

# Optimización metaheurística de conjuntos estructurales de hormigón armado

## Metaheuristic optimization of structural sets of reinforced concrete

I. Negrin <sup>1\*</sup>, A. Negrin \*, E. Chagoyén \*

\*Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Villa Clara, CUBA

Fecha de Recepción: 25/03/2019

Fecha de Aceptación: 14/05/2019

PAG 181-192

### Abstract

*This paper presents the economic structural optimization of the Casa Síndico project using an algorithm programmed through the CSI API functions SAP2000v19-MATLAB R2015a, applying metaheuristic techniques: Genetic Algorithms (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO), in addition to hybridization between them. The results show that PSO has a better performance than GA for this type of optimization, although both, working with their simple methodologies, are not completely efficient, which is verified when creating and applying a hybridization between the two, using GA to create an initial swarm for PSO to carry out the optimization process, obtaining results of up to 10% better. Regarding the structural results, a direct cost of construction is obtained by 13% more economical when applying the proposed methodology, leaving, for the beams, heights of relation  $L/h$  between 15 and 17.5, for the columns, the use of sections with rectangularities of up to 1.35, in the direction that more flexion occurs, something similar to what happens for the foundations, where the rectangularity of these follows the previous criterion, obtaining values of up to 1.4.*

*Keywords: Structural optimization, structural set, Metaheuristics, Genetic Algorithms, Particle Swarm Optimization*

### Resumen

En este artículo se presenta la optimización estructural económica del proyecto Casa Síndico utilizando un algoritmo programado mediante las funciones CSI API SAP2000v19-MATLAB R2015a, aplicando técnicas metaheurísticas: Algoritmos Genéticos (GA) y Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), además de una hibridación entre estas. Los resultados muestran que PSO presenta un mejor comportamiento que GA para este tipo de optimización, aunque ambos, trabajando con sus metodologías simples, no resultan del todo eficiente, lo cual se comprueba al crear y aplicar una hibridación entre los dos, utilizando GA para crear un enjambre inicial para que PSO realice el proceso de optimización, obteniéndose resultados hasta un 10 % mejores. En cuanto a los resultados estructurales, se obtiene un costo directo de construcción un 13 % más económico al aplicar la metodología propuesta, quedando, para las vigas, peraltos de relación  $L/h$  entre 15 y 17.5, para las columnas, el uso de secciones con rectangularidades de hasta 1.35, en la dirección que ocurre más flexión, algo parecido a lo que ocurre para los cimientos, donde la rectangularidad de estos sigue el criterio anterior, obteniéndose valores de hasta 1.4.

**Palabras clave:** Optimización estructural, Conjunto estructural, Metaheurísticas, Algoritmos Genéticos, Optimización por Enjambre de Partículas

## 1. Introducción

El desarrollo de las investigaciones en el campo de las estructuras ha contribuido notablemente al logro de proyectos cada vez más racionales, tratando siempre de que estos tengan cada vez más una relación seguridad-costos más cercana a la óptima real.

En los últimos años gracias al desarrollo de técnicas computacionales interactivas o automáticas se le ha dado un gran impulso a una rama de la ingeniería civil conocida como “optimización estructural”, mediante la cual mejoran los diseños, obteniendo una reducción de costos, materiales y tiempo en estos procesos. (Negrin, 2019).

Por otra parte, resulta indispensable entender la optimización estructural como el producto de optimizar el conjunto completo, pues se ha demostrado que la optimización del elemento de manera individual omite un aspecto fundamental en el concepto de estructura como es la influencia de cada elemento individual en el conjunto, quedando la distribución de solicitaciones marcada fundamentalmente por este aspecto. (Negrin, 2014) (Negrin, 2016) (Negrin, 2019).

Muchos autores han investigado acerca de metodologías para realizar la optimización de estructuras, ya sea mono o multiobjetivo, pero existen varios aspectos que pueden ser considerados limitantes de estos procedimientos.

La gran parte de las metodologías planteadas por diversos autores omiten la consideración de la interacción suelo-estructura (ISE), así como la optimización de las cimentaciones dentro el conjunto estructural (Paya, 2007) (Borda et al., 2010) (Kripka et al., 2013) (Kulkarni y Bhusare, 2016) (Mejía y Orozco, 2019), habiéndose comprobado que la consideración de la ISE modifica la distribución de solicitaciones de la superestructura en un porcentaje considerable (Chagoyén et al., 2010), además de que los cimientos representan un gran porcentaje dentro del costo de la estructura (Negrin, 2014) (Negrin, 2019). Por otra parte, diversos autores se enfocan en la optimización de los elementos aislados (Borda y Rodríguez, 2010) (Kulkarni y Bhusare, 2016), omitiendo la interacción entre estos. Otra limitación identificada es la optimización de pórticos planos (Paya, 2007) (Borda y Rodríguez, 2010) (Mejía y Orozco, 2019), ignorando la gran diferencia de solicitaciones que tienen estas estructuras con la gran mayoría de las estructuras reales espaciales. Existen trabajos donde se plantea que es más racional establecer más grupos de geometría (diferentes tipos de secciones) y diseño (Kripka et al., 2013), aunque se

<sup>1</sup> Autor de Correspondencia:

Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Villa Clara, CUBA  
E-mail: indiaz@uclv.cu



está obviando el criterio de facilidad constructiva, e, incluso existen metodologías enfocadas en obtener el menor peso de la estructura, comenzando el proceso con secciones pequeñas e ir aumentando las dimensiones, hasta que se cumplan los criterios de resistencia y rigidez, aunque se obtienen pobres resultados, como vigas de secciones cuadradas (Mejía y Orozco, 2019).

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Formulación matemática del problema de optimización estructural

La formulación matemática del problema de optimización resulta ser un paso fundamental en el proceso, ya que en este se define la o las funciones objetivos, las variables, las restricciones y los parámetros asignados.

#### 2.1.1 Definición de la función objetivo

La función objetivo depende, evidentemente, del criterio de optimización que se vaya a utilizar; el criterio seleccionado fue el de *mínimo costo total*, por lo que esta define el costo directo total de la estructura (Negrin, 2014) en función de los renglones variantes (PRECONS.II, 2008), quedando estructurada de la siguiente manera:

$$C_{total} = C_{vigas} + C_{col} + C_{cim} \quad (1)$$

Dónde:

$C_{total}$ : Costo total (\$).

$C_{vigas}$ : Suma de los costos de las vigas (\$).

$C_{col}$ : Suma de los costos de las columnas (\$).

$C_{cim}$ : Suma de los costos de las cimentaciones (\$).

Para el cálculo de cada uno de los costos directos de construcción de los elementos se tendrán en cuenta el encofrado, la elaboración y colocación del refuerzo longitudinal y transversal, la elaboración y colocación del hormigón, así como la excavación y el rehincho para el caso de las cimentaciones.

#### 2.1.2 Definición de las variables

Para esta investigación, las variables serán discretas ya que para realizar una optimización estructural más práctica, se deben obtener soluciones finales que sean factibles constructivamente (dimensiones múltiplos de 5, en cm), además de reducir notablemente el espacio de soluciones. Para el caso de estudio de esta investigación se definieron 20 variables, asociadas a las dimensiones de las secciones transversales (vigas y columnas), rectangularidad para los cimientos y resistencia a compresión del hormigón ( $f'c$ ) para los diferentes elementos.

#### 2.1.3 Identificación de las restricciones

Una parte esencial dentro de la formulación matemática de todo proceso de optimización lo constituyen las restricciones que habrá que imponer al problema en correspondencia con las exigencias de costo mínimos. Se conoce que las variables de diseño dependen de las restricciones, lo que hace que se limite el libre movimiento de estas en el proceso de optimización (Negrin, 2014). Las restricciones las dividiremos en dos grupos: implícitas y explícitas, y se diferencian en el papel que juegan dentro del proceso de optimización.

Las restricciones implícitas son las que se introducen dentro del algoritmo de solución, estas están asociadas fundamentalmente al cumplimiento de las condiciones impuestas por el diseño (ecuaciones de estado) mediante los estados límites (resistencia, rigidez).

Por su parte, las restricciones explícitas son fundamentalmente constructivas y limitan el intervalo de movimiento de las variables en el proceso de optimización, requisito obligatorio de los métodos de optimización utilizados en esta investigación. Todo lo descrito anteriormente se puede representar gráficamente en la (Figura 1).

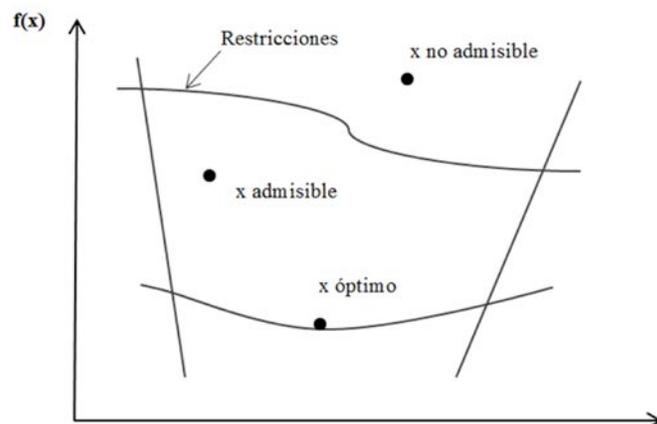


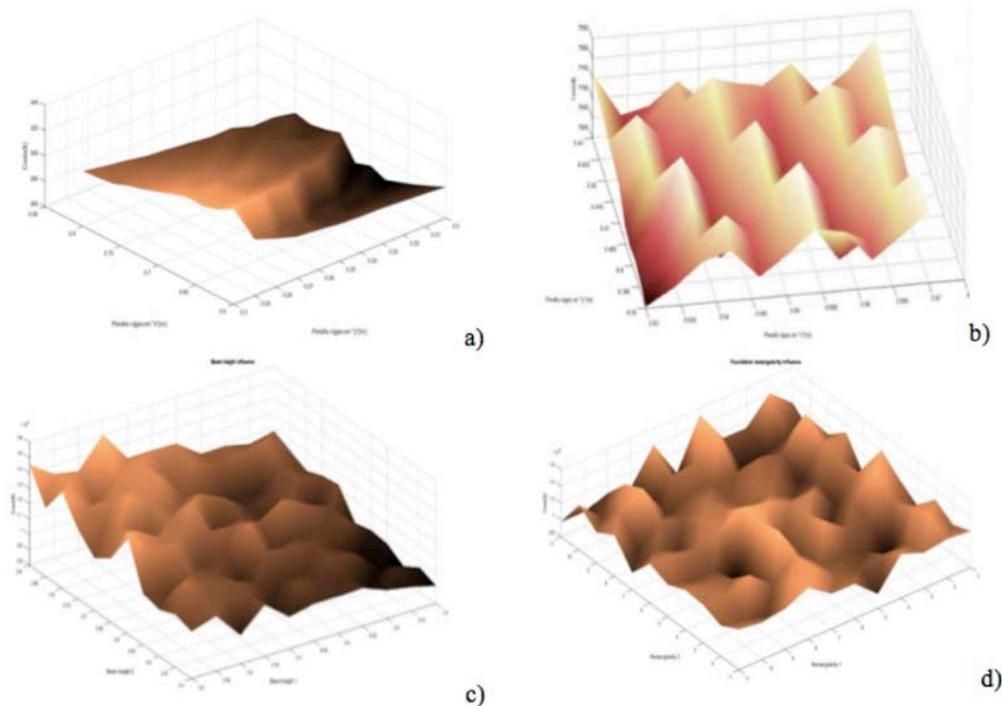
Figura 1. Representación gráfica del problema de optimización

### 2.1.4 Superficie de respuesta generada

La optimización estructural, debido a sus características especiales, genera funciones objetivo de gran complejidad, con la presencia de muchos óptimos locales. En la Figura 2 se observa una evolución de estas superficies de respuesta a través del desarrollo de este tipo de investigaciones en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.

Se puede apreciar que, con el aumento de la complejidad de la formulación del problema de optimización

(aumento del número de variables, utilización de variables discretas, inclusión de aspectos como llevar de área de cálculo a real, etc.) se generan superficies mucho más irregulares, inhabilitando el uso de los métodos clásicos de optimización, por lo que resulta necesario introducirse en el uso de métodos metaheurísticos, e incluso en la combinación de estos (hibridación), con el objetivo de lograr resultados satisfactorios en este proceso de búsqueda de los resultados óptimos.



**Figura 2.** Evolución de la superficie de respuesta generada en la optimización estructural: a) Superficie generada en (Negrin, 2016), b) superficie generada en (Medina, 2017), c) superficie generada en (Negrin, 2019), debido a la influencia del peralte de las vigas, d) superficie generada en (Negrin, 2019), debido a la influencia de la rectangularidad de los cimientos

## 2.2 Métodos heurísticos y metaheurísticos: GA y PSO

Un método metaheurístico es aquel que no utiliza metodología común y rigurosa para obtener un resultado. De manera general estos métodos dan un resultado aceptable en tiempo aceptable, además de su aplicabilidad cuando se presenta una función objetivo con múltiples óptimos locales o cuando estas funciones están compuestas por intervalos continuos y discretos. (Cujía, 2010)

### 2.2.1 Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos son una herramienta utilizada para la resolución de problemas de optimización.

Están basados en la selección natural, una analogía con el proceso que gobierna la evolución biológica. Los GA modifican sistemáticamente una población de individuos, en cada paso, el algoritmo selecciona algunos individuos para que se conviertan en “padres” y generen los “hijos” de la siguiente generación. A través de sucesivas generaciones la población evoluciona hacia una solución óptima (Figura 3). La principal ventaja que ofrece es que puede utilizarse en una gran variedad de problemas donde los métodos clásicos de optimización no se desenvuelven bien, entre ellos problemas con funciones objetivo discontinuas, no diferenciables, estocásticas o altamente no lineales. (Paya, 2007).

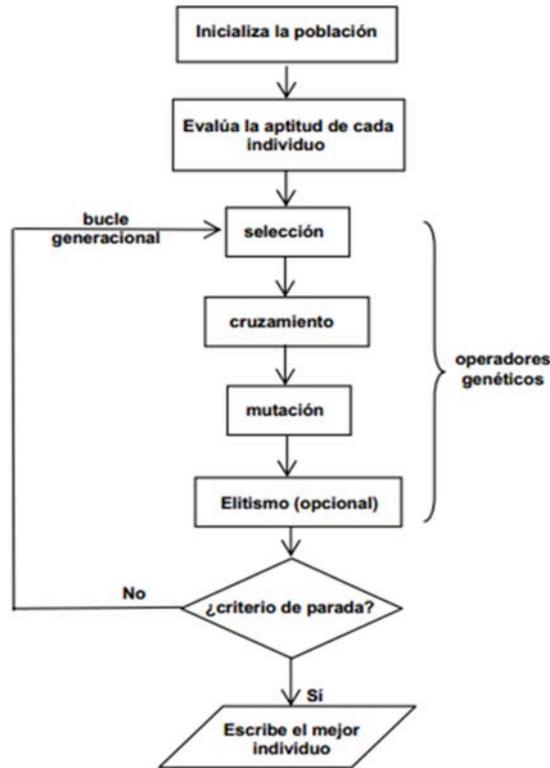


Figura 3. Diagrama de un GA simple. (Paya, 2007)

### 2.2.2 Optimización por enjambre de partículas

La optimización por enjambre de partículas es una técnica metaheurística inspiradas en el comportamiento social del vuelo de las bandadas de aves o el movimiento de los bancos de peces. Se fundamenta en los factores que influyen en la toma de decisión de un agente que forma parte

de un conjunto de agentes similares. La toma de decisión por parte de cada agente se realiza conforme a una componente social y una componente individual, mediante las que se determina el movimiento (dirección) de este agente para alcanzar una nueva posición en el espacio de soluciones (Figura 4a). (García, 2006).

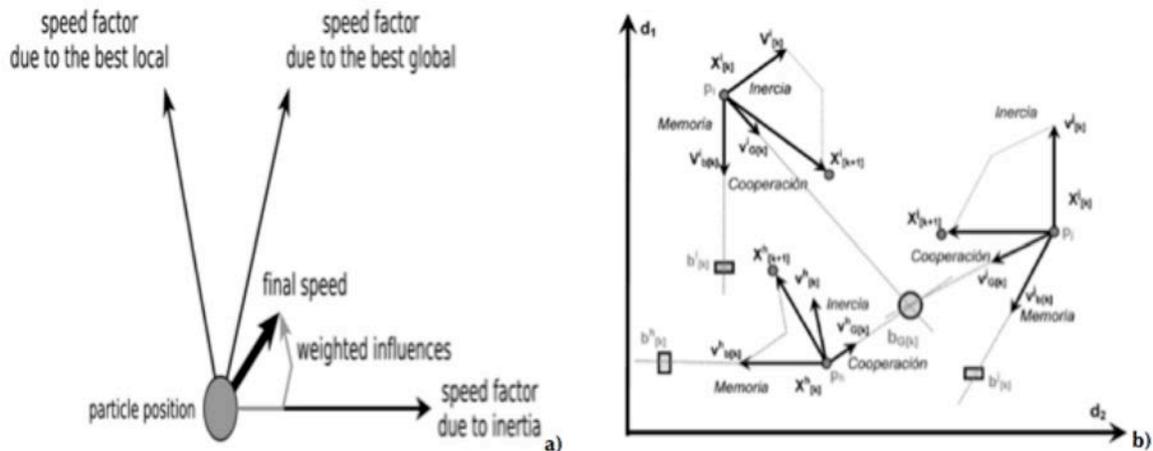


Figura 4. Representación gráfica de la metodología general de PSO, a) Movimiento de las partículas, b) Interacción entre partículas (Sancho, 2016)

Este método trabaja con una población (llamada *nube* o *enjambre*) de soluciones candidatas (llamadas *partículas*). Dichas partículas se desplazan a lo largo del espacio de búsqueda conforme unas simples reglas matemáticas. El movimiento de cada partícula depende de su mejor posición obtenida, así como de la mejor posición global hallada en

todo el espacio de búsqueda. Además, es un sistema multi-agente, es decir, las partículas son agentes simples que se mueven por el espacio de búsqueda y que guardan, y comunican la mejor solución que han encontrado (Figura 4b). (García, 2006).

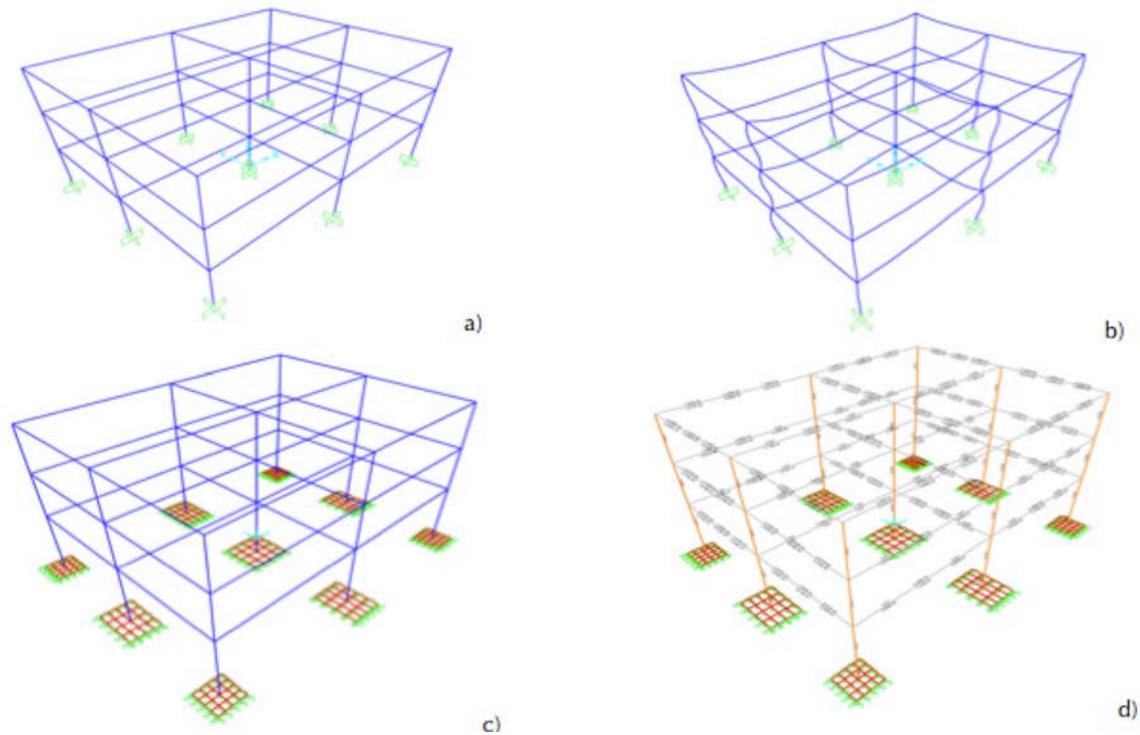


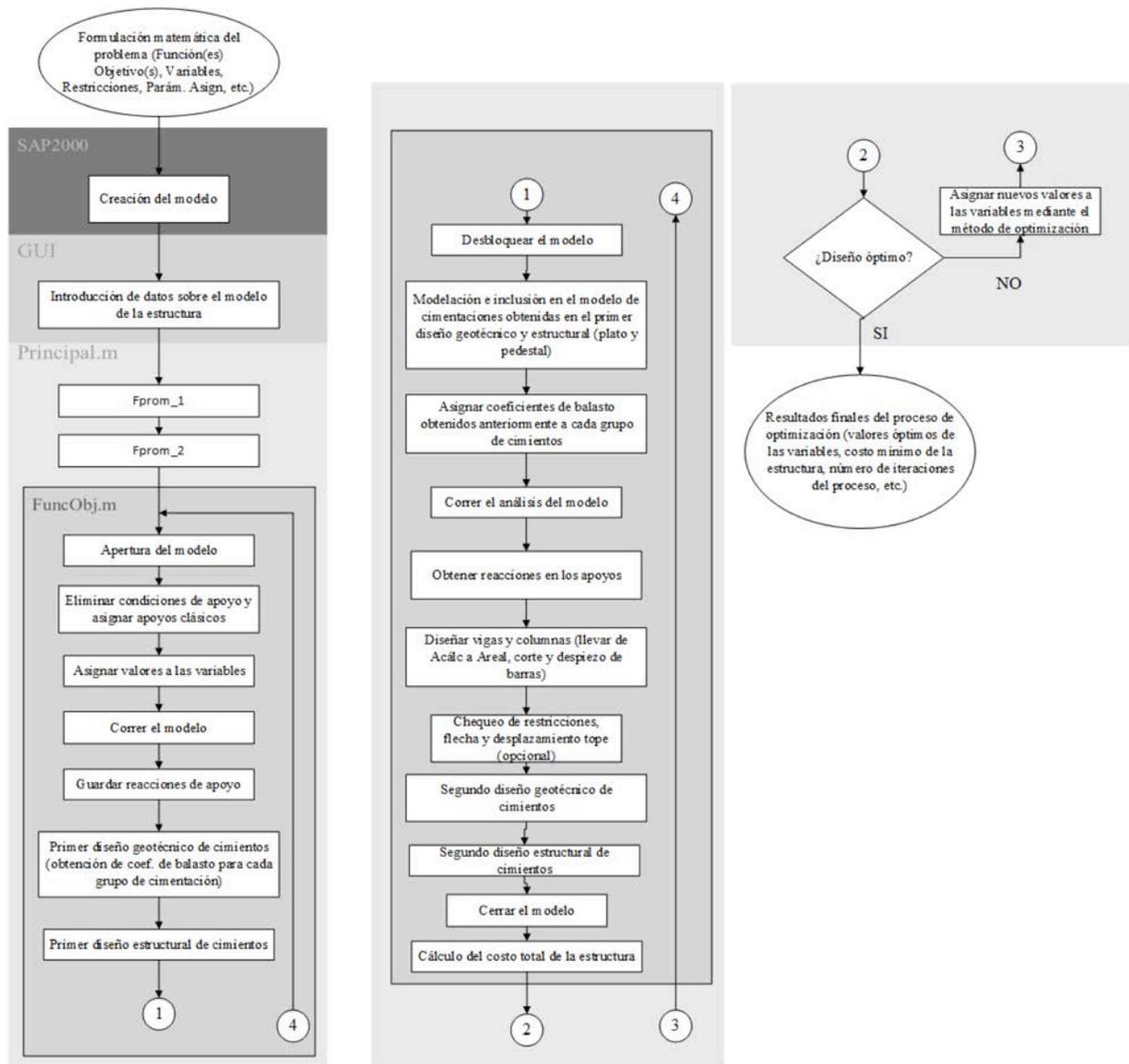
Figura 5. Pasos principales de cada conteo de función: a) Paso 1, b) Paso 2, c) Paso 3 y d) Paso 4

### 2.3 Algoritmo de solución al problema de optimización vía CSi API

La metodología que se propone es completamente automatizada, ya que está programada sobre la base de las funciones CSi API SAP2000-MATLAB, las cuales permiten vincular un lenguaje de programación (MATLAB R2015a) con el software de modelación, análisis y diseño estructural (SAP2000v19). De forma general, cada ciclo o conteo de función (evaluar una serie determinada de valores de las variables) se puede dividir en cuatro pasos fundamentales

(ver Figura 5), los cuáles están compuestos y complementados con otros sub-pasos dentro de estos, (ver diagrama en Figura 6), o fuera, como es el caso de Fprom\_1 y Fprom\_2, que están previos al proceso de optimización, siguen los mismos pasos de la (Figura 5), y se utilizan para compatibilizar el modelo con el algoritmo y para obtener el costo promedio de la estructura, utilizado para la penalización de la función objetivo en caso de no cumplirse algunas restricciones implícitas.





**Figura 6.** Diagrama de flujo general para el algoritmo de solución al problema de diseño óptimo de conjuntos estructurales vía CSi API

Los cuatro pasos fundamentales de cada conteo de función son:

Paso 1: Se abre el modelo, se colocan los apoyos clásicos (empotramiento o articulación) y se asignan los nuevos valores de las variables (dimensiones de las secciones transversales, etc.).

Paso 2: Se ejecuta el análisis y se guardan las reacciones de apoyo para después realizar el 1er diseño geotécnico y estructural de los cimentos (Quevedo, 2000), además del cálculo del coeficiente de balasto ( $k$ ) para cada uno de los grupos de cimentación (Chagoyén et al., 2018).

Paso 3: Se eliminan los apoyos clásicos y se introducen los cimentos (plato y pedestal) calculados

anteriormente, así como el coeficiente  $k$  para modelar la ISE (Chagoyén et al., 2018).

Paso 4: Se vuelve a ejecutar el análisis y se diseñan todos los elementos (vigas, columnas y cimentos) para proceder al cálculo de los costos directos de construcción de toda la estructura.

Este procedimiento se repite tantas veces como el algoritmo de optimización necesite para encontrar la mejor solución, así que dicho algoritmo es el que gobierna el proceso, asignando nuevos valores a las variables en dependencia de su funcionamiento y de los resultados que se vayan obteniendo. Recordar que la metodología propuesta incluye la ISE y la optimización del diseño de las cimentaciones como se ha explicado anteriormente.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Optimización del proyecto Casa Síndico

El proyecto Casa Síndico constituye una estructura real, la cual presenta una complejidad estructural elevada, compuesta por elementos estructurales de diferente tipología. Además, esta presenta las plantas con una distribución

asimétrica, lo cual introduce características especiales a la respuesta de los elementos ante las solicitaciones (ver Figura 7). De forma general, se van a optimizar 116 vigas, 99 columnas y 23 cimientos.

Los resultados se dividen en dos grupos fundamentales: rendimiento de los métodos de optimización y estructurales.

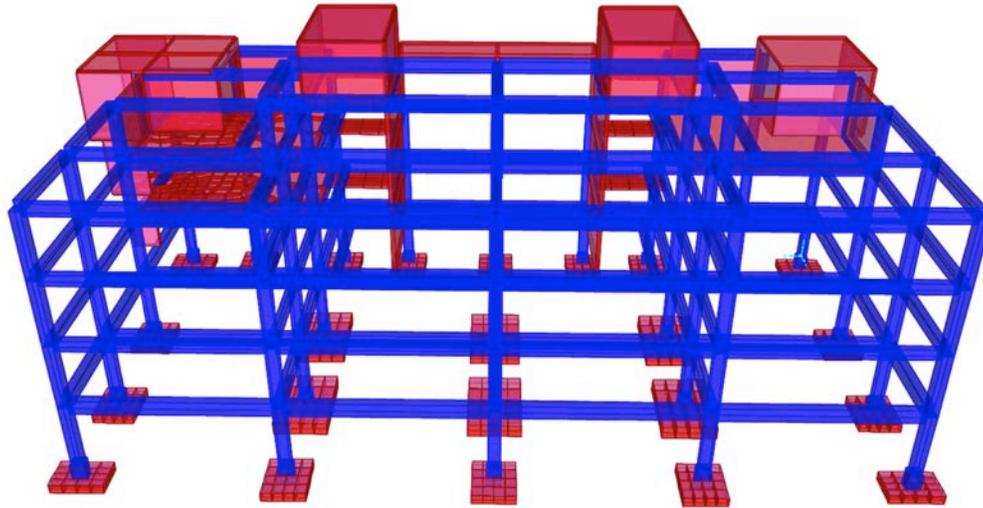


Figura 7. Modelo del proyecto Casa Síndico

#### 3.1.1 Resultados asociados al rendimiento de los métodos de optimización

En este epígrafe se comparan los resultados al aplicar los métodos simples a un modelo ficticio, similar al de la Figura 5, más sencillo que el caso de estudio principal, con el

objetivo de encontrar la mejor variante para enfrentarse a la optimización de un modelo mucho más complejo. Para estas pruebas de optimización se utilizan 4 tipos de suelo, para dar diversidad al estudio, utilizando la metodología de GA y PSO simple.

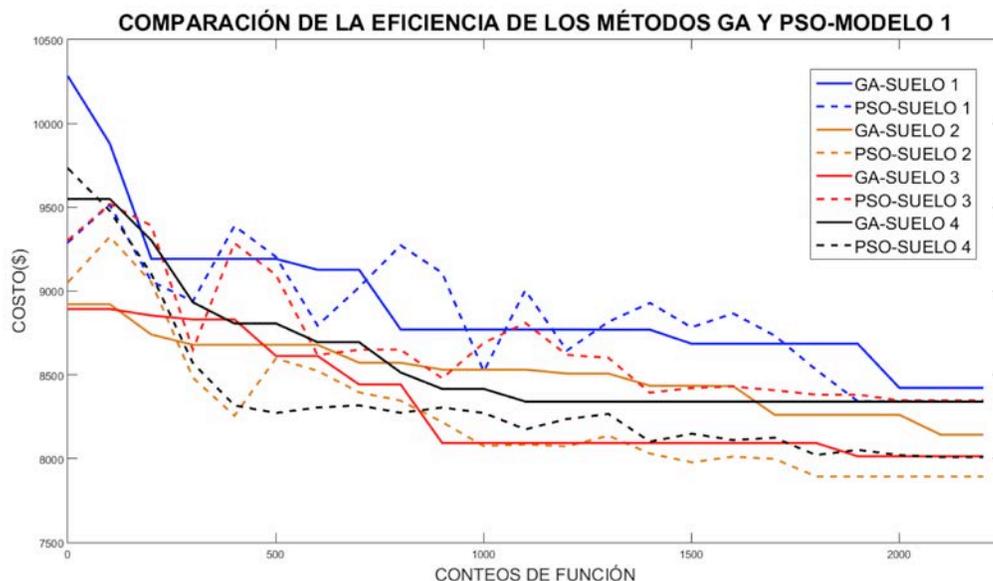
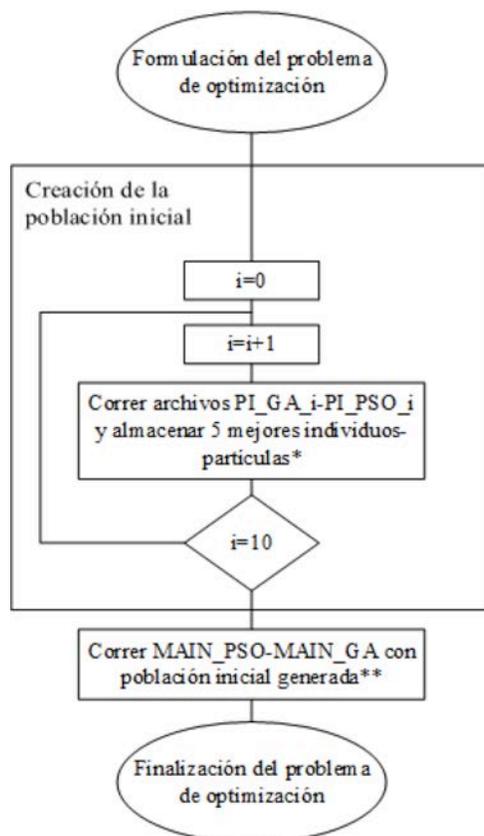


Figura 8. Comparación entre GA y PSO para su metodología simple en la optimización de un modelo ficticio para cuatro tipos de suelos



En la Figura 8 se puede apreciar la superioridad de PSO sobre GA, obteniendo mejores resultados en tres de las cuatro pruebas realizadas para cada uno. De todas maneras, los resultados no eran estables, lo cual nos llevó a preguntarnos si estos métodos, con su metodología simple, eran eficientes en la optimización de estos tipos de problemas. Para verificar esta afirmación, se proponen dos métodos compuestos basados en la generación de una

población-enjambre inicial, por parte de una de las dos metodologías simples, para brindársela a la otra, y que esta termine el proceso de optimización (ver diagrama en Figura 9). Esto, aunque conlleva a un aumento del tiempo computacional, garantiza una búsqueda más exhaustiva por el espacio de soluciones, disminuyendo la posibilidad de que el método se encierre en un óptimo local.



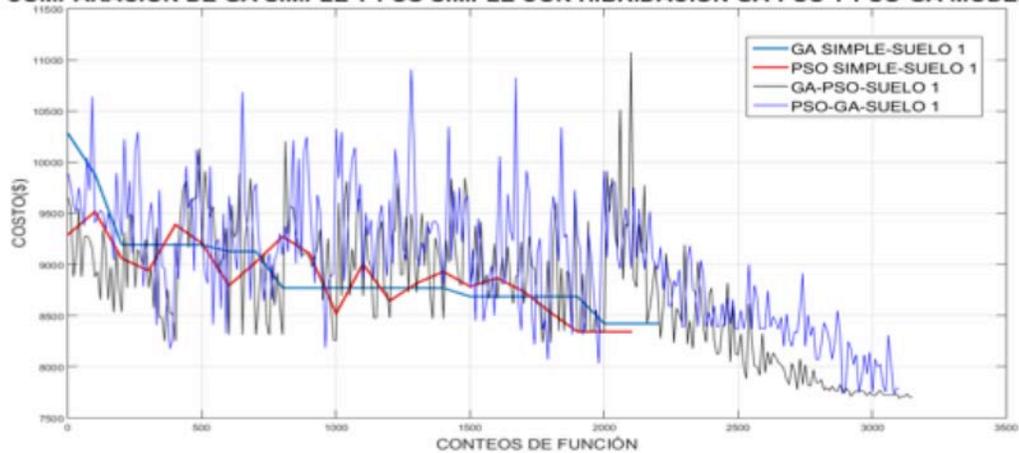
**Figura 9.** Diagrama de flujo del método compuesto propuesto, \* y \*\* se refiere a que si se utiliza GA simple para crear la población inicial, se optimiza el proceso mediante PSO simple, y viceversa

Señalar en este diagrama que PI\_GA\_i o PI\_PSO\_i representan los 10 scripts que se ejecutan para realizar la búsqueda de los 50 mejores puntos (5 por corrida) por el espacio de soluciones, y se colocan los dos debido a que esta búsqueda se puede efectuar utilizando uno u otro método, terminando la optimización con el otro método con que no se realizó la búsqueda.

Al aplicar los dos métodos compuestos se observa, que, efectivamente, las metodologías simples de GA y PSO no son del todo eficientes en la optimización de este tipo de procesos (ver Figura 10). Se puede apreciar que el método de mejor rendimiento resultó ser el que utiliza GA para crear la población inicial para PSO (línea negra en la Figura 9), obteniendo resultados hasta un 10 % más económicos que

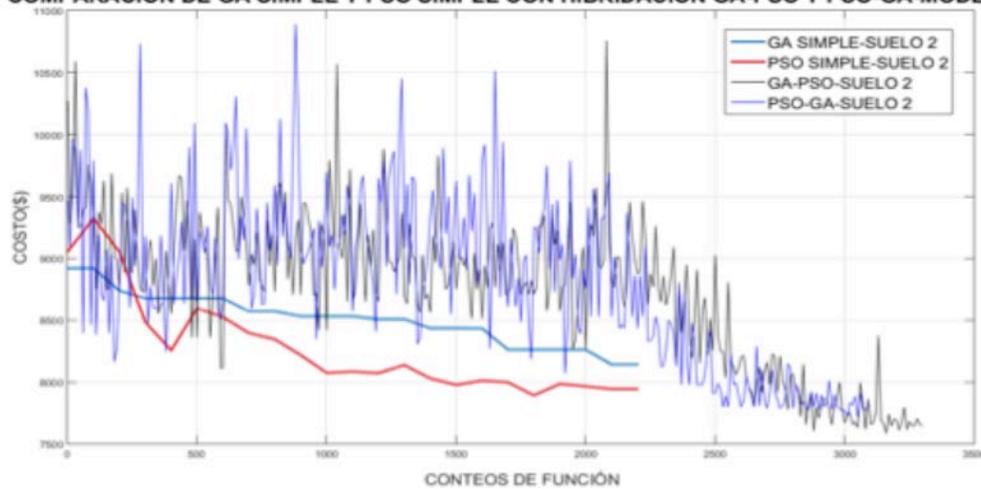
los métodos simples, aunque en este caso no se denomina “población inicial”, sino “enjambre inicial”, ya que PSO no trabaja con “poblaciones”, sino con “enjambres”. Se debe destacar que la aparente tendencia más desorganizada o convulsa que presentan los métodos compuestos se debe a que, para graficar estos procesos, se establecen intervalos de conteos de función, y se grafica el mejor punto encontrado, utilizando para los métodos simples, intervalos de 100 puntos, y para los compuestos intervalos de 10, lo cual, en el caso de los últimos, reduce la posibilidad de graficar el resultado de los mejores valores encontrados, además de que, evidentemente, este procedimiento de graficado no influye en el resultado final.

COMPARACIÓN DE GA SIMPLE Y PSO SIMPLE CON HIBRIDACIÓN GA-PSO Y PSO-GA-MODELO 1



a)

COMPARACIÓN DE GA SIMPLE Y PSO SIMPLE CON HIBRIDACIÓN GA-PSO Y PSO-GA-MODELO 1



b)

Figura 10. Comparación entre GA y PSO simples con los dos métodos propuestos, a) Modelo 1-Suelo 1, b) Modelo 1-Suelo 2

### 3.1.1 Resultados estructurales

En este epígrafe se exponen los resultados estructurales obtenidos. Señalar, que para la representación de estos, se seleccionan los grupos más significativos, aunque, al colocar los costos si se tienen en cuenta todos los elementos.

En el caso de las vigas, solo se mostrarán los

resultados correspondientes a los grