del eje horizontal, la ecuación diferencial que la gobierna es:

$$EIy'' + Py = 0 \quad (1)$$

Asumamos que la columna que estamos estudiando tiene la forma mostrada en la Figura 1, donde además, se ha dividido a la misma en 6 segmentos de igual longitud. De tal suerte, la ecuación (1) puede expresarse en forma de diferencia finita de la siguiente manera:

$$\frac{E}{h^2} \begin{bmatrix} -2I_2 & I_2 & 0 \\ I_3 & -2I_3 & I_3 \\ 0 & 2I_3 & -2I_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

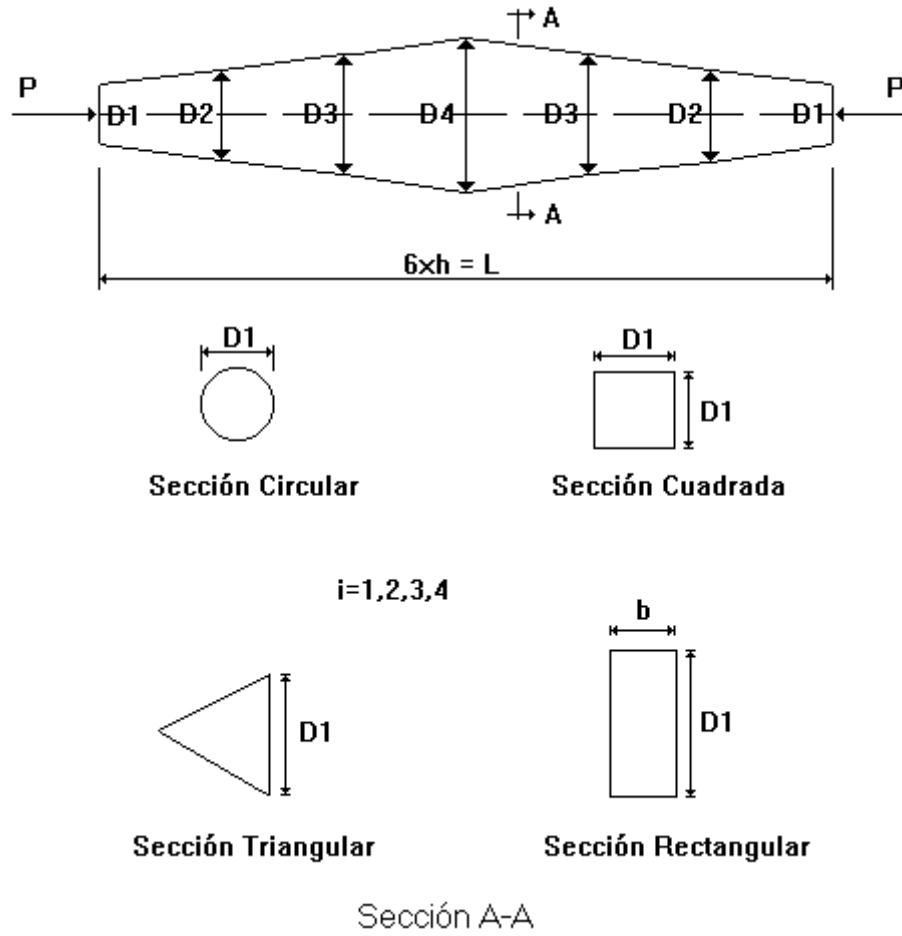


Figura 1 : Columna en estudio, y las posibles secciones que se considerarán.

Para una solución no trivial, el determinante se debe hacer cero, o sea:

$$\begin{vmatrix} \left(-2 + \frac{Ph^2}{EI_2}\right) & 1 & 0 \\ 1 & \left(-2 + \frac{Ph^2}{EI_3}\right) & 1 \\ 0 & 2 & \left(-2 + \frac{Ph^2}{EI_4}\right) \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

o, en forma lineal:

$$\frac{P^3 h^6}{E^3 I_2 I_3 I_4} - 2 \frac{P^2 h^4}{E^2} \left(\frac{1}{I_2 I_3} + \frac{1}{I_3 I_4} + \frac{1}{I_2 I_4} \right) + \frac{P h^2}{E} \left(\frac{2}{I_2} + \frac{4}{I_3} + \frac{3}{I_4} \right) - 2 = 0 \quad (4)$$

donde, para secciones en forma de polígono regular y redondas, los momentos de inercia estarán dados por:

$$I_i = \alpha D_i^4$$

D_i es el diámetro en el caso de las secciones circulares, o la longitud de un lado en las secciones poligonales. La Tabla 1 muestra los valores de α para las secciones usadas más comúnmente.

Sección Circular	Sección Cuadrada	Sección Triangular
$\frac{\pi}{64}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{\sqrt{3}}{96}$

Tabla 1 : Valores de la constante α para las secciones transversales más comunes.

En general, para un polígono regular de n lados, puede derivarse mediante:

$$\alpha = \frac{n}{192} \cot \frac{\pi}{n} \left(3 \cot^2 \frac{\pi}{n} + 1 \right) \quad (5)$$

Para secciones rectangulares donde el ancho b se asume constante a través de la longitud de la columna,

$$I_i = \frac{b D_i^3}{12}, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

En el diseño de una columna, la ecuación (4) representa una restricción de pandeo. Adicionalmente, debe satisfacerse una restricción de resistencia a la compresión, es decir:

$$\frac{P}{A_i} \leq \sigma_y$$

donde A_i es una función de D_i . Puesto que P y σ_y son cantidades dadas, se pueden calcular valores mínimos de D_i o A_i para cada problema. En otras palabras, la restricción de resistencia a la compresión dependerá exclusivamente del valor de A_i o D_i en el problema de optimización.

Con todo lo dicho anteriormente, contamos ahora con los elementos necesarios para plantear el problema de diseño de una columna como un problema de optimización: asumamos que P , h y σ_y son conocidos, y el objetivo es minimizar el volumen de la columna. De tal forma tendremos 2 casos a considerar:

1. Columnas Cuadradas o Circulares.- La función objetivo será:

$$\text{Minimizar } V_c = K(D_1^2 + 2D_2^2 + 2D_3^2 + D_4^2 + D_1D_2 + D_2D_3 + D_3D_4) \quad (6)$$

donde K es una constante, cuyo valor está definido de acuerdo a la Tabla 2, y V_c es el volumen de la columna circular o cuadrada.

Sección Circular	Sección Cuadrada	Sección Triangular
$\frac{\pi l}{36}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1 \sqrt{3}}{36}$

Tabla 2 : Valores de K de acuerdo al tipo de sección transversal de la columna

La función objetivo está sujeta a la restricción descrita en la ecuación (4), y a las siguientes restricciones adicionales:

$$C_i < D_i < C_\mu, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

donde D_i son las variables de diseño; C_i y C_μ son los límites inferior y superior, respectivamente, de las variables de diseño.

2. Columnas rectangulares.- La función objetivo será:

$$\text{Minimizar } V_r = \frac{bl}{9} (D_1 + 2D_2 + 2D_3 + D_4 + \sqrt{D_1D_2} + \sqrt{D_2D_3} + \sqrt{D_3D_4}) \quad (8)$$

donde V_r es el volumen de la columna rectangular.

La función objetivo está sujeta a la restricción descrita en la ecuación (4) y a otra ecuación similar que se deriva del pandeo en la dirección ortogonal, o sea:

$$\frac{P^3 h^6}{E^3 I_2' I_3' I_4'} - 2 \frac{P^2 h^4}{E^2} \left(\frac{1}{I_2' I_3'} + \frac{1}{I_3' I_4'} + \frac{1}{I_2' I_4'} \right) + \frac{Ph^2}{E} \left(\frac{2}{I_2'} + \frac{4}{I_3'} + \frac{3}{I_4'} \right) - 2 = 0 \quad (9)$$

donde

$$I_i = \frac{D_i b^3}{12} \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Además, existe una serie más de restricciones que deben satisfacerse:

$$\left. \begin{array}{l} b \times D_i > A_i \\ C_i < D_i < C_\mu \\ C_i < b < C_\mu \end{array} \right\} i = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

donde $A_i = P / \sigma_y$.

3. USO DEL ALGORITMO GENÉTICO

Para resolver este problema se hizo uso del algoritmo genético simple propuesto por Goldberg [14]. En este caso, sin embargo, se debió analizar la forma de representar el espacio de búsqueda, pues éste es continuo. Observando el mecanismo de solución típico que se utiliza para este tipo de problemas se optó por discretizar el espacio de respuestas haciendo uso del siguiente algoritmo:

diferencia = $L_s - L_i$
Usando *diferencia* determina el número de bits necesarios
Si la cadena decodificada es mayor que *diferencia* entonces hazla igual a diferencia
El valor decodificado será igual a $(L_i + \text{valor decodificado})/1000.0$

L_s y L_i son los límites superior e inferior respectivamente multiplicados por mil (se consideraron sólo 3 decimales de precisión, aunque este valor puede modificarse). Como puede verse en este algoritmo, primero se determina cuál es la cantidad de bits que se requiere para representar la cantidad total de respuestas que tendremos (i.e., mediante un redondeo a un cierto número fijo de decimales discretizamos el espacio de búsqueda). Como este valor difícilmente será una potencia exacta de 2, entonces usamos el valor inmediato superior. La decisión que sigue es necesaria para ajustar las respuestas a los valores que son válidos. La última línea del algoritmo nos permite obtener el verdadero valor de la respuesta, ya que debemos recordar que todos los resultados que obtengamos están desplazados L_i posiciones con respecto al origen, y además dicho valor deberá dividirse entre mil.

Dado que el mismo Goldberg recomienda el uso de Códigos de Gray para los casos en que los números binarios se usan para representar valores reales, nuestra implementación los incorporó, aunque no con muy buenos resultados (se llegaba a la misma respuesta, pero se requerían más generaciones). Esa es la razón por la que optamos no utilizarlos.

La función de aptitud que adoptamos se ilustra con el siguiente algoritmo:

checa1 := error en la ecuación (4)
Si $(P/(A_i^* y)) - 1.0 > 0.0$ entonces $\text{checa2}:=1.0$ sino $\text{checa2}:=0.0$
 $\text{aptitud} := 1.0/(\text{volumen}*(1000.0*(\text{checa1}+\text{checa2})+1.0))$

Como puede verse, si nuestra respuesta viola la restricción impuesta por la ecuación (4), entonces la penalización será la cantidad con que difiere de cero (i.e., el error producido). Por otra parte, si viola la restricción de que $P/A_i^* y$, entonces la penalización es 1.0. En el caso de las columnas rectangulares, la restricción es que $bxD_i > P/y$. En este último caso también debe chequearse la dirección ortogonal, lo que hace que existan 3 valores de penalización en vez de 2. Estos valores se suman y su resultado se multiplica por mil -magnificamos el error- a fin de "castigar" la respuesta obtenida. Observe que si no se comete ninguna violación entonces la función de aptitud es simplemente el recíproco del volumen.

Nuestra implementación usó cruza de 2 puntos, y una técnica de selección mediante torneo binario. Los 4 diámetros se representaron mediante cadenas binarias consecutivas de la misma longitud. El criterio de detención utilizado fue a través de un número máximo de generaciones. El programa se escribió en Turbo Pascal 6.0 y hace uso de la técnica propuesta por Porter [15] para el manejo dinámico de memoria.

Aunque se experimentó con varios parámetros, los valores más comúnmente adoptados fueron: poblaciones de 400 a 500 cromosomas, 80% de probabilidad de cruza, 1% de probabilidad de mutación y 50 a 100 generaciones como máximo.

4. EJEMPLOS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los ejemplos que se muestran a continuación fueron tomados de [13]:

EJEMPLO 1. Seleccione los mejores diámetros en los puntos nodales de una columna de sección circular de acero de 10 pies de longitud que está sujeta a una carga axial de 400 kips. El módulo de elasticidad del material es $E=30 \times 10^6$ psi y el esfuerzo admisible, σ_y es 60,000 psi. Los límites inferior y superior, C_1 y C_2 , respectivamente son 2.914" y 20". El espacio de búsqueda de este problema es $(20000-2914)^4 = 8.52 \times 10^{16}$. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. Nótese cómo en este ejemplo nuestra solución, pese a arrojar un diseño con un volumen un poco mayor que el obtenido por Fu y Ren, proporciona una menor violación de la restricción impuesta por la ecuación (4). Esto es consecuencia de la penalización aplicada en la función de aptitud que ocasiona que el algoritmo genético se mueva hacia una solución que minimice todas las restricciones al mismo tiempo. El número de ciclos requeridos puede ser un tanto engañoso, porque el algoritmo genético algunas veces puede converger en 20 ó 30 generaciones, mientras que en otras puede requerir de casi 50 o hasta más. Sin embargo, si tomamos en cuenta que esta técnica no requiere la evaluación de derivadas ni ninguna de las complicaciones matemáticas del método usado por Fu y Ren, y si consideramos también que converge en un tiempo relativamente corto (alrededor de 3 minutos en una PC AT286 de 12 MHz sin coprocesador matemático), se podrán vislumbrar más claramente sus ventajas.

	Fu y Ren [13]	Algoritmo Genético
Volumen (plg³)	1642.400	1644.010
D1 (plg)	2.914	2.914
D2 (plg)	3.967	3.908
D3 (plg)	4.601	4.614
D4 (plg)	4.771	4.854
Error en la ecuación (4)	2.090×10^{-4}	3.404×10^{-5}
P/A₁	59977.867	59977.867
Ciclos requeridos	19	46

Tabla 3 : Comparación de resultados para el ejemplo 1.

EJEMPLO 2. Seleccione los mejores diámetros en los puntos nodales de una columna de sección cuadrada de acero de 10 pies de longitud que está sujeta a una carga axial de 400 kips. El módulo de elasticidad del material es $E=30 \times 10^6$ psi y el esfuerzo admisible, σ_y es 60,000 psi. Los límites

inferior y superior, C_1 y C , respectivamente son 2.582" y 20". El espacio de búsqueda de este problema es $(20000-2582)^4 \cdot 9.2 \times 10^{16}$. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4. En este caso, nuestra solución es ligeramente mayor que la encontrada por Fu y Ren, pero la solución proporcionada por el algoritmo genético viola la restricción impuesta por la ecuación (4) en menor grado.

	Fu y Ren [13]	Algoritmo Genético
Volumen (plg³)	1608.300	1613.603
D1 (plg)	2.582	2.586
D2 (plg)	3.475	3.522
D3 (plg)	4.031	4.087
D4 (plg)	4.180	4.022
Error en la ecuación (4)	1.78×10^{-4}	1.58×10^{-4}
P/A₁	59999.484	59999.484
Ciclos requeridos	10	33

Tabla 4 : Comparación de resultados para el ejemplo 2.

EJEMPLO 3. Seleccione los mejores diámetros en los puntos nodales de una columna de sección triangular de acero de 10 pies de longitud que está sujeta a una carga axial de 400 kips. El módulo de elasticidad del material es $E=30 \times 10^6$ psi y el esfuerzo admisible, σ_y es 60,000 psi. Los límites inferior y superior, C_1 y C , respectivamente son 3.924" y 20". El espacio de búsqueda de este problema es $(20000-3924)^4 \cdot 6.7 \times 10^{16}$. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5. Puede verse en los resultados cómo el algoritmo genético se comportó en este caso de una forma similar al ejemplo 1, ya que la solución que se encontró, pese a tener un volumen ligeramente mayor que la de Fu y Ren, viola la restricción impuesta por la ecuación (4) en un menor grado. La cantidad de iteraciones requeridas no toman en este caso más de 5 minutos.

	Fu y Ren [13]	Algoritmo Genético
Volumen (plg³)	1507.000	1510.070
D1 (plg)	3.924	3.924
D2 (plg)	5.092	5.220
D3 (plg)	5.910	5.882
D4 (plg)	6.130	5.999
Error en la ecuación (4)	3.26×10^{-4}	1.22×10^{-4}
P/A₁	59993.11	59993.11
Ciclos requeridos	13	39

Tabla 5 : Comparación de resultados para el ejemplo 3.

EJEMPLO 4. Seleccione el mejor ancho y las mejores secciones transversales en los puntos nodales de una columna de sección rectangular de acero de 10 pies de longitud que está sujeta a una carga axial de 400 kips. El módulo de elasticidad del material es $E=30 \times 10^6$ psi y el esfuerzo admisible, σ_y es 60,000 psi. Los límites inferior y superior, C_1 y C , respectivamente son 1.500" y 20". El espacio de búsqueda de este problema es $(20000-1500)^4 \cdot 1.2 \times 10^{17}$. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6. Este ejemplo requirió una población más grande que las

anteriores (500 cromosomas, contra la población de 400 usada en los ejemplos previos), y se dejó correr el algoritmo por 100 generaciones, en vez de las 50 que se usaron en los ejemplos anteriores. Este requerimiento se explica fácilmente si consideramos que las cadenas en este caso son más largas (75 dígitos contra los 60 usados en los ejemplos anteriores) debido a que existe una incógnita más (el ancho b de la columna). Puede verse cómo el resultado en este caso es muy similar al presentado por Fu y Ren, lo que demuestra que esta técnica puede proporcionarnos resultados muy buenos si ajustamos sus parámetros de manera apropiada, y además que dicha respuesta se tornará mejor en la medida en que estemos dispuestos a sacrificar un poco más de tiempo máquina. Observe cómo estrictamente hablando, el resultado de Fu y Ren no es del todo aceptable, porque viola ligeramente la restricción impuesta por la relación entre $bx\mathbf{D}_1$ y P/y , lo cual no sucede en nuestra solución. Pese a que se requieren más cálculos en este caso, el tiempo total de ejecución no rebasó los 15 minutos.

	Fu y Ren [13]	Algoritmo Genético
Volumen (plg³)	1617.952	1618.517
b (plg)	3.903	3.909
D1 (plg)	1.708	1.706
D2 (plg)	3.231	3.288
D3 (plg)	4.127	4.089
D4 (plg)	4.403	4.344
Error en la ecuación (4)	2.90×10^{-4}	6.35×10^{-5}
Error en la ecuación (9)	6.51×10^{-5}	1.29×10^{-4}
P/y	6.667	6.667
$bx\mathbf{D}_1$	6.666	6.669
Ciclos	9	65

Tabla 6 : Comparación de resultados para el ejemplo 4.

5. TRABAJO FUTURO

Nuestra implementación actual, aunque un tanto rudimentaria, funciona de forma adecuada, como ha quedado demostrado en los ejemplos de la sección anterior. Sin embargo, todavía seguimos trabajando en mejorar el programa y se planea realizar una versión en C con una mejor interfaz con el usuario. También se tiene contemplado extender la técnica a otros tipos de estructuras, con el objetivo en mente de realizar un sistema de diseño estructural basado en los algoritmos genéticos, en vez de usar las técnicas iterativas tradicionales.

Por otro lado, tenemos planes de usar la técnica para resolver otros problemas de ingeniería que tienen un grado similar o mayor de dificultad que el planteado en este trabajo. Actualmente estamos trabajando en el uso de los algoritmos genéticos para resolver problemas de balanceo de sistemas de tuberías de conducción de agua potable, en los cuales se plantean sistemas no lineales de alto grado de dificultad, que suelen resolverse mediante métodos aproximados como el de Cross o mediante una reducción del sistema no lineal a uno lineal. De llevarse a feliz término, este proyecto traerá grandes beneficios prácticos a los ingenieros que tienen que efectuar este tipo de cálculos, lo cual, a su vez se traducirá en diseños más económicos y adecuados de sistemas de agua potable para la población.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo ha mostrado cómo los algoritmos genéticos presentan un comportamiento estable aún en los casos en que se intentan solucionar problemas con espacios de búsqueda continuos, siempre y cuando se seleccione un esquema de representación adecuado. A ese respecto, también hemos mostrado que los dígitos binarios pueden utilizarse de manera directa como esquema de representación en problemas en los que existe un límite inferior y uno superior en los valores de las soluciones posibles al problema, asumiendo que nos conformaremos con un redondeo razonablemente pequeño de los decimales.

Puede apreciarse también el excelente comportamiento del algoritmo genético como técnica de búsqueda aún en la presencia de espacios de búsqueda considerablemente grandes y en problemas sometidos a varias restricciones. Es ésta quizás la lección más valiosa que podemos aprender de esta experiencia, pues hemos demostrado que una técnica de búsqueda relativamente simple de implementar y que no requiere de complejos cálculos matemáticos puede resolver en un tiempo razonable problemas de alta complejidad para los que normalmente se requieren intrincados algoritmos matemáticos.

Esperamos ver en el futuro más aplicaciones de los algoritmos genéticos no sólo en problemas de ingeniería civil, sino también a otras áreas del conocimiento, pues sus ventajas son demasiado notables como para que se les ignore. Creemos que estas aplicaciones traerán ahorros importantes a la industria y aliviarán considerablemente el trabajo de un gran número de profesionales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Euler, L., "Methodus inveniendi lineas curvasmaximi minimive proprietate gaudentes. . .", Apéndice I, "De curvis elasticis", Bousquet, Lausanne and Geneva, 1744. (Traducción al inglés: Oldfather, W. A., Ellis, C. A. y Brown, D. M., *Isis*, Vol. 20, 1933, pp . 72-160).
- [2] Euler, L., "Sur la force des colonnes", *Histoire de L'Académie Royal des Sciences et Belles Lettres*, 1757, publicado en las *Memoires* de la Academia, Vol. 13, Berlín, 1759, pp. 252-82.
- [3] Lamarle, A. H. E., "Mémoire sur la flexion du bois", *Annales des Travaux Publiques de Belgique*, parte 1, Vol. 3, 1845, pp. 1-64, y parte 2, Vol. 4, 1846, pp. 1-36.
- [4] Considère, A., "Résistance des Pièces comprimées", *Congrès International des Procédés de de Construction*, París, septiembre 9-14 de 1889, memorias publicadas por Librairie Polytechnique, París, Vol. 3, 1891, p. 371.
- [5] Engesser, F., "Uber die Knickfestigkeit gerader Stäbe", *Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen*, Vol. 35, No. 4, 1889, pp. 455-562.
- [6] Shanley, F. R., "Inelastic column theory", *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 14, No. 5, mayo de 1947, pp. 261-7.
- [7] Dinnik, A. N., "Design of columns of varying cross-section", *Transactions ASME* **54**, 1932.
- [8] Keller, J. B., "The shape of the strongest column", *Arch. Ration. Mech. Anal.* **5**, pp. 275-85, 1960.
- [9] Tadjbakhsh, T. & Keller, J. B., "Strongest column and isoparametric inequalities for eigenvalues", *J. Appl. Math.* **9**, 159-64, 1962.
- [10] Taylor, J. E., "The strongest column: an energy approach", *J. Appl. Mech.*, *ASME* **34**, pp. 486-7, 1962.
- [11] Spillers, W. R. & Levy, R., "Optimal design for plate buckling", *J. Struct. Engng, ASCE* **116**, pp. 850-8, 1990.
- [12] Spillers, W. R. & Levy, R., "Optimal design for axisymmetric cylindrical shell buckling", *J. Engng Mech.*, *ASCE* **115**, pp. 1683-90, 1989.
- [13] Fu, K. C. & Ren, D. "Optimization of Axially Loaded Non-Prismatic Column", *Computers and Structures*, Vol. 43, No. 1, pp- 159-62, 1992.
- [14] Goldberg, David E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Mass. 412 p.

[15] Porter, Kent, "Handling Huge Arrays", *Dr. Dobb's Journal of Software Tools for the Professional Programmer*, Marzo 1988, Volumen 13, Número 3, pp. 60-3.

SOBRE LOS AUTORES

Nombre : Carlos Artemio Coello Coello

Dirección : 1a. Sur Oriente # 687
C.P. 29000
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (México)

7008 Zimple Street
New Orleans, LA. 70118 (U.S.A.)

Teléfono : 52+(961) 2-33-76 (México)

E-mail : coello@rex.cs.tulane.edu

Nacimiento : 10/18/1967
Tonalá, Chiapas (México)

Educación : Marzo de 1991
Lic. en Ingeniería Civil
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Chiapas
México

Diciembre de 1993
Master of Science in Computer Science
Tulane University
New Orleans, LA, U.S.A.

Actualmente en el último año de Doctorado en Ciencias de la Computación
Tulane University
New Orleans, LA, U.S.A.

Reconocimientos : Medalla "Diario de México" por ser uno de los mejores
estudiantes del país en 1990.
Diploma al mejor pasante de la generación 1986-1990.
Diploma del Colegio de Ingenieros Civiles de Chiapas.

Asociaciones : Upsilon Pi Epsilon
Association for Computing Machinery
American Association for the Advancement of Science
The New York Academy of Sciences
Ateneo Nacional de Artes, Letras, Ciencias y Tecnología
IEEE Computer Society

Publicaciones : 5 reportes técnicos y 1 en preparación con la Universidad Autónoma de Chiapas.
1 reporte técnico con la Universidad Tulane.
Columna "*Herramientas para el Ingeniero Civil*" en la revista PAKBAL publicada por la UN.A.CH.
Ponencia "Uso de Algoritmos Genéticos para el Diseño Optimo de Armaduras" en el Congreso Nacional de Informática "*Herramientas Estratégicas para los Mercados Globales*".
Ponencia "Discrete Optimization of Trusses using Genetic Algorithms" en *the Sixth International Conference on Artificial Intelligence and Expert Systems Applications*, "EXPERSYS-94" a celebrarse en Houston, Texas (USA).
Libro de Programación en C en preparación desde 1992.
Libro sobre el Internet en preparación desde 1993.

Experiencia Profesional : Instructor de "Métodos Numéricos" en la UN.A.CH.
Instructor invitado de "Programación Funcional", "Programación C Avanzada", "Inteligencia Artificial", "Gráficos por Computadora" y "Lenguajes de Programación" en la Escuela de Matemáticas y Computación de la Universidad Autónoma de Yucatán y el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
Colaboración en el proyecto "Mapping from graphemes to morphemes in Spanish, using Koskenniemi's two-level model of morphological analysis", todavía en proceso en la Universidad Tulane, en New Orleans, LA (U.S.A.).
Dirección del proyecto "Estudio de las Técnicas existentes de Compresión de Archivos", todavía en proceso con la Escuela de Matemáticas y Computación de la Universidad Autónoma de Yucatán.

Intereses : Robótica
Procesamiento en Lenguaje Natural
Algoritmos Genéticos y Programación Genética
Análisis y Diseño Estructural
Compresión de Archivos
Programación Funcional
Semántica Denotacional
Gráficos por Computadora
Música Clásica
Ciencia Ficción
Películas

Nombre : Francisco Alberto Alonso Farrera

Dirección : Pijijiapan 77, Colonia ISSSTE
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Teléfono : 52+(961) 2-37-08

Nacimiento : 25/05/1968
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Educación : Octubre de 1992
Lic. en Ingeniería Civil
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Chiapas
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Diciembre de 1994
Maestría en Ciencias Computacionales (pasante)
Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana
Veracruz, Veracruz

Experiencia Profesional : Asesor del Departamento de Cómputo del Centro Interamericano de Veracruz, Veracruz.
Ingeniero de Servicios de Datos Compusupport, sucursal Veracruz.
Encargado del Departamento de Precios Unitarios y Control de Obra de la Constructora "NAHA" en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
Profesor de Medio Tiempo en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Chiapas.

Intereses : Algoritmos Genéticos
Análisis Sísmico
Compresión de Archivos
Métodos Numéricos
Diseño Estructural
Deportes