

Optimización estructural por medio del algoritmo genético

(Segunda parte – Aplicaciones a estructuras tipo armaduras)

Por: Giovanni Martínez Martínez

Autor

GIOVANNI MARTÍNEZ MARTÍNEZ

Ingeniero Civil. Especialista en Análisis y Diseño Estructural, Candidato a Magíster en Ingeniería Sismorresistente, Universidad EAFIT, Diplomado en Didáctica y Pedagogía, Docente de tiempo completo y Coordinador del Semillero GRIDIC - Grupo de Investigación de Ingeniería Civil, línea Estructuras y Concretos del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Correo electrónico: gjmartinez@elpoli.edu.co

Resumen

Los algoritmos evolutivos o algoritmos genéticos han sido usados en una gran diversidad de problemas de optimización en diferentes campos de la Ingeniería Civil. En el campo del análisis y el diseño estructural, se encuentran las vigas y columnas de hormigón reforzado, las cerchas planas y espaciales y en programas más complejos y elaborados por la cantidad inmensa de variables a manejar, se encuentran los pórticos planos y espaciales. En la primera parte de este artículo*, se mostró en forma general cómo es el manejo y tratamiento de las herramientas matemáticas de que está compuesto un algoritmo genético, y se utilizó en la optimización de una función matemática simple. En esta segunda parte, se muestra en detalle la optimización del peso de las cerchas, cumpliendo requisitos de desplazamientos nodales y esfuerzos axiales en las barras, y se analizan los resultados arrojados con respecto a los de otros autores.

Palabras claves

Optimización, Genético, selección, cruzamiento, mutación, escalado.

Abstract

The evolutionary algorithms or genetic algorithms have been used in a great diversity of problems of optimization in different fields of the civil engineering. In the field of the analysis and the structural design, they are the beams and columns of reinforced concrete, the plane and space truss and in program more complex and elaborated by the immense quantity of variables to manage, they are the plane and space frames. In the first part of this article, it was shown in general form as it is the handling and treatment of the mathematical tools that it is compound a genetic algorithm, and it was used in the optimization of a simple mathematical function. In this party of the second part, the optimization of the weight of the truss, completing requirements of nodal displacements and axial efforts in the bars, it is shown with detail and the heady results are analyzed with those of other authors

Key words

Optimization, genetic, selection, crossing, mutation, climbed

* Publicado en: *Politécnica*, Medellín: Politécnico Jaime Isaza Cadavid, junio octubre de 2005, Vol. 1 N° 1, p.p. 7 a 22.

Optimización estructural por medio del algoritmo genético

(Segunda parte * – Aplicaciones a estructuras tipo armaduras)

Por: Giovanni Martínez Martínez

POLITÉCNICA No. 2 | Medellín, noviembre - diciembre de 2005, p.p. 119-135



1.1 Función Objetivo

Se aplicará el Algoritmo Genético, a la minimización de estructuras articuladas tipo armaduras. Una parte importante, es la elección de la función objetivo a minimizar (un diseño óptimo es aquel que minimiza la función objetivo).

En las estructuras articuladas, se suponen definidas las condiciones de carga y topología, por lo tanto son sus secciones de barras (comúnmente) los parámetros variables a optimizar. Así, en la mayoría de las veces, el objetivo que se persigue en las estructuras articuladas, es la optimización del peso de las mismas, y por consiguiente la función objetivo a minimizar es:

$$F(\mathbf{x}) = \text{PESO}_{(i)} = \sum_j \rho \times A_j \times L_j$$

donde:

$F(\mathbf{x})$ = función objetivo.

i = índice de la armadura.

j = índice de la barra.

ρ = peso específico del material.

A = área de la sección transversal de la barra.

L = longitud de la barra.

* Primera parte publicada en: *Politécnica*, Medellín: Politécnico Jaime Isaza Cadavid, junio octubre de 2005, Vol. 1 N° 1, p.p. 7 a 22.

Otro objetivo de minimización en las armaduras, podría ser el costo (\$) de la misma.

El sistema más utilizado, consiste en penalizar el peso de la armadura, creando lo que se llama una función de penalización, incrementando el peso en función de las variaciones sobre los valores admisibles de las tensiones y los desplazamientos. En otras palabras, si las restricciones se violan, se penaliza el peso de la armadura.

1.2 Etapas del Proceso

Para el trabajo de optimización que se desarrollará, se procederá a:

1. La creación de una función de penalización del peso de las estructuras que no cumplan con las restricciones impuestas.
2. La creación de una función de mérito que maximice la mejor estructura.
3. La normalización de la función de mérito para mantener el proceso generacional con eficiencia en la búsqueda del óptimo.
4. La creación de un programa que utilizando como datos de entrada una población de cromosomas y su función de mérito cree una población-hijo mediante "parámetros" probabilísticos y procesos aleatorios.

