

## OPTIMIZACIÓN SELECTIVA DE ESTRUCTURAS METÁLICAS 3D

### SELECTIVE OPTIMIZATION OF 3D STEEL STRUCTURES

Javier L. Mroginski (1)(P); Pablo A. Beneyto (2); H. Ariel Di Rado (3)

- (1) Ing. Civil, Dr., Docente/Investigador, Facultad de Ingeniería, UNNE - CONICET. Argentina  
(2) Ing. en Construcciones, Mag., Docente/Investigador, Facultad de Ingeniería, UNNE. Argentina  
(3) Ing. en Construcciones, Dr., Docente/Investigador, Facultad de Ingeniería, UNNE. Argentina  
Dirección para correspondencia: javierm@ing.unne.edu.ar; (P) Presentador

#### Resumen

En el presente trabajo se propone una herramienta de optimización multiobjetivo basada en Algoritmos Genéticos (AG) con el fin de analizar las diferentes soluciones posibles de un reticulado espacial. En este sentido se desarrolló un software, en código abierto SciLab, basado en AG que optimiza en forma conjunta tres funciones objetivo a partir de una combinación lineal entre las mismas, es decir que realiza un proceso de optimización multiobjetivo. La primera función corresponde al peso de la estructura (que tiene una relación directa con el costo de la misma) mientras que la segunda es el desplazamiento máximo en la sección más desfavorable. La restante función objetivo corresponde a la minimización de la norma euclideana del estado tensional con el fin de lograr una homogenización del esfuerzo en las diferentes secciones estructurales. Previo al proceso de optimización evolutivo del algoritmo, se realiza un análisis de sensibilidad de las variables que actúan con el fin de concentrar el estudio sobre las variables de mayor sensibilidad. Los resultados obtenidos permiten mostrar la eficiencia del método y la robustez del algoritmo propuesto para la optimización multiobjetivo de estructuras espaciales.

*Palabras-clave:* Algoritmos genéticos, Optimización multiobjetivo, Estructuras reticuladas 3D.

#### Abstract

In this paper, a multiobjective optimization tool based on genetic algorithms (GA) is proposed in order to analyze the structure design of 3D trussed. In this regard, an open source code (SciLab) GA-based was developed. The main aim of this software is the simultaneously optimization of three different objective functions based on a linear combination method, i.e. multiobjective optimization. The first function is the weight of the structure (which is directly related to its cost) and the second is the maximum displacement in the most unfavorable section. The remaining objective function corresponds to the minimization of the Euclidean norm of the stress state in order to get a homogeneous field of internal stresses in all structural sections. Before the evolutionary optimization process of the GA, a sensitivity analysis of the main variables is performed, in order to focus the study on the most sensitive variables.

*Keywords:* Genetic Algorithm, multiobjective optimization, 3D trussed structures.

## 1. INTRODUCCIÓN

Numerosos problemas de ingeniería que involucran el diseño de piezas estructurales pueden ser abordados mediante el empleo de las teorías simplificadas de la resistencia de materiales o bien, mediante el Método de los Elementos Finitos, conduciendo, en ambos casos, a soluciones determinísticas. Sin embargo la solución determinística del diseño óptimo de una estructura no puede ser obtenida en virtud del carácter heurístico de la misma. En estos casos pueden emplearse técnicas iterativas de búsqueda donde la solución no es única, sino que está acotada a un intervalo (Belegundu and Chandrupatla 1999).

Usualmente, la metodología de diseño está íntimamente relacionada con la experiencia del ingeniero estructuralista o con las restricciones propias del proyecto de ingeniería, descartando cualquier análisis de optimización que tienda a mejorar el diseño inicial. Sin embargo, a menudo, la economía de materiales ha llevado a buscar alternativas de diseño con el objetivo de optimizar el peso (equivalente a la cantidad de material), sin dejar de lado la funcionalidad y la seguridad (Mroginski 2011; Deb and Gulati 2000).

Dentro de los problemas que se enmarcan en el diseño estructural es posible mencionar la optimización de sistemas reticulados tanto de dos dimensiones como de tres dimensiones (Huang and Wang 2008), diseño de pórticos planos y espaciales, secciones mixtas o compuestas, topología de secciones estructurales, etc.

En este trabajo se plantea el desarrollo de una herramienta computacional basada en Algoritmos Genéticos (AG) aplicado al diseño de estructuras reticuladas espaciales, buscando minimizar la deformación de la estructura como así también la cantidad de material utilizado, a través de una formulación del tipo multiobjetivo (Coello and Christiansen 2000).

