

OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS PARA PUENTES MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS CON EL PROGRAMA PUENFLEX VER. 2.0

Ladislao R. Ticona Melo^a, Ricardo Oliveira^b, Raul Echegaray^c y Túlio N. Bittencourt^d

^aEst. de maestría del Curso de Ingeniería Civil, Universidad de São Paulo – Brasil.

^bEst. de doctorado del Curso de Ingeniería Civil, Universidad de São Paulo – Brasil.

^cProfesor de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional del Altiplano – Perú.

^dProfesor Libre Docente del Curso de Ingeniería Civil, Universidad de São Paulo – Brasil.

Palabras Clave: Algoritmos Genéticos, Estructuras Metálica, Método de Rigideces.

Abstract. El cálculo y dimensionamiento de un proyecto estructural es un proceso iterativo y lleva implícito la búsqueda de una solución óptima, es decir, una solución que cumple las diversas condiciones de funcionalidad y seguridad a un costo mínimo. Los algoritmos genéticos (AGs) son métodos adaptivos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basados en la reproducción y el principio de supervivencia del más apto. Así, en los últimos años los conceptos de AGs se han estado estudiando y usando en diversas áreas de la ingeniería de manera satisfactoria. Para el presente trabajo, fue implementado un aplicativo con programación orientado a objetos C++ Builder denominado PUENFLEX, el mismo que se caracteriza por realizar cálculo de estructuras planas por el método de las rigideces y la posterior optimización de la misma. Además, fue desarrollado un ejemplo de optimización de una estructura metálica de un puente, sometido a una carga estática. El objetivo de los algoritmos genéticos es determinar las dimensiones de los elementos estructurales del puente, para obtener una estructura de bajo peso, que cumpla con los requerimientos de resistencia y cumpla las deflexiones máximas permitidas por las normas de diseño de puentes. El software desarrollado puede ser recomendado como una alternativa educacional para el estudio de cursos de optimización y análisis estructural, ya que presenta una interface grafica amigable.

1 INTRODUCCIÓN

Optimizar es mejorar lo que ya existe y proyectar el nuevo con más eficiencia y menor costo. Esta búsqueda debe cumplir una característica muy importante para cualquier método de optimización que es: el equilibrio entre la eficiencia y eficacia para garantizar no sólo la solución correcta del problema, sino también la generalidad del proceso. La optimización tiene como objetivo determinar la mejor configuración de diseño sin probar todas las posibilidades de participar.

Fue en este último siglo que se intensificó el desarrollo de métodos de optimización con el advenimiento de las computadoras y su rápida evolución. Desde entonces fueron elaborados diversos procedimientos matemáticos y numéricos de optimización. La selección de uno u otro método de búsqueda deben estar estrictamente relacionados con el problema a ser minimizado.

Durante los últimos 30 años han surgido, diversas tecnologías relacionadas a los algoritmos evolutivos: los algoritmos genéticos (AG), desarrollado principalmente en los Estados Unidos por Holland, estrategias evolutivas, desarrollado en Alemania por Rechenberg y Schwefel y programación evolutiva. Cada uno representa un enfoque diferente. Sin embargo, todos se inspiran en los mismos principios de la evolución natural.

Así también, para la solución de problemas en ingeniería estructural existen diversas tecnologías, para lo cual es importante conocer la potencialidad que pueden ofrecer los AG, ya que en muchos casos los métodos tradicionales podrían resultar muy complicados mientras que los AGs podrían facilitar sustancialmente la solución de estos problemas. Con este motivo, se presenta un problema práctico que aunque podría haberse solucionado por la forma tradicional, es resuelto con AG. De esta manera como ya se indicó anteriormente, se busca ampliar la disponibilidad de herramientas para la solución de problemas, no con el fin de sustituir los métodos tradicionales, sino con el objeto de dar a conocer nuevas alternativas. El caso específico de la optimización de soluciones por medio de los AG es muy importante, pues han demostrado una gran versatilidad y robustez en muy diversos campos de aplicación, no siendo la excepción la ingeniería y en este caso la estructural.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un procedimiento para la optimización de estructuras planas (caso de una estructura de un puente tipo Warren) sometidas a cargas estáticas, en el que serán aplicados los algoritmos genéticos AG para la optimización de secciones y el método de las rigideces para el cálculo de la estructura. Además del problema de optimización de área de los elementos, se pretende abordar, el problema a la optimización de forma e topología, llevando en cuenta las cargas aplicadas. La implementación de los algoritmos genéticos fue hecha dentro del programa PUENFLEX Ver 2.00.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA A RESOLVER.

A continuación se presenta la estructura reticular de un puente, consistente en una cercha tipo Warren de múltiples elementos como lo muestra la Figura 2. La configuración geométrica del puente y las dimensiones de las secciones a usar para las barras serán determinadas a través del algoritmo genético implementado en el programa PUENFLEX.

Los datos iniciales a ingresar para comenzar con el proceso de optimización de la estructura reticulada se muestran en la figura 1.

Figura 1: Ventana de ingreso de datos iniciales para los Algoritmos Genéticos.

2.1 OBTENCION DE LOS PARAMETROS Y LA FUNCION OBJETIVO A OPTIMIZAR

Para determinar los esfuerzos y las deflexiones de la estructura en estudio se usará el método de las rigideces. Este método consiste en asignar a la estructura de barras un objeto matemático, llamado matriz de rigidez, relaciona los desplazamientos de un conjunto de puntos de la estructura, llamados nodos, con las fuerzas exteriores que es necesario aplicar para lograr esos desplazamientos (las componentes de esta matriz son fuerzas generalizadas asociadas a desplazamientos generalizados). La matriz de rigidez relaciona las fuerzas nodales equivalentes y desplazamientos sobre los nodos de la estructura, mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{Bmatrix} F_1 + R_1 \\ F_2 + R_2 \\ \dots \\ F_n + R_n \end{Bmatrix}_G = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}_G \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_n \end{Bmatrix}_G \quad (1)$$

Donde:

F_i = Fuerzas nodales equivalentes asociadas a las fuerzas exteriores aplicadas sobre la estructura.

R_i = Reacciones hiperestáticas inicialmente desconocidas sobre la estructura.

δ_i = Desplazamientos nodales incógnita de la estructura.

n = Número de grados de libertad de la estructura.

Matrices de rigidez elementales [K]

Para construir la matriz de rigidez de la estructura es necesario asignar previamente a cada barra individual (elemento) una matriz de rigidez elemental. Esta matriz depende exclusivamente de:

- 1) Las condiciones de enlace en sus dos extremos (barra bi-empotrada, barra empotrada-articulada, barra biarticulada).
- 2) Las características de la sección transversal de la barra: área, momentos de área (momentos de inercia de la sección) y las características geométricas generales como la longitud de la barra, curvatura, etc.
- 3) El número de grados de libertad por nodo, que depende de si se trata de problemas bidimensionales (planos) o tridimensionales.

La matriz elemental relaciona las fuerzas nodales equivalentes a las fuerzas aplicadas sobre la barra con los desplazamientos y giros sufridos por los extremos de la barra (lo cual a su vez determina la deformada de la barra).

Para barras unidas rígidamente en sus dos extremos la matriz de rigidez elemental que representa adecuadamente su comportamiento viene dada por:

$$[K^{(e)}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

$L, A, I,$ = Magnitudes geométricas (longitud, área y momento de inercia).

E = Constante de elasticidad longitudinal (módulo de Young).

Parámetros de estudio

Para modelar adecuadamente el comportamiento de la estructura así como calcular los esfuerzos actuantes en cada barra, es necesario determinar los parámetros a ser evaluados:

Geometría de la estructura.-

Para determinar el número de nudos y la cantidad de barras de la estructura, serán necesarios tres parámetros, de los cuales dos son variables – en función a selección aleatoria del algoritmo genético dentro del campo de búsqueda – y una fija. Tal como se muestra en la figura 2. Los parámetros a considerar se describen a continuación:

- H = Altura general de toda la estructura (Variable).
 S = Longitud de las barras inferiores (Variable).
 L = Longitud de la luz del puente (Fija).

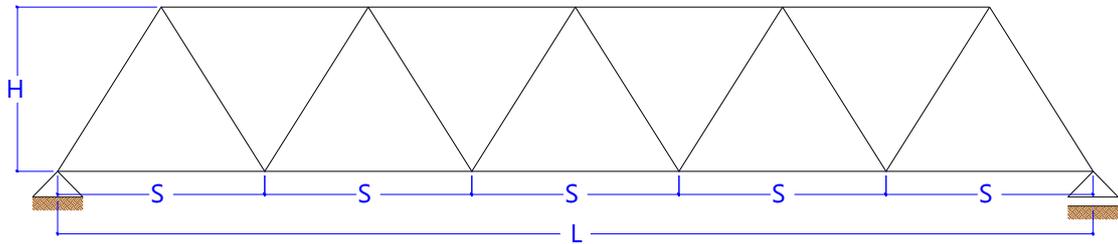


Figura 2: Configuración geométrica de la estructura en estudio.

El número de nudos y la cantidad de barras se determina con las siguientes expresiones y fueron implementadas en el programa para su cálculo automático.

$$NroNudos = 2 \frac{L}{S} + 1$$

$$NroBarras = 2 * NroNudos - 3$$

Geometría de las secciones.-

Se considerara una sección tipo I a ser asignada a cada uno de los elementos de la estructura. Todos los parámetros de la sección mostrados en la figura 3 son variables.

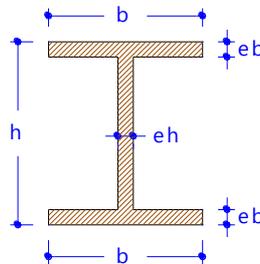


Figura 3: Característica geométrica de las secciones.

Donde:

h = Altura de la viga.

e_h = Espesura del alma de la viga.

b = Ancho del patín superior e inferior.

e_b = Espesura de los patines.

Función objetivo

Nuestra función objetivo está definida básicamente por la siguiente expresión:

$$f = \sum_1^n \gamma_{acero} AL \quad (3)$$

Donde:

f = Función objetivo (Peso total de la estructura).

γ_{acero} = Peso específico del acero.

A = Sección transversal de los elementos.

L = Longitud de cada barra.

n = Número de barras que la estructura.

Y dependerá de los siguientes parámetros:

$$f = F(S, H, h, e_h, b, e_b) \quad (4)$$

Espacio de búsqueda

Los espacios de búsqueda para los parámetros establecidos en la fórmula 4, serán determinados de acuerdo a los datos inicialmente ingresados (figura 1), indicándose los límites superior, inferior y los intervalos a los cuales se hará la búsqueda.

Restricciones y Penalizaciones

La aplicación de restricciones y penalizaciones es importante y crucial en problemas de optimización e influye en la calidad de los resultados. Para este trabajo se considero las siguientes penalizaciones: Esfuerzos máximos resistentes en las barras y desplazamiento vertical de nudos en la parte más crítica de la estructura.

$$\begin{aligned} \sigma_i &\leq \sigma_{\max} \\ u_{vi} &\leq u_{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde:

σ_i = Esfuerzo actuante en la barra i .

u_{vi} = desplazamiento en un nudo i .

Si al evaluar una estructura las restricciones establecidas no cumplen, se aplica una penalización. Esta penalización consiste en incrementar el peso en función de las variaciones de los valores admisibles:

$$\text{peso_penalizado} = \sum_j p_j A_j L_j + \alpha [\Delta\sigma_j]^2 + \beta [\Delta u_j]^2 \quad (6)$$

Donde:

$\Delta\sigma$ = incremento de la tensión sobre los valores admisibles.

$\Delta\mu$ = incremento sobre los valores admisibles del desplazamiento.

Los parámetros α e β son elegidos de forma que pueda establecer una relación entre un incremento de tensión o desplazamiento sobre los valores admisibles y el peso del cromosoma.

3 METODOLOGIA PARA LA APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS GENETICOS

A continuación se describe algunos conceptos básicos, datos y parámetros requeridos para la solución del problema, así como una breve descripción sobre el funcionamiento del software desarrollado.

3.1 ALGORITMOS GENETICOS

Un algoritmo es una serie de pasos organizados que describe el proceso que se debe seguir, para dar solución a un problema específico. En los años 1970, de la mano de John Henry Holland, surgió una de las líneas más prometedoras de la inteligencia artificial, la de los algoritmos genéticos. Son llamados así porque se inspiran en la evolución biológica y su base genético-molecular. Estos algoritmos hacen evolucionar una población de individuos someténdola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), así como también a una Selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuáles los menos aptos, que son descartados.

Un algoritmo genético es un método de búsqueda dirigida basada en probabilidad. Bajo una condición muy débil (que el algoritmo mantenga elitismo, es decir, guarde siempre al mejor elemento de la población sin hacerle ningún cambio) se puede demostrar que el algoritmo converge en probabilidad al óptimo. En otras palabras, al aumentar el número de iteraciones, la probabilidad de tener el óptimo en la población tiende a 1 (uno).

FUNCIONAMIENTO DE UN ALGORITMO GENETICO BASICO

Un algoritmo genético puede presentar diversas variaciones, dependiendo de cómo se aplican los operadores genéticos (cruzamiento, mutación), de cómo se realiza la selección y de cómo se decide el reemplazo de los individuos para formar la nueva población. En general, el pseudocódigo consiste de los siguientes pasos:

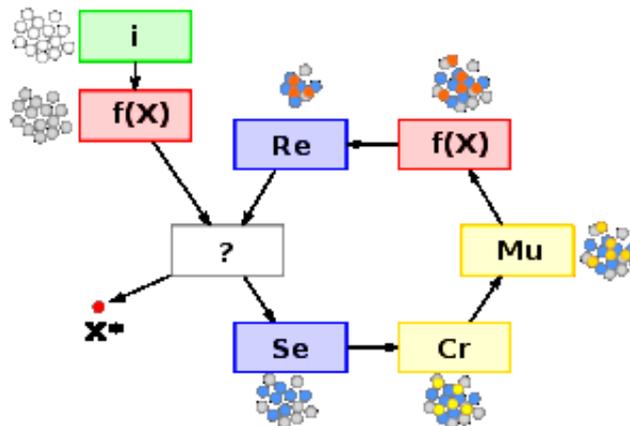


Figura 4: Algoritmo genético **i**: inicialización, **f(X)**: evaluación, **?**: condición de término, **Se**: selección, **Cr**: cruzamiento, **Mu**: mutación, **Re**: reemplazo, **X***: mejor solución.

- **Inicialización:** Se genera aleatoriamente la población inicial, que está constituida por un conjunto de cromosomas los cuales representan las posibles soluciones del problema. En caso de no hacerlo aleatoriamente, es importante garantizar que dentro de la población inicial, se tenga la diversidad estructural de estas soluciones para tener una representación de la mayor parte de la población posible o al menos evitar la convergencia prematura.
- **Evaluación:** A cada uno de los cromosomas de esta población se aplicará la función de aptitud para saber qué tan "buena" es la solución que se está codificando.
- **Condición de término:** El AG se deberá detener cuando se alcance la solución óptima, pero ésta generalmente se desconoce, por lo que se deben utilizar otros criterios de detención. Normalmente se usan dos criterios: correr el AG un número máximo de iteraciones (generaciones) o detenerlo cuando no haya cambios en la población. Mientras no se cumpla la condición de término se hace lo siguiente:
 - **Selección:** Después de saber la aptitud de cada cromosoma se procede a elegir los cromosomas que serán cruzados en la siguiente generación. Los

cromosomas con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de ser seleccionados.

- **Sobre cruzamiento:** El cruzamiento es el principal operador genético, representa la reproducción sexual, opera sobre dos cromosomas a la vez para generar dos descendientes donde se combinan las características de ambos cromosomas padres.
- **Mutación:** modifica al azar parte del cromosoma de los individuos, y permite alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual.
- **Reemplazo:** una vez aplicados los operadores genéticos, se seleccionan los mejores individuos para conformar la población de la generación siguiente.

3.2 PROGRAMA PUENFLEX Ver. 2.00

Este programa desarrollado en C++ comprende cuatro módulos:

Análisis Estructural.

Este módulo permite definir las características geométricas de la estructura, entre estas se tiene:

- Definir las propiedades de los materiales.
- Establecer las dimensiones de las secciones de los elementos estructurales.
- Colocar las cargas actuantes en la estructura.
- Colocar las condiciones de contorno de la estructura.
- Analizar la Estructura en su conjunto.
- Visualizar los resultados en pantalla.

Análisis para Pruebas de Carga.

Este módulo comprende lo siguiente:

- Insertar los datos experimentales.
- Procesar la Estructura con los datos de deflexiones experimentales.
- Realizar cálculos iterativos para determinar algunos parámetros de diseño.
- Presentar reportes de los cálculos realizados.

Verificación de los cálculos.-

Este módulo comprende lo siguiente:

- Verificar las matrices de rigideces del Calculo Estructural.
- Verificar las Deformaciones Obtenidas.
- Verificar las condiciones de Contorno Asumidas.

- Verificar los esfuerzos actuantes en las secciones transversales de los elementos estructurales.

Algoritmos Genéticos.-

Este modulo permite optimizar estructuras usando algoritmos genéticos para lo cual se necesita establecer algunos parámetros iniciales, ver figura 1.

FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA PUENFLEX

Al iniciar el programa, aparecerá la siguiente ventana de presentación:

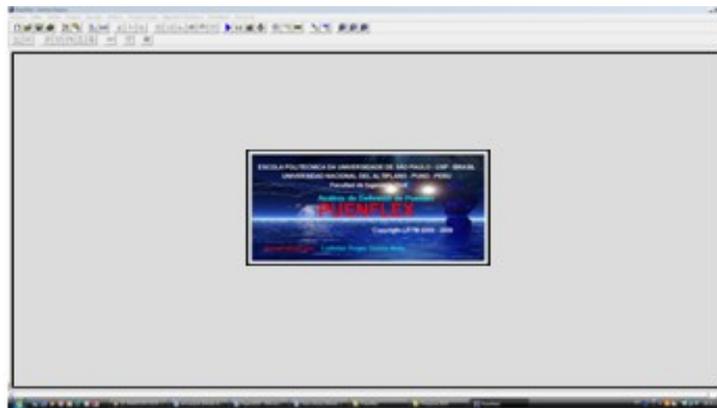


Figura 5: Presentación del programa Puenflex.

Después de cargado el programa se podrá aprovechar todas las alternativas de cálculo que este ofrece y se caracteriza por la facilidad de manejo debido a su interface grafica amigable. Permite visualizar todos los datos ingresados en pantalla, tales como coordenada de los nudos, conectividad de barras, tipo de apoyos, tipo de carga aplicada, tipo de sección, etc. En las figura 6 se muestra algunas estructuras que se generaron en este programa.

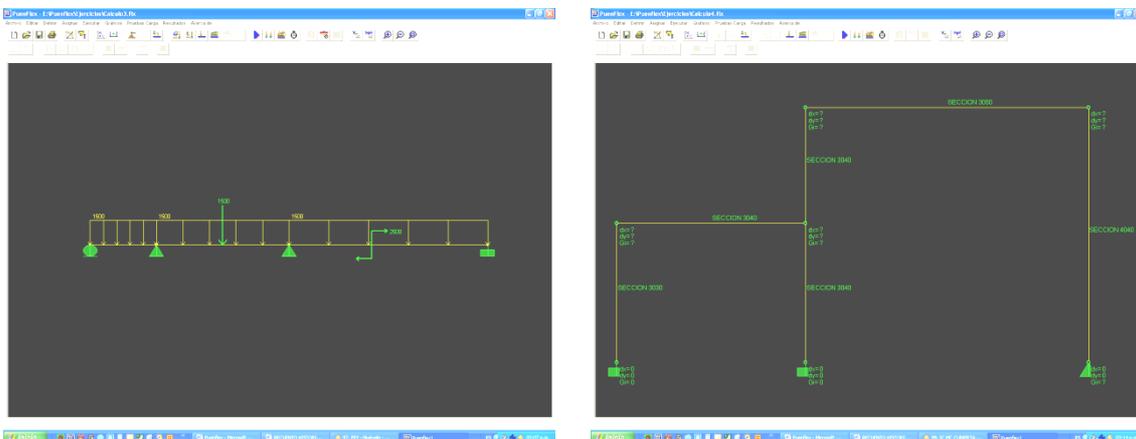


Figura 6: Ejemplo de vigas y pórticos generados en Puenflex.

Además el programa permite caracterizar algunos tipos de secciones tal como se muestran en las siguientes figuras:

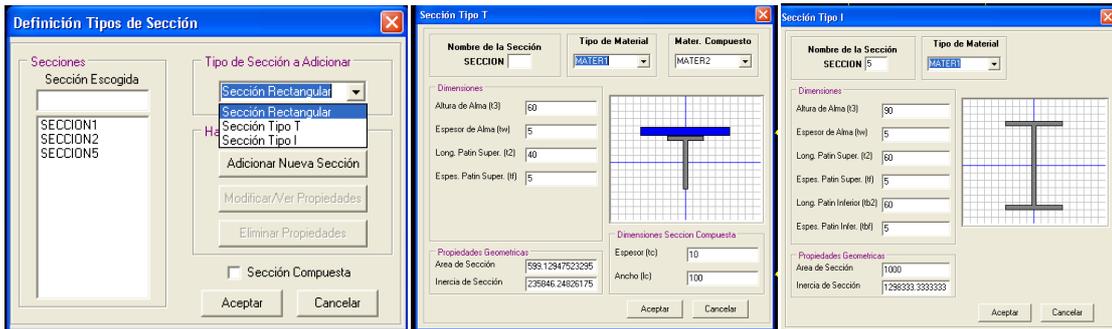


Figura 7: Ejemplo de secciones generados en Puenflex.

Una vez ingresado todos los datos necesarios, se procede al cálculo de la estructura. Para la resolución de matrices y la determinación de las incógnitas del problema se usó el método de Skyline.

Después de calculado la estructura, el programa permite ver los resultados gráficamente, tales como deformaciones, momentos flectores, cortantes, matrices de rigidez de cada barra y global, tal como se detallan en las siguientes figuras:

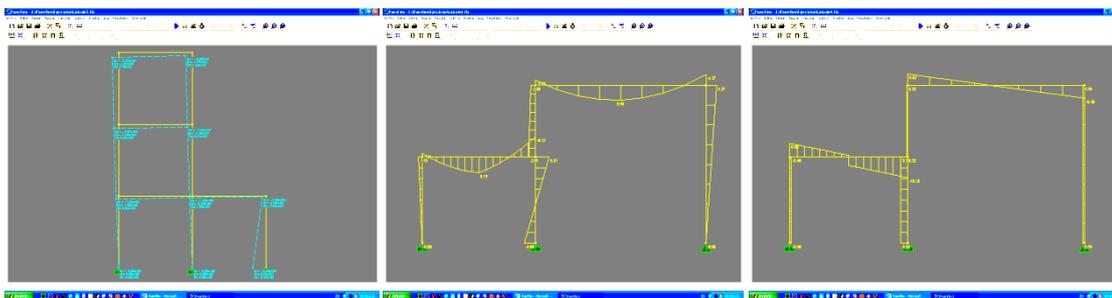


Figura 8: Ejemplo de resultados que pueden visualizarse en Puenflex.

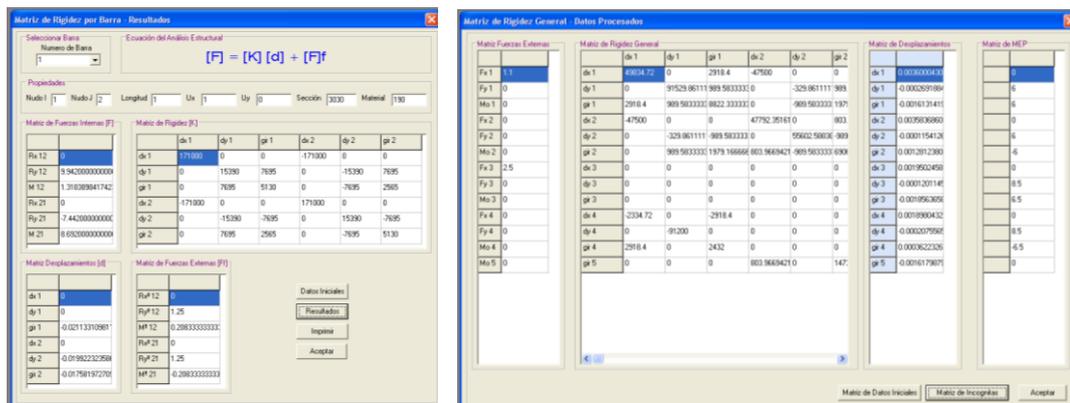


Figura 9: Matrices de rigidez local y global de la estructura.

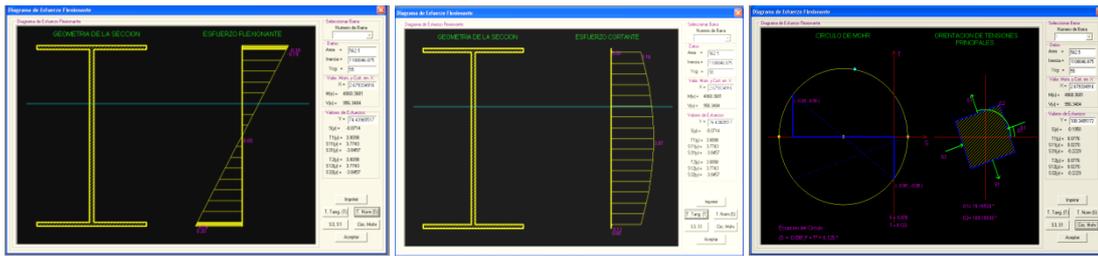


Figura 10: Diagrama de esfuerzo normal, tangente y círculo de mohr de la sección transversal.

3.3 FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE CON AGs.

Los AGs fueron implementados en el software Puenflex como una subrutina. El funcionamiento se basa principalmente en que esta subrutina se encarga de generar la población inicial aleatoriamente. Para luego, determinar la aptitud de la población (peso de la estructura), las variables generadas en formada de cadenas binarias son transformadas en números reales para posteriormente ser enviadas hacia la subrutina de cálculo estructural, para poder así obtener las fuerzas normales y las deflexiones en cada uno de los nudos. Estos datos son importantes porque permiten verificar la resistencia de las secciones adoptas y las deflexiones máximas permitidas.

Las poblaciones que no cumplen los requisitos de resistencia y deflexiones máximas son penalizadas. Eso quiere decir que el valor del peso total de la estructura es sobre valorado, para que en la siguiente etapa de selección esta sea descartada. A continuación se presenta un flujograma que muestra el proceso de optimización de nuestro problema, usando diferentes operadores genéticos (mutación, cruzamiento, etc).

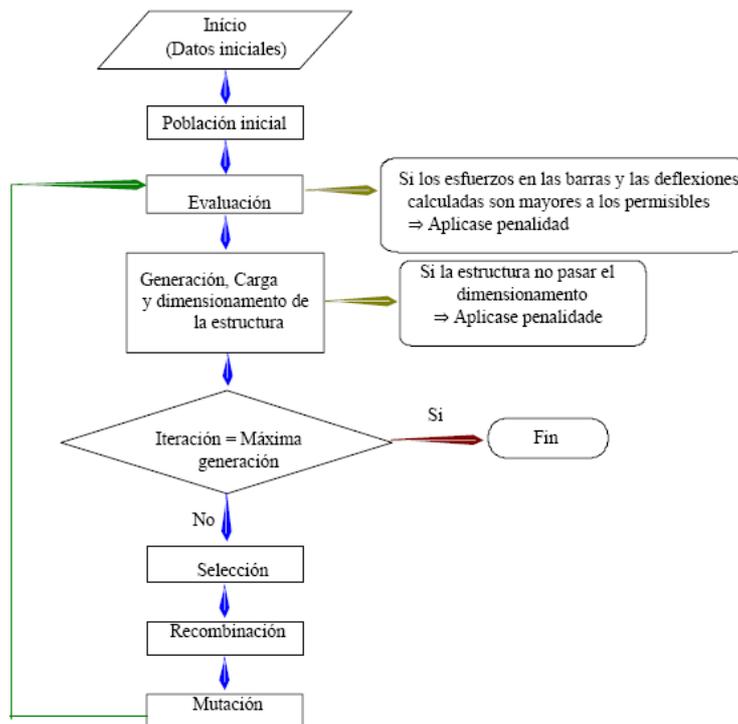


Figura 11: Flujograma utilizado en la implementación del AG.

La solución de problemas utilizando AGs requiere que las variables del diseño sean representadas de forma que los operadores de los AGs funcionen correctamente sobre ellos. En este trabajo, se decidió trabajar con las seis variables de diseño, S , H , b , e_b , h y e_h , en representación de números reales, tal como fue explicado en el planteamiento del problema.

Definidas las variables de diseño, el segundo paso es crear el espacio de búsqueda, es decir, los posibles valores que las variables pueden asumir. Por lo tanto, el programa requiere que el usuario proporcione los siguientes valores:

1. Tamaño de la población.
2. Número de Generaciones.
3. Probabilidad de Cruce.
4. Probabilidad de Mutación.
5. Longitud de la luz del puente (L).
6. Esfuerzo máximo resistente de las barras ($\sigma_{\text{máx.}}$).
7. Deflexión máxima establecida según norma ($\delta_{\text{máx.}}$).
8. Carga aplicada a la estructura (W).
9. Modulo de elasticidad del material a usar en cálculo estructural (E).
10. Peso específico del cual está compuesto la estructura (γ).
11. Número de divisiones mínima y máxima de la luz del puente (L / S).
12. Altura mínima y máxima de la armadura así como el intervalo de búsqueda (H).
13. Dimensión mínima y máxima del patín superior e inferior de la sección y su respectivo intervalo de búsqueda (b).
14. Dimensión mínima y máxima del espesor del patín superior e inferior de la sección y su respectivo intervalo de búsqueda (e_b).
15. Dimensión mínima y máxima de la altura de la sección y su respectivo intervalo de búsqueda (h).
16. Dimensión mínima y máxima del espesor de la altura de la sección y su respectivo intervalo de búsqueda (e_h).

Con estos datos iniciales, además de la duración y la amplitud de la cobertura, el programa crea seis vectores que contengan los posibles valores de las variables de diseño. En la figura 11, se muestra el cromosoma en cual se aplicaran todos los operadores genéticos para obtener los parámetros más óptimos.

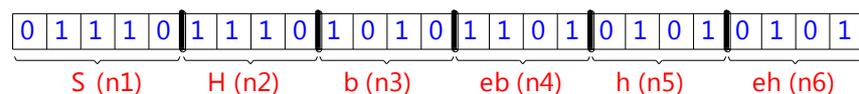


Figura 12: Cromosoma montado para optimizar la estructura usando AGs.

En función a los datos ingresados al programa, los valores de n_1, n_2, \dots, n_6 , que representan el tamaño de los vectores, son determinados dinámicamente dentro del programa con la siguiente expresión:

$$n = \frac{\log\left(\frac{X_{\max} - X_{\min}}{\text{Intervalo}}\right)}{\log 2} \quad (7)$$

El proceso de cálculo y las generación de la población inicial y demás operaciones genéticas pueden ser visualizadas directamente en el programa tal como se muestra en la figura 12. Además de generar un archivo *.txt que muestra todos los códigos binarios del cromosoma y su evolución ocurrida de generación en generación.

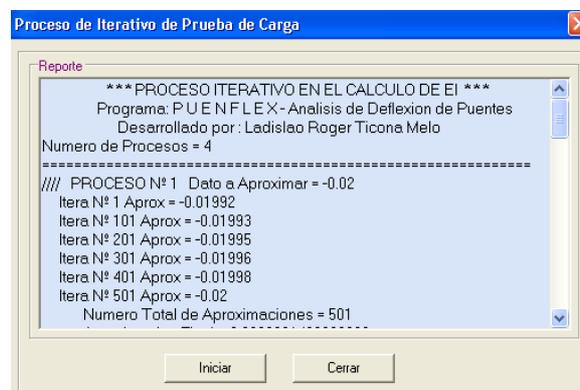


Figura 13: Seguimiento del proceso de cálculo.

4 APLICACION PRACTICA DE LOS ALGORITMOS GENETICOS

4.1 Ejemplo 1.- Se pretende optimizar el peso de una estructura que tiene una luz de 40m, para los cuales se considerará los siguientes parámetros:

Figura 14: Datos iniciales considerados en el ejemplo 1.

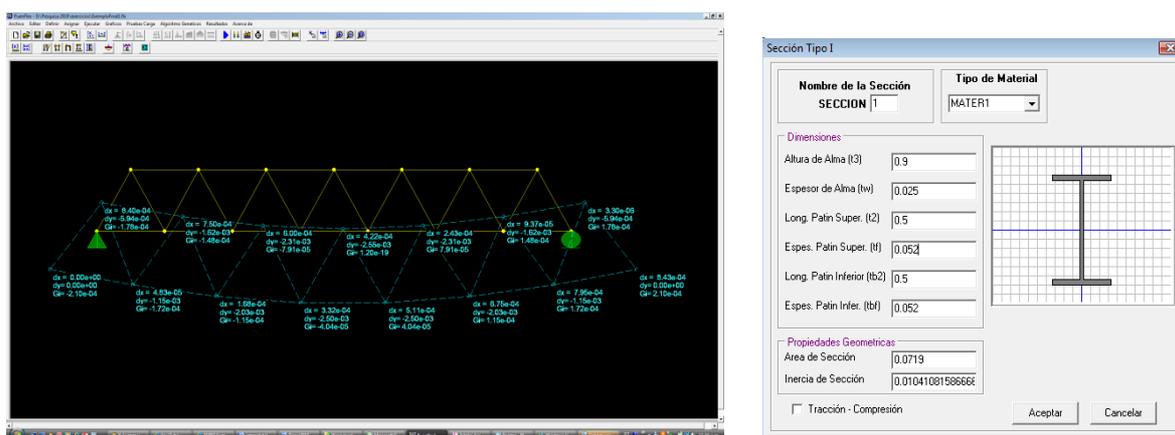


Figura 15: Estructura optimizada en su geometría longitudinal y sección transversal de las barras.

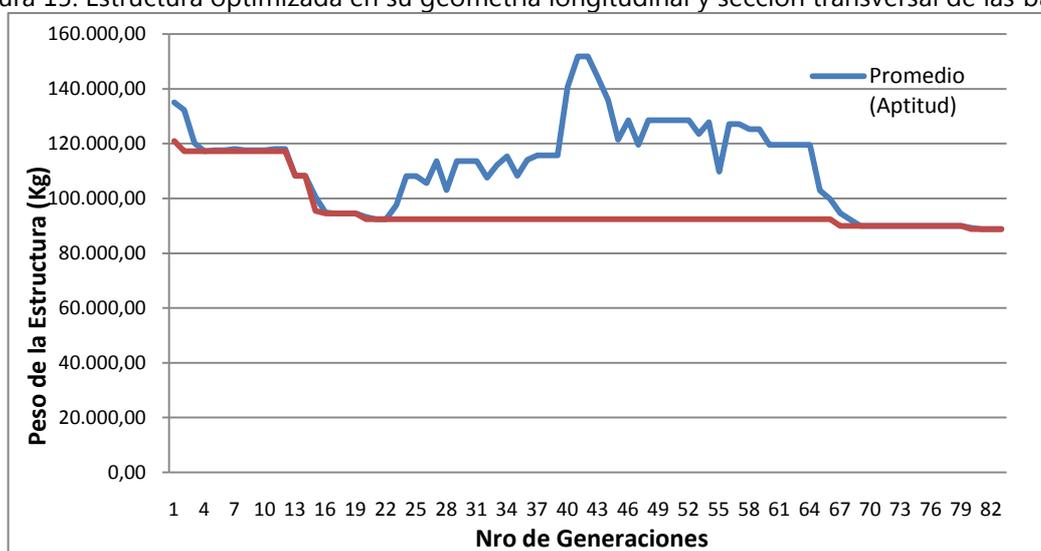


Figura 16.- Convergencia de la función objetivo (peso de la estructura).

De la figura 16 se puede observar que la función objetivo comienza a convergir a partir de la generación 19. Para seleccionar la generación deseada, se tendrá que analizar cuidadosamente el proceso de convergencia de las generaciones y escoger aquella que se mantenga constante o sea próxima al cromosoma elite. En este caso la mejor generación que responde a esta exigencia es la 81, cuya función objetivo es de 88.838,93 Kg.

El programa desarrollado permite también almacenar los datos de la mejor generación, para que pueda ser analizado con mayor detalle y así verificar los esfuerzos actuantes en las barras y la deformada de la estructura. En la figura 15 se puede observar la deformada de la estructura cuya deflexión máxima es de 0,00195m < al máximo permisible (0,002m).

4.2 Ejemplo 2.- Se pretende optimizar el peso de una estructura que tiene una luz de 100m, para los cuales se considerará los siguientes parámetros:

The screenshot shows a software window titled "Aplicación de Algoritmo Genético - Armadura" with several configuration panels:

- Parámetros del Algoritmo Genético:** Población: 40, Número de Generaciones: 800, Probabilidad de Cruce: 0.30, Probabilidad de Mutación: 0.001.
- Condiciones Geométricas del Puente:** Divisiones de la Luz del Puente: División Mínima = 10, División Máxima = 12.
- Altura de la armadura H(m):** Mínimo Hmin (m) = 6, Máximo Hmax (m) = 9, Intervalo = 0.125.
- Condiciones Geométricas de las Secciones:** Comprimento do Vão L(m) = 100.
 - Patin Superior e Inferior de la Sección:** Dimensión Mínima (m) = 0.50, Dimensión Máxima (m) = 0.80, Intervalo = 0.05. Espesura Mínima (m) = 0.025, Espesura Máxima (m) = 0.0625, Intervalo = 0.001.
 - Altura de la Sección:** Dimensión Mínima (m) = 0.80, Dimensión Máxima (m) = 1.20, Intervalo = 0.05. Espesura Mínima (m) = 0.025, Espesura Máxima (m) = 0.0625, Intervalo = 0.001.
- Condiciones de Diseño:** Esf. Máx. (Kg/m²) = 25.3e6, Deflex. Máx. L/800. (m) = 0.0075.
- Parámetros Estructurales:** Carga w(Kg/m) = 3600, Mod. Elast E(Kg/m²) = 2.1e10, Peso Espec. (Kg/m³) = 7650.

Figura 17: Datos iniciales considerados en el ejemplo 2.

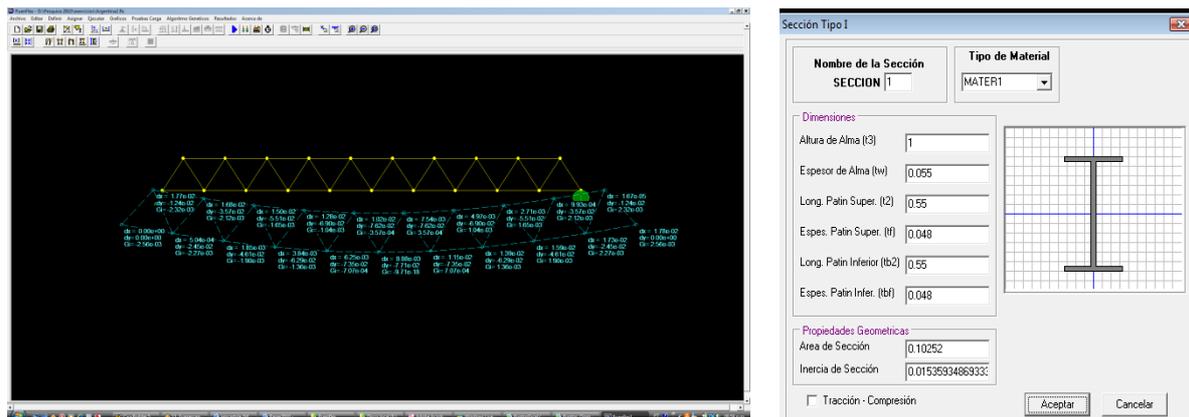


Figura 18: Estructura optimizada en su geometría longitudinal y sección transversal de las barras.

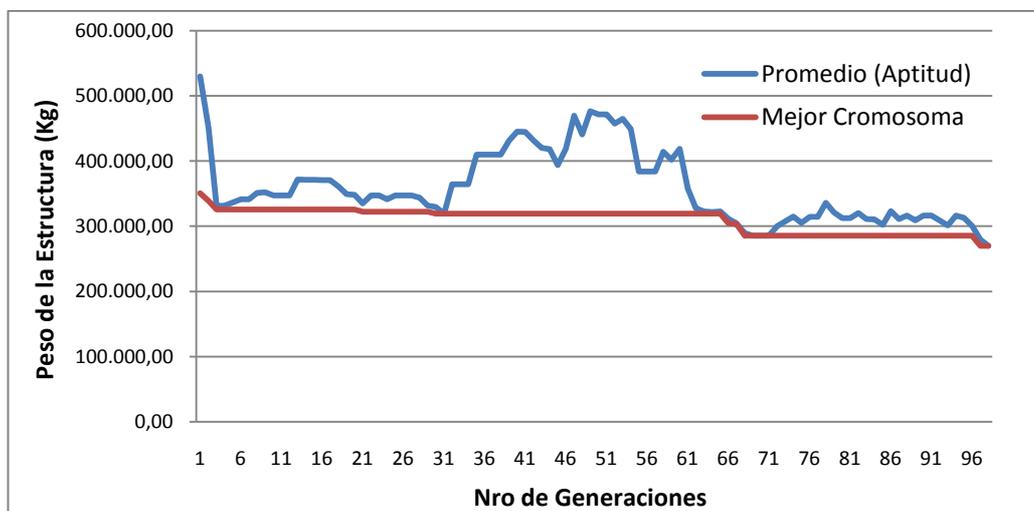


Figura 19: Convergencia de la función objetivo (peso de la estructura).

De la figura 19 se puede observar que la función objetivo comienza a convergir a partir de la generación 66. Pero sin embargo, debido a la variabilidad del espacio de búsqueda es que comienza a generar nuevos cromosomas hasta que en la generación 95 se alcanza una adecuada convergencia, cuya función objetivo es de 270.044,80 Kg.

En la figura 18 se puede observar la deformada de la estructura cuya deflexión máxima es de 0,069 < al máximo permisible (0,075m).

5 CONCLUSIONES

El uso de algoritmos genéticos es un recurso útil para a reducción de costos en procesos de industrialización y es de fácil implementación. La selección de los AGs para la solución del problema en estudio se mostro adecuada, principalmente porque a función objetivo no es continua. La mayor dificultad encontrada hasta el momento es que para luces de puente considerables, el algoritmo planteado no converge rápidamente y requiere de mucha memoria para ejecutar los cálculos. Por lo tanto se pretende mejorar el algoritmo de búsqueda para futuros estudios de caso.

Los AG no son métodos exactos de solución de problemas, pero se aproximan mucho a la solución óptima, esto es debido desde luego a su naturaleza evolutiva, que por otro lado ofrece gran robustez para la solución de problemas complejos.

6 BIBLIOGRAFIA

Êvila, S. L. Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletores. *Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica* de UFSC, 2002.

Galante Miguel, Un algoritmo genético simple para la optimización de estructuras planas articuladas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y diseño en Ingeniería*, Vol. 9, 2, 179-199, 1993.

Galante M. y M Cerrolaza. Un Algoritmo Genético para Optimizar Estructuras Esbeltas Reales. *II Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*. F. Navarrina y M. Casteleiro (Eds.) SEMNI 1993.

Gere, James M. y William Weaver JR. Análisis de Estructuras Reticulares. *Trad. Sergio Vargas Romero*. México D.F. : CECSA, Novena reimpresión. 1984.

Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. *Addison-Wesley Publishing Company, Inc.* 1989.

Silva, A. J. M. Implementação de um Algoritmo Genético Utilizando o Modelo de Ilhas. *Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil œ COPPE/UFRJ.* 2005.

Ticona Melo, Ladislao R. Análisis de Deflexiones mediante pruebas de carga estática – Puente Loripongo. *Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Universidad Nacional del Altiplano UNA.* 2005.