1.3. Coeficiente de violación [C]

Función objetivo penalizada [ϕ]

Se minimiza $f(x)$ sujeto a:

$$g_i(x) \leq 0$$

para $i = 1, 2, 3, \dots, m$ donde m es el número de restricciones

$g_i(x)$ se expresa con base en las siguientes restricciones:

$$\sigma_j \leq \sigma_a \quad \text{para } j = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\mu_i \leq \mu_a \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, k$$

donde:

$$\sigma_j = \text{Tensión en el miembro } j$$

$$\sigma_a = \text{Tensión máxima permitida - restricción}$$

$$\mu_i = \text{Desplazamiento en el nudo } i$$

$$\mu_a = \text{Desplazamiento máximo permitido - restricción}$$

$$n = \text{N}^\circ \text{ de elementos}$$

$$k = \text{N}^\circ \text{ de desplazamientos (X y Y) (grados de libertad de nudos libres)}$$

Las Restricciones son expresadas en forma normalizada así:

$$g_{i(x)} = \frac{\sigma_i}{\sigma_a} - 1 \leq 0 \quad g_{i(x)} = \frac{\mu_i}{\mu_a} - 1 \leq 0$$

El Coeficiente de Violación C , es calculado de la siguiente manera:

Si $g_{i(x)} > 0$ entonces $C_i = g_{i(x)}$

Si $g_{i(x)} \leq 0$ entonces $C_i = 0$

El coeficiente de violación C , en total es:

$$C = \sum_{i=1}^m C_i \quad m = \text{número de restricciones}$$

Por ejemplo, si se tiene una armadura de 10 barras y 6 nudos libres, y cada nudo libre con 2 grados de libertad (en el plano), son 22 restricciones en total a ser evaluadas, y se tendría 22 C_i en total y el valor de C_{TOTAL} de la armadura sería:

$$C = \sum_{i=1}^{22} C_i$$

Ahora, la función objetivo, se modifica o penaliza, incorporando la constante de violación:

$$\phi(x) = f(x) \times (1 + K \times C)$$

$f(x)$ = Peso de la armadura.

$\phi(x)$ = Función objetivo penalizada ó modificada (peso de la armadura penalizada).

C = Constante de violación de la armadura.

K = Constante.

El parámetro K se ha seleccionado después de muchas pruebas y la influencia que las violaciones individuales tienen en las próximas generaciones. En las referencias bibliográficas consultadas y en la de este trabajo [1, 10, 11] se utiliza un valor de $K=10$. Lo mismo que los escritos de Goldberg [2].

Como se aprecia, cuando $C=0$ (no se viola ninguna restricción), la constante de penalización $\phi = f(x)$. Es decir, no se penaliza el peso. A medida que pasan las generaciones, el valor de C irá disminuyendo, se irá optimizando, por lo que las armaduras mas penalizadas ocurren en las primeras generaciones, y al final se consigue minimizar el peso de las estructuras, con la constante de penalización $C = 0$.

1.4. Aptitud [F] del individuo i Nº de Copias del individuo i

Después de calcular el peso de la armadura penalizada [ϕ], se procede a calcular el valor de la Aptitud de cada individuo, de la misma forma que se hizo para las funciones matemáticas (primera parte de este artículo).

Para el caso de optimización de estructuras:

$$\text{APTITUD } i [F_i] = \text{Constante} - \phi_i(\mathbf{x})$$

donde Constante, en lugar de un valor grande cualquiera como en las funciones matemáticas (para evitar valores negativos en la aptitud), se puede reemplazar por :

$$\text{APTITUD } i [F_i] = [\phi(\mathbf{x})_{\max} + \phi(\mathbf{x})_{\min}] - \phi_i(\mathbf{x})$$

donde:

$$F_i = \text{Aptitud del individuo } i$$

$$\text{Constante} = [\phi(\mathbf{x})_{\max} + \phi(\mathbf{x})_{\min}]$$

$$\phi(\mathbf{x})_{\max} = \text{Peso penalizado mayor de la generación}$$

$$\phi(\mathbf{x})_{\min} = \text{Peso penalizado menor de la generación}$$

$$\phi_i(\mathbf{x}) = \text{Peso penalizado del individuo } i$$

Como en el primera parte, después de calculada la Aptitud de cada individuo, se calcula la Aptitud Escalada, y con la Aptitud Escalada, el número de copias:

Donde:

$$\text{No de copias}_{\text{individuo } i} = n \times \frac{F_i}{\sum F_i}$$

Donde:

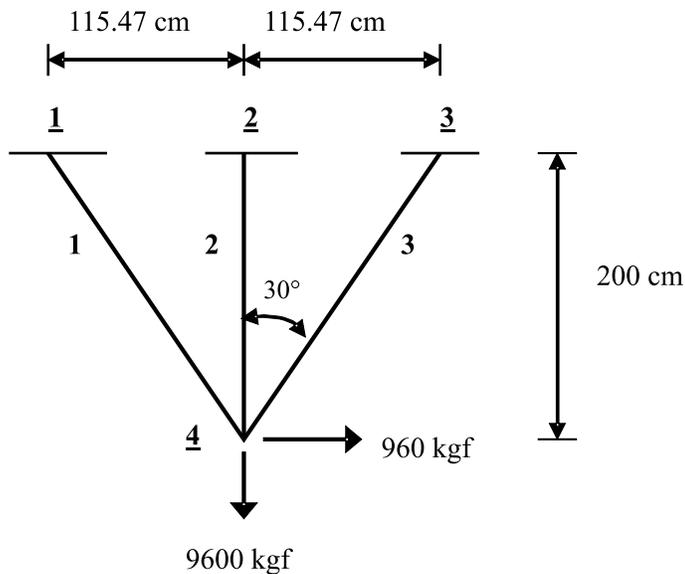
n = # de individuos de la población.

F_i = Aptitud Escalada de la armadura i .

$\sum F_i$ = Sumatoria de las Aptitudes Escaladas en la generación actual de la armadura i

2. Ejercicio de aplicación Nº 1

Este ejercicio, una armadura plana de 3 barras, fue extraída de RAJEEV y KRISHNA-MOORTHY [9], lo mismo que las áreas de las barras utilizadas para el diseño. Se eligió, porque es una armadura pequeña, y se facilita mucho para explicar los pasos a seguir, en el algoritmo genético.



Datos Básicos:

ρ = densidad del material = $7.85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

σ = máxima tensión permitida = $\pm 1442 \text{ kgf/cm}^2$

μ = máximo desplazamiento permitido = $\pm 0.5 \text{ cm}$

E = módulo de elasticidad = 1967840 kgf/cm^2

Archivo de datos de las Áreas (cm²)

Total de áreas = 16 (# 0 - # 15)

| | |
|-----|-----|
| 1.2 | 2.8 |
| 1.4 | 3.0 |
| 1.6 | 3.2 |
| 1.8 | 3.4 |
| 2.0 | 3.6 |
| 2.2 | 3.8 |
| 2.4 | 4.0 |
| 2.6 | 4.4 |

CORRIDA # 1:

| | |
|-------------------------------|----------------|
| NP (# de parámetros) | = 3 |
| LC (Longitud de cadena) | = 4 |
| TPE (Tamaño de la población) | = 10 |
| PM (Probabilidad de mutación) | = 0.5% (0.005) |
| NG (# de Generaciones) | = 10 |
| NDA (# de datos de área) | = 16 (0 -15) |

Aleatoriamente, se arrojaron los siguientes resultados (tabla 1):

| INDIVIDUO | X1 | | | X2 | | | X3 | | |
|-----------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|
| | Dec. | Cadena | Área | Dec. | Cadena | Área | Dec. | Cadena | Área |
| 1 | 3 | 0011 | 1.80 | 7 | 0111 | 2.60 | 6 | 0110 | 2.40 |
| 2 | 15 | 1111 | 4.40 | 4 | 0100 | 2.00 | 9 | 1001 | 3.00 |
| 3 | 10 | 1010 | 3.20 | 14 | 1110 | 4.00 | 8 | 1000 | 2.80 |
| 4 | 8 | 1000 | 2.80 | 10 | 1010 | 3.20 | 10 | 1010 | 3.20 |
| 5 | 2 | 0010 | 1.60 | 14 | 1110 | 4.00 | 10 | 1010 | 3.20 |
| 6 | 5 | 0101 | 2.20 | 3 | 0011 | 1.80 | 14 | 1110 | 4.00 |
| 7 | 0 | 0000 | 1.20 | 5 | 0101 | 2.20 | 12 | 1100 | 3.60 |
| 8 | 7 | 0111 | 2.60 | 15 | 1111 | 4.40 | 9 | 1001 | 3.00 |
| 9 | 8 | 1000 | 2.80 | 15 | 1111 | 4.40 | 5 | 0101 | 2.20 |
| 10 | 1 | 0001 | 1.40 | 9 | 1001 | 3.00 | 8 | 1000 | 2.80 |

Tabla 1. Procesamiento Generación 0

| f(x) kgf | σ_1 kgf/cm ² | σ_2 kgf/cm ² | σ_3 kgf/cm ² | μ_1 cm | μ_2 cm | C | $\phi(x)$ kgf |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------|------------------|
| 11.696 | 2056.48 | 1865.89 | 742.36 | 0.1542 | -0.1896 | 0.720 | 95.918 |
| 16.555 | 1110.56 | 1399.59 | 988.82 | 0.0143 | -0.1422 | 0.000 | 16.555 |
| 17.157 | 1162.97 | 1204.24 | 643.39 | 0.0610 | -0.1224 | 0.000 | 17.157 |
| 15.901 | 1417.30 | 1371.63 | 640.14 | 0.0912 | -0.1394 | 0.000 | 15.901 |
| 14.982 | 1899.61 | 1499.61 | 349.80 | 0.1819 | -0.1524 | 0.357 | 68.510 |
| 14.066 | 2087.78 | 1837.37 | 668.28 | 0.1666 | -0.1867 | 0.722 | 115.624 |
| 12.156 | 2895.86 | 2298.54 | 461.95 | 0.2962 | -0.2336 | 1.605 | 214.505 |
| 17.060 | 1316.79 | 1212.01 | 501.22 | 0.0957 | -0.1232 | 0.000 | 17.060 |
| 15.972 | 1200.27 | 1236.77 | 654.89 | 0.0640 | -0.1257 | 0.000 | 15.972 |
| 12.324 | 2328.94 | 1871.80 | 478.76 | 0.2171 | -0.1902 | 0.913 | 124.859 |

Tabla 2. Cálculos básicos - Generación 0

La **Constante de violación C** se calcula de la siguiente forma. Se observa que en el individuo 1 (tabla 2), no viola ningún desplazamiento, y de las 3 tensiones, 2 de ellas sobrepasan los límites permitidos, σ_1 y σ_2 :

$$g_1(x) = (2056.48 / 1442) - 1 = 0.4261$$

$$g_2(x) = (1865.89 / 1442) - 1 = 0.2939$$

$$C_{\text{INDIVIDUO } 1} = g_1(x) + g_2(x) = 0.4261 + 0.2939 = 0.720$$

Para el individuo 7, se realiza lo mismo:

$$g_1(x) = (2895.86 / 1442) - 1 = 1.0083$$

$$g_2(x) = (2298.54 / 1442) - 1 = 0.5940$$

$$C_{\text{INDIVIDUO } 7} = g_1(x) + g_2(x) = 1.0083 + 0.5940 = 1.605$$

| Individuo | Aptitud (F) | Aptitud promedio Aptitud | Nº de copias |
|-----------|-------------|-----------------------------|--------------|
| 1 | 134.49 | 0.84 | 0 |
| 2 | 213.85 | 1.33 | 2 |
| 3 | 213.25 | 1.33 | 2 |
| 4 | 214.51 | 1.34 | 2 |
| 5 | 161.90 | 1.01 | 0 |
| 6 | 114.78 | 0.72 | 0 |
| 7 | 15.90 | 0.10 | 0 |
| 8 | 213.35 | 1.33 | 2 |
| 9 | 214.43 | 1.34 | 2 |
| 10 | 105.55 | 0.66 | 0 |

Tabla 3. Aptitud y Nº de Copias - Generación 0

Los individuos 2, 3, 4, 8 y 9 van a ser padres 2 veces, y van a participar del apareamiento, para generar nuevos hijos.

| | | |
|-----------------------|----------|--|
| Σ Nº de copias | = 10 | Mejor Individuo generación 0 Armadura # 4 |
| Promedio Aptitud | = 160.20 | |
| Aptitud Mayor | = 214.51 | |
| Aptitud Menor | = 15.9 | |
| Promedio C | = 0.345 | |
| | | Aptitud = 214.51 |
| | | Peso = 15.901 kgf |
| | | Constante C = 0.00 |

Tabla 4. Resumen generación 0

| PARÁMETRO N° 1 | | | | |
|-----------------------|----------------|---------------------|--------|------|
| Padres | Punto de corte | Cadenas resultantes | Número | Área |
| 9 2 | 2 | 1011 | 11 | 3.40 |
| 9 2 | 2 | 1100 | 12 | 3.60 |
| 9 4 | 2 | 1000 | 8 | 2.80 |
| 9 4 | 2 | 1000 | 8 | 2.80 |
| 8 4 | 2 | 0100 | 4 | 2.00 |
| 8 4 | 2 | 1011 | 11 | 3.40 |
| 2 8 | 1 | 1111 | 15 | 4.40 |
| 2 8 | 1 | 0111 | 7 | 2.60 |
| 3 3 | 3 | 1010 | 10 | 3.20 |
| 3 3 | 3 | 1010 | 10 | 3.20 |
| PARÁMETRO N° 2 | | | | |
| Padres | Punto de corte | Cadenas resultantes | Número | Área |
| 3 2 | 4 | 0100 | 4 | 2.00 |
| 3 2 | 4 | 1110 | 14 | 4.00 |
| 3 9 | 3 | 1111 | 15 | 4.40 |
| 3 9 | 3 | 1110 | 14 | 4.00 |
| 9 2 | 4 | 0100 | 4 | 2.00 |
| 9 2 | 4 | 1111 | 15 | 4.40 |
| 8 4 | 3 | 1010 | 10 | 3.20 |
| 8 4 | 3 | 1111 | 15 | 4.40 |
| 4 8 | 4 | 1111 | 15 | 4.40 |
| 4 8 | 4 | 1010 | 10 | 3.20 |
| PARÁMETRO N° 3 | | | | |
| Padres | Punto de corte | Cadenas resultantes | Número | Área |
| 4 8 | 3 | 1001 | 9 | 3.00 |
| 4 8 | 3 | 1010 | 10 | 3.20 |
| 4 3 | 3 | 1000 | 8 | 2.80 |
| 4 3 | 3 | 1010 | 10 | 3.20 |
| 9 2 | 2 | 0101 | 5 | 2.20 |
| 9 2 | 2 | 1001 | 9 | 3.00 |
| 9 2 | 1 | 0101 | 5 | 2.20 |
| 9 2 | 1 | 1001 | 9 | 3.00 |
| 8 3 | 4 | 1000 | 8 | 2.80 |
| 8 3 | 4 | 1001 | 9 | 3.00 |