## 2. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Los AG deben su origen a la teoría de la evolución de Darwin, según la cual de una población de individuos los más aptos tienen mayores probabilidades de supervivencia. En un problema de optimización, los individuos representan las distintas soluciones al problema y su aptitud al medio se define mediante la función de evaluación (o función objetivo) que es la función cuyo valor extremo es buscado.

### 2.1. Características generales

Algunas de las características principales del algoritmo propuesto son las siguientes:

- Las variables que constituyen cada individuo son los diámetros de las barras espaciales.
- El algoritmo es de tipo *elitista*, los individuos con mayor probabilidad de ser elegidos de la población pasan a la generación siguiente sin pasar por el procedimiento de cruzamiento.
- Restricciones solamente en cotas inferior y superior de las variables.
- Procedimiento iterativo escalonado/selectivo con la finalidad de centrar la búsqueda en las variables con mayor sensibilidad.
- Renovación parcial de la población con el fin de evitar que la población se sature con los mejores individuos y evitar el paso de mutación.

## 2.2. Características particulares

A En la Fig. 1a se presenta el pseudocódigo elemental del AG implementado en este trabajo en el cual se describen algunas de las principales características del mismo. Mientras que en la Fig. 1b se representa la geometría y la enumeración de las barras que conforman los individuos.

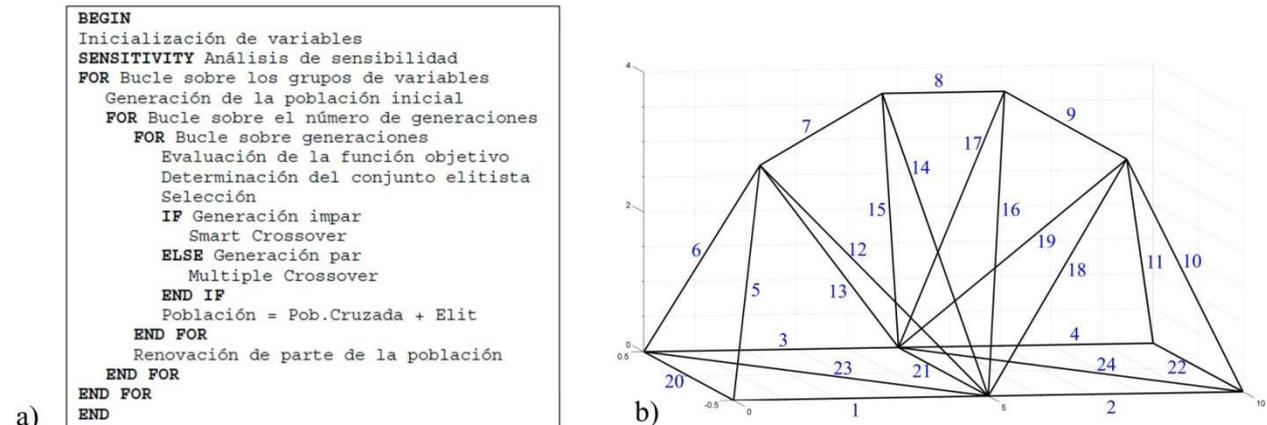


Figura 1. Características principales del AG propuesto, a) Pseudocódigo; b) Identificación de las barras.

### 2.2.1. Iniciación

En este punto se definen las variables del problema, entre ellas se encuentra el tamaño de la población *PopSize*, el número de generaciones *ngen*, la cantidad de variables *numvars*, el porcentaje de individuos que no se renuevan *porpas* y la cantidad de individuos del elit *Nelit*.

### 2.2.2. Análisis de sensibilidad

El Previo al inicio del algoritmo evolutivo se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en la conformación de los individuos. El principal objetivo de este estudio es agrupar las variables en tres conjuntos según su incidencia en el resultado de la función objetivo, con el fin de disgregar la búsqueda de la solución global en tres partes. Posteriormente se mostrara la mejora que introduce esta variante en la solución del AG.

### 2.2.3. Generación de población inicial

La población inicial es generada mediante un algoritmo heurístico especialmente diseñado para cumplir las restricciones del problema en cuanto a las cotas superior e inferior de la variables. Los individuos son vectores de dimensión *numvars* formado por los diámetros de las barras del reticulado, los cuales están formados por secciones tubulares de igual espesor ( $t=0.2\text{cm}$ ) y cuyo diámetro puede variar en forma discreta entre el diámetro mínimo,  $d_{min}=1\text{cm}$ , y el diámetro máximo,  $d_{max}=5\text{cm}$ , adquiriendo solamente valores enteros.

#### 2.2.4. Evaluación multiobjetivo

Se evalúa cada individuo según la función objetivo adoptada (Talaslioglu 2009). En el presente trabajo se adoptaron las siguientes funciones de evaluación empleando el Método de los Elementos Finitos:

- f1** Minimización del peso de la estructura.
- f2** Descenso mínimo en la sección central.
- f3** Minimización de la norma euclideana del estado tensional.

El análisis multiobjetivo se llevó a cabo mediante una combinación lineal de las funciones  $f_1$  y  $f_2$ , a través de una función de interpolación ponderada según los pesos  $w_i$  de la Ec. (1) (Mroginski et al. 2008), mientras que la función  $f_3$  es empleada para realizar una comparación entre el resultado obtenido con la optimización multiobjetivo con una función de significado físico equivalente.

$$Func = \sum w_i f_i \quad (1)$$

#### 2.2.5. Selección

El proceso de selección es del tipo *Simple Roulette*, mediante el cual se eligen los individuos en función de las probabilidades de cada uno utilizando tiros aleatorios. Las probabilidades son calculadas mediante una función de escalado que disminuye el inconveniente de saturación de la población con los individuos mejor adaptados (Belegundu and Chandrupatla 1999; Beneyto et. al 2012).

#### 2.2.6. Cruzamiento

En este módulo del algoritmo se implementó un procedimiento mixto de cruzamiento, intercalando procedimientos de cruzamiento diferentes. Para generaciones impares se utilizó el tipo de cruzamiento denominado *Smart Crossover* dado que la combinación entre las variables no es aleatoria sino que contiene un significado físico (Ej.: Se combinan variables del cordón superior entre sí, sin incluir el cordón inferior o las diagonales), mientras que en generaciones pares se emplea la técnica de cruzamiento *Múltiple Crossover* que genera un vector aleatorio de dimensión *numvars* con las posiciones de cruzamiento.

#### 2.2.7. Renovación

Con la finalidad de evitar que el AG quede atrapado en óptimos locales se emplea una técnica de renovación de un porcentaje de la población. Este porcentaje debe ser pequeño para evitar que el AG se transforme en un algoritmo de búsqueda aleatoria. Esto permite aumentar el campo de búsqueda del algoritmo y descartar los individuos menos adaptados del proceso evolutivo. Asimismo, el paso adicional de mutación no es requerido.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Puente reticulado

En esta sección se presentan las soluciones obtenidas con el AG propuesto en este trabajo. Las variables de control adoptadas son las siguientes:  $numvars = 24$ ,  $PopSize = 50$ ,  $numgen = 120$ ,  $porpas = 70$  y  $Nelit = 2\%$ . En primer lugar se analizan dos problemas cuya solución es cerrada y conocida, lo cual permite evaluar la velocidad de convergencia y el margen de error que posee el AG utilizado.

El primer problema analizado consiste en minimizar el peso total de la estructura. Si no se introduce otra restricción esta claro que el resultado buscado se trata de un individuo cuyas variables adquieran su valor inferior,  $d_{min}$ . En este caso, a partir del análisis de sensibilidad explicado anteriormente se observan tres grupos de variables ( $ngrup = 3$ ), ver Tabla 1. El error obtenido respecto de la solución exacta es del 3 %.

Tabla 1: Grupos de variables con mayor sensibilidad

Función	Grupo N° 1	Grupo N° 2	Grupo N° 3	Grupo N° 4
Peso	1, 2, 3, 4, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 24	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	20, 21, 22	
Descenso	7, 8, 9	5, 6, 10, 11, 12, 13, 18, 19	14, 15, 16, 17, 21	1, 2, 3, 4, 20, 22, 23, 25
Tensión	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21	1, 2, 3, 4, 20, 22, 23, 24	

En segundo lugar se estudio la solución óptima que minimice el descenso en la sección media de la estructura.

Al igual que en caso anterior, este problema tiene solución exacta cuando todos las variables que forman el individuo adquieren su valor máximo,  $d_{max}$ . En este caso, el análisis de sensibilidad permitió distinguir cuatro grupos de variables cuya influencia es significativa en la función objetivo (ver Tabla 1). El error obtenido respecto de la solución exacta es del 1 %.

El tercer ejemplo consiste en minimizar la norma euclideana de la tensión de las barras de la estructura.

A diferencia de las anteriores, esta solución no se obtiene por simple inspección y se espera que resulte una solución intermedia entre las anteriores.

Finalmente se llevo a cabo el análisis multiobjetivo combinando las funciones de minimización de peso y descenso. Se estudiaron los resultados obtenidos con el AG variando las funciones de ponderación  $w_1$  y  $w_2$ , correspondiente al descenso y peso, respectivamente, de la Ec. 1. En la Tabla 2 se resumen las soluciones obtenidas con este AG para cada una de las funciones objetivo adoptadas. Puede observarse claramente en el análisis multiobjetivo como al aumentar  $w_1$  la solución de las variables con mayor sensibilidad tiende a la minimización del descenso. De igual modo, al incrementar  $w_2$  la solución obtenida tiende a la minimización del peso. Mientras que,  $MO [1-1]^2$ , para funciones de ponderación  $w_1 = w_2 = 1$ , tiende a la solución intermedia de minimización de la norma del estado tensional de la estructura (ver Tabla 2 y Fig. 2).

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

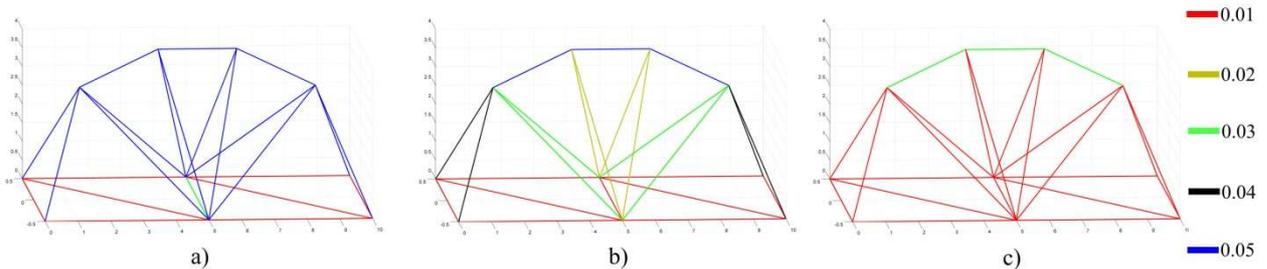


Figura 2: Soluciones correspondientes al análisis multiobjetivo, a) MO [10-1]; b) MO [1-1]; c) MO [1-10]

Tabla 2: Soluciones obtenidas con el AG para las diferentes funciones objetivo estudiadas

Función	Diámetro de la sección (en cm)																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Objetivo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Descenso	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4	3	4	5	5
Tensión	1	1	1	1	5	5	5	5	5	5	5	3	2	2	2	2	2	2	3	3	5	4	1	1
MO[10-1]	1	1	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	3	1	1	1
MO[5-1]	1	1	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	5	5	1	2	1	1	1
MO[1-1]	1	1	1	1	4	4	5	5	5	4	4	3	3	2	2	2	2	3	3	1	1	1	1	1
MO[1-5]	1	1	1	1	2	2	4	4	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
MO[1-10]	1	1	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

### 3.2. Torre 3D

En esta sección se presenta un problema de optimización similar al anterior donde se incrementa notablemente el número de variables. Este ejemplo consiste en una torre de transporte de alta tensión donde la geometría está definida con anterioridad y se busca optimizar el dimensionado de los perfiles tubulares que conforman la estructura. En la Fig. 3 se presenta un esquema del problema propuesto.

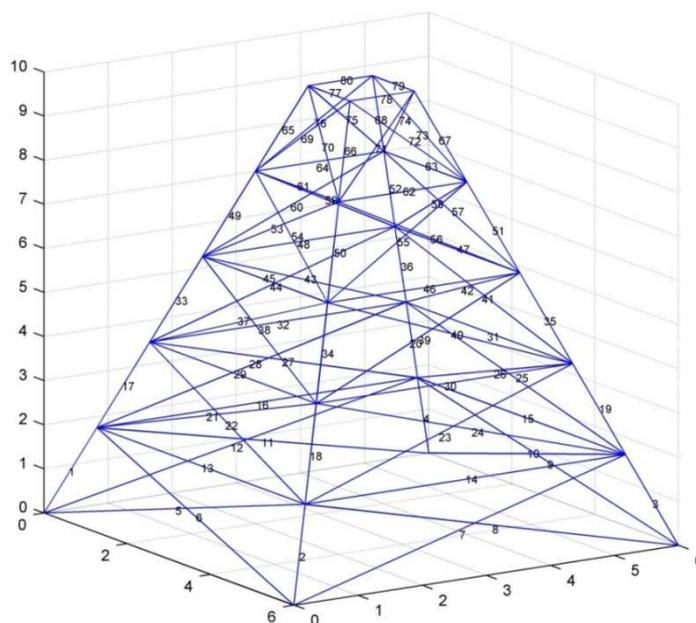


Figura 3: Geometría y numeración de los individuos

Las variables de control adoptadas son: numvars = 80, PopSize = 200, porpas = 70% y Nelit = 2%. Del análisis de sensibilidad se clasifican las variables en 4 grupos. En la Fig. 4 se indican dichos grupo con diferentes colores y según la función objetivo empleada.

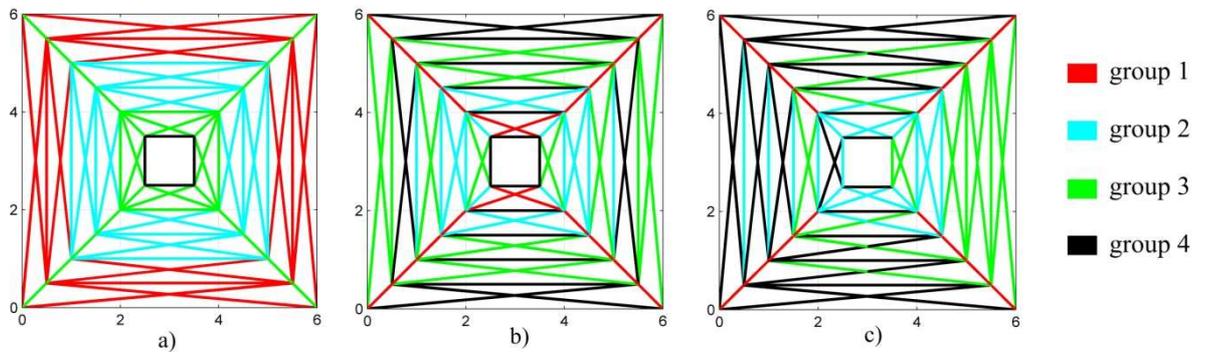


Figura 4: Grupos de sensibilidad para a) minimización del peso; b) minimización del desplazamiento; c) minimización del estado tensional

Al igual que en el caso anterior, se presenta en la Tabla 3 el error relativo para cada función objetivo, así como también el número de iteraciones requerido para conseguir la convergencia global del método.

Tabla 3: Error relativo según cada función objetivo

	Error (%)	ngen	ngen (sin análisis de sensibilidad)
f1 (mim. peso)	2.23	651	1257
f2 (min. desp.)	1.96	702	1454
f3 (min. tens.)	2.51	680	1624

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Belegundu, A. and Chandrupatla, T. (1999). Optimization Concepts and Applications in Engineering, Prentice Hall.
- Beneyto, P.A; Gutierrez, G.J.; Mroginski, J.L.; Di Rado, H.A. and Awruch A.M. (2011). Análisis de Estabilidad de Taludes mediante Técnicas de Optimización Heurística, Mecánica Computacional, 30, pp. 2001-2014.
- Beneyto, P.A; Gutierrez, G.J.; Mroginski, J.L.; Di Rado, H.A. and Awruch A.M. (2012). Análisis de la evolución de superficies de deslizamiento en suelos cohesivos utilizando optimización heurística, Mecánica Computacional, 31, pp.845-856.
- Coello, C. and Christiansen, A. (2000), Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms, Computer and Structures, 78, pp.647-660.
- Deb, K. and Gulati, S. (2001). Design of truss structure for minimum weight using genetic algorithm, Finite Element in Analysis and Design, 37, pp.447-465.
- Huang, J. and Wang, D Z. (2008). Topology optimization design for discrete structures using genetic algorithm, Journal of Ship Mechanics, 25 (2008), pp.32-38.

- Mroginski, J.L. ; Gutierrez, G.J. ; Beneyto, P.A. and Di Rado, H.A. (2009). Optimización topológica de sistemas estructurales bidimensionales discretos mediante algoritmos genéticos, *Mecánica Computacional*, 28, pp.2657-2674.
- Talasliloglu, T. (2009). A new genetic algorithm methodology for design optimization of truss structures: Bipopulation-based genetic algorithm with enhanced interval search, *Modelling and Simulation in Engineering*, 2009, pp.1-28.