Tabla 5. Resultados Apareamiento Generación 0

Los nuevos números generados para la Generación 1 son:

| X1 | X2 | X3 |
|-----------|-----------|-----------|
| 11 | 4 | 9 |
| 12 | 14 | 10 |
| 8 | 15 | 8 |
| 8 | 14 | 10 |
| 4 | 4 | 5 |
| 11 | 15 | 9 |
| 15 | 10 | 5 |
| 7 | 15 | 9 |
| 10 | 15 | 8 |
| 10 | 10 | 9 |

Tabla 6 Número generados próxima generación # 1

A partir de aquí comienza nuevamente el proceso de evaluación de los sobrevivientes para la próxima generación, empezando por la evaluación de la Aptitud, apareamiento, cruce y mutación.

En la generación 5 (Tabla 7), se aprecia cómo la constante de penalización es prácticamente nula y empieza a aparecer la mejor estructura. En la generación 10 (Tabla 8), el proceso de optimización ha convergido totalmente hacia un valor óptimo de 14.814 kgf.

| f(x) kgf | σ1 kgf/cm² | σ2 kgf/cm² | σ3 kgf/cm² | μ1 cm | μ2 cm | C | ϕ(x) kgf |
|---------------------|--|--|--|---------------------------------|---------------------------------|----------|-------------------------------------|
| 16.626 | 1278.67 | 1304.89 | 678.67 | 0.0704 | -0.1326 | 0.000 | 16.626 |
| 14.088 | 1353.30 | 1468.63 | 849.65 | 0.0591 | -0.1493 | 0.018 | 16.690 |
| 17.157 | 1038.29 | 1197.15 | 757.44 | 0.0330 | -0.1217 | 0.000 | 17.157 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 15.539 | 1106.66 | 1363.22 | 938.17 | 0.0198 | -0.1386 | 0.000 | 15.539 |
| 16.989 | 1155.50 | 1268.06 | 746.60 | 0.0480 | -0.1289 | 0.000 | 16.989 |
| 17.303 | 1132.90 | 1234.92 | 719.48 | 0.0485 | -0.1255 | 0.000 | 17.303 |
| 18.608 | 1080.72 | 1131.02 | 615.81 | 0.0546 | -0.1150 | 0.000 | 18.608 |
| 18.148 | 1132.30 | 1133.39 | 567.79 | 0.0662 | -0.1152 | 0.000 | 18.148 |
| 15.539 | 1407.16 | 1387.00 | 673.35 | 0.0861 | -0.1410 | 0.000 | 15.539 |

Tabla 7. Cálculos Básicos - Generación 5

| f(x) kgf | σ_1 kgf/cm² | σ_2 kgf/cm² | σ_3 kgf/cm² | μ_1 cm | μ_2 cm | C | $\phi(x)$ kgf |
|---------------------|---|---|---|----------------------------------|----------------------------------|----------|-------------------------------------|
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |
| 14.814 | 1217.62 | 1410.64 | 898.35 | 0.0375 | -0.1434 | 0.000 | 14.814 |

Tabla 8. Cálculos Básicos - Generación 10

En la tabla 9, se hace un resumen, como la constante de penalización C, converge hacia un valor de 0, lo mismo que el peso hacia un valor óptimo de 14.814 kgf. Ver también figuras 1 y 2.

| Generación | Constante C promedio | Peso mejor individuo (kgf) |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 0 | 0.438 | 16.26 |
| 1 | 0.093 | 15.90 |
| 2 | 0.048 | 15.54 |
| 3 | 0.000 | 15.90 |
| 4 | 0.014 | 14.81 |
| 5 | 0.002 | 14.81 |
| 6 | 0.006 | 14.81 |
| 7 | 0.004 | 14.81 |
| 8 | 0.034 | 14.81 |
| 9 | 0.002 | 14.81 |
| 10 | 0.000 | 14.81 |
| 11 | 0.000 | 14.81 |
| 12 | 0.000 | 14.81 |
| 13 | 0.000 | 14.81 |
| 14 | 0.000 | 14.81 |
| 15 | 0.000 | 14.81 |

Tabla 9. Resumen primeras generaciones

La mejor armadura, la de menor peso, de acuerdo con las restricciones impuestas y para esta corrida es:

$$\begin{aligned} \text{Peso} &= 14.814 \text{ kgf} & C &= 0 \\ A_1 &= 3.2 \text{ cm}^2 & A_2 &= 3.2 \text{ cm}^2 & A_3 &= 2.0 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

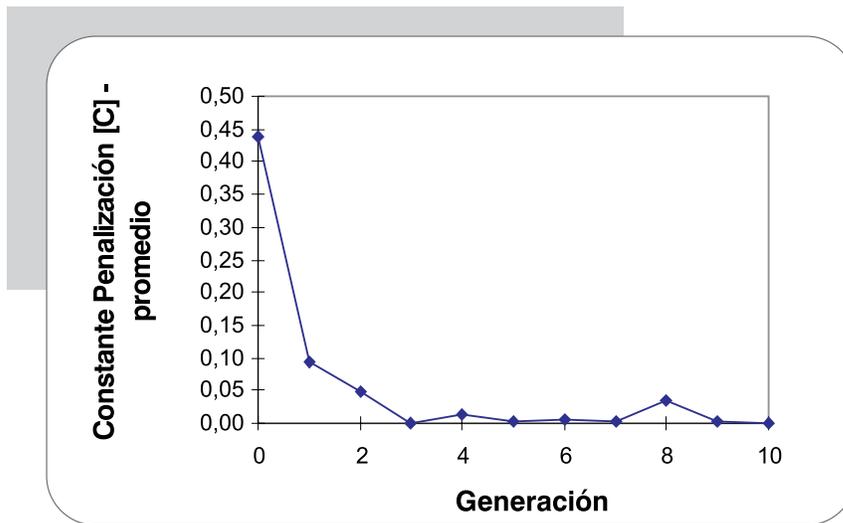


Figura 1. Generación vs Promedio Constante de Penalización

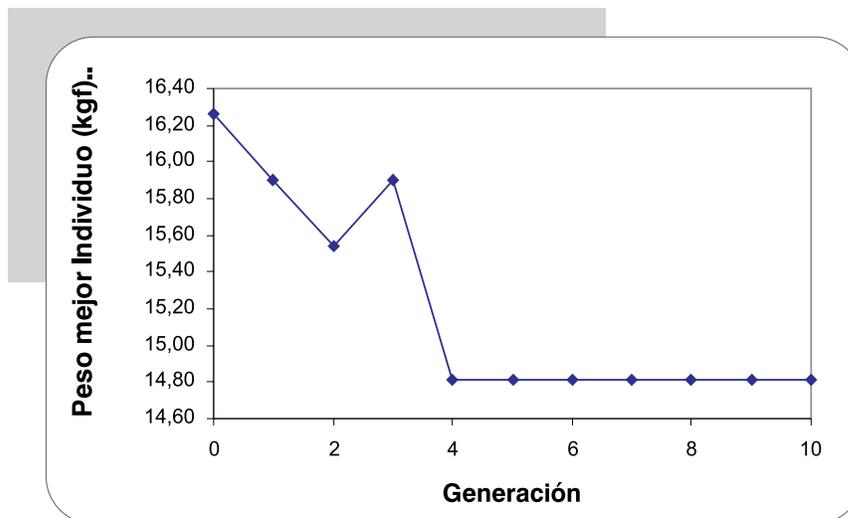


Figura 2. Generación vs Peso mejor individuo

En una segunda corrida, se logra una mejor estructura de menor peso 13.532 kgf, y cumpliendo todas las restricciones impuestas. En la tabla 10 se muestra un resumen.

| Elemento | Fuerza Axial (kgf) | Tensión (kgf/cm ²) | Área (cm ²) |
|----------|--------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 1 | 3200.01 | 1230.77 | 2.6 |
| 2 | 5720.18 | 1430.05 | 4.0 |
| 3 | 1280.01 | 914.29 | 1.4 |

| f(x) kgf | μ_1 cm | μ_2 cm | C | $\phi(x)$ kgf |
|-------------|---------------|---------------|-------|------------------|
| 13.532 | 0.0371 | -0.1453 | 0.000 | 13.532 |

Tabla 10. Resumen resultados segunda corrida

En una tercera corrida, se logró un peso aún menor de 13.07 kgf, y cumpliendo todas las restricciones impuestas de tensiones y desplazamientos. Las áreas definitivas fueron:

$$\begin{aligned} A_1 &= 2.2 \text{ cm}^2 \\ A_2 &= 4.4 \text{ cm}^2 \\ A_3 &= 1.2 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

A partir de aquí, no se logra una mejor estructura, siendo la de 13.07 kgf, la óptima obtenida.

Aún siendo un ejercicio pequeño, en comparación con otros problemas de optimización, se alcanza a apreciar el poderío del algoritmo genético, y como en un lapso de tiempo muy corto (≈ 15 segundos), se logra un peso óptimo de la estructura, sin muchos datos de entrada y sin muchos análisis con anterioridad a la corrida del programa. El verdadero potencial del algoritmo genético, se puede comprobar aún más, en ejercicios mucho más grandes donde se requiere de muchas generaciones y donde se utiliza una gran cantidad de restricciones y parámetros.

En el siguiente ejercicio, se podrá apreciar el alcance extraordinario del algoritmo y de lo que es capaz el mismo, en un tiempo prácticamente menor que el utilizado por otros procedimientos.

3. Ejercicio de aplicación N° 2

Este ejercicio fue extraído de S. Rajeev y S. Krishnamoorthy [9], lo mismo que las áreas utilizadas para este ejercicio. Esta misma armadura se encontró (pero con distintas áreas) en Miguel Galante [1] y P. Hajela y C. Y. Lin [11].

Datos básicos:

ρ = densidad del material = $0.1 \text{ Lb/pul}^3 = 2770 \text{ Kg/m}^3$

σ = máxima tensión permitida = $\pm 25 \text{ KSI} = \pm 25000 \text{ PSI}$

μ = máximo desplazamiento permitido = $\pm 2 \text{ Pulgadas}$

E = módulo de elasticidad = 10000 KSI

NP = 10

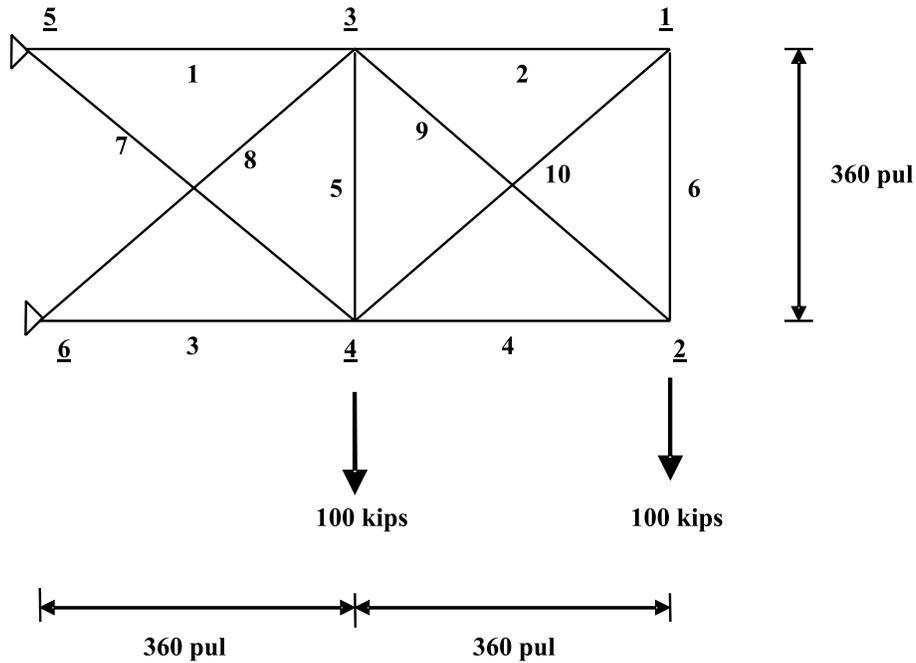
PM = 0.5% (0.005)

LC = 6

NG = 40

TPE = 30

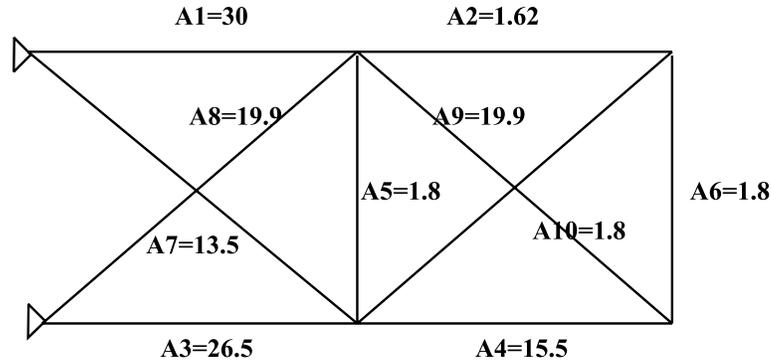
NDA = 42



Archivo de datos de las Áreas (pul²) Total de áreas = 42 (# 0 - # 41)

| | | | | | |
|------|------|------|-------|-------|-------|
| 1.62 | 2.93 | 3.87 | 5.12 | 15.50 | 30.00 |
| 1.80 | 3.09 | 3.88 | 5.74 | 16.00 | 33.50 |
| 1.99 | 3.13 | 4.18 | 7.22 | 16.90 | |
| 2.13 | 3.38 | 4.22 | 7.97 | 18.80 | |
| 2.38 | 3.47 | 4.49 | 11.50 | 19.90 | |
| 2.62 | 3.55 | 4.59 | 13.50 | 22.00 | |
| 2.63 | 3.63 | 4.80 | 13.90 | 22.90 | |
| 2.88 | 3.84 | 4.97 | 14.20 | 26.50 | |

Después de 3 intentos, se obtiene la estructura óptima, arrojando los siguientes resultados:



PESO = 5585 Libras

DESPLAZAMIENTOS

| NUDO | X (pul) | Y (pul) |
|------|---------|---------|
| 1 | 0.359 | -1.897 |
| 2 | -0.485 | -1.999 |
| 3 | 0.246 | -0.782 |
| 4 | -0.265 | -0.982 |
| 5 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 0.00 | 0.00 |

| MIEMBRO | FUERZA (Lbs) | TENSIÓN (Lbs/pul ²) | ÁREA (pul ²) |
|---------|--------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1 | 204.88 | 6.83 | 30.00 |
| 2 | 5.12 | 3.16 | 1.62 |
| 3 | -195.12 | -7.36 | 26.50 |
| 4 | -94.88 | -6.12 | 15.50 |
| 5 | 10.00 | 5.56 | 1.80 |
| 6 | 5.12 | 2.84 | 1.80 |
| 7 | 134.52 | 9.96 | 13.50 |
| 8 | -148.32 | -7.45 | 19.90 |
| 9 | 134.18 | 6.74 | 19.90 |
| 10 | -7.24 | -4.02 | 1.80 |

Dentro de las tres corridas, la que logró un menor peso, fue la segunda, alcanzando un valor óptimo de 5585.15 libras, y que mejora el alcanzado por RAJEEV y KRISHNAMORTY [9], que logró un valor mínimo de 5613.84 libras, y que a su vez éste, mejoraba el alcanzado por otros autores, utilizando otros métodos matemáticos.

En el artículo de RAJEEV [9], las áreas se repartieron así:

$$A_1 = 33.5 \quad A_2 = 1.62 \quad A_3 = 22.0 \quad A_4 = 15.5 \quad A_5 = 1.62$$

$$A_6 = 1.62 \quad A_7 = 14.2 \quad A_8 = 19.9 \quad A_9 = 19.9 \quad A_{10} = 2.62 \quad \text{PESO} = 5613.84 \text{ Lbs}$$

En el presente trabajo, las áreas se repartieron así:

$A_1=30.0$ $A_2=1.62$ $A_3=26.5$ $A_4=15.5$ $A_5=1.80$

$A_6=1.80$ $A_7=13.5$ $A_8=19.9$ $A_9=19.9$ $A_{10}=1.80$

PESO = 5585.15 Lbs

4. Conclusiones

Los algoritmos genéticos abren un abanico infinito de posibilidades en el campo de la optimización estructural en todos sus campos. La interfaz sencilla de entrada de datos y las pocas herramientas matemáticas que se necesitan para su implementación, hacen de los algoritmos genéticos o evolutivos, una técnica numérica de gran expectativa y de mucho alcance.

Bibliografía

1. GALANTE, Miguel, *Un Algoritmo Genético Simple para la Optimización de Estructuras Planas Articuladas*, Revista Internacional de Métodos numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, Vol. 9 , N° 2, Diciembre 1992, pp 179-199
2. GOLDBERG, David E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing, Massachusetts, EEUU, 412 páginas, 1989
3. GRIERSON, D.E., PAK, W.H., *Optimal sizing, geometrical and Topological Design using a Genetic Algorithm*, Structural Optimization, N° 6, 1993, pp 151-159
4. HOLLAND, John H., *Algoritmos Genéticos*, Revista Investigación y Ciencia, España, Septiembre 1992, pp. 38-45
5. JENKINS, W.M., *Towards Structural Optimization Via the Genetic Algorithm*, Computers & Structures, Vol. 40, N° 5, 1991, pp 1321-1327
6. JENKINS, W.M., *Improving Structural design by Genetic search*, Computer-Aided Civil Engineering, Vol. 13, 1998, pp 5-11
7. KOUMOUSIS, Vlas K., GEORGIOU, Panos, *Genetic Algorithm in Discrete Optimization of Steel Truss Roofs*, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 8, N° 3, Julio 1994, pp 309-325
8. PELAEZ A., Alejandro, *Ingeniería de Software Introducción a los Algoritmos Genéticos*, Revista Silicio, N° 5, Año 4, pp. 21-29
9. RAJEEV, S., KRISHNAMOORTY, C. S., *Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithm*, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, N° 5, Mayo 1992, pp 1233-1249
10. RAJEEV, S., KRISHNAMOORTY, C. S., *Genetic Algorithm-based Methodology for design optimization of reinforced concrete frames*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 1998
11. HAJELA, P., LIN, C.Y., *Genetic search strategies in multicriterion optimal desing*, Structural Optimization, N° 4, 1992, pp 99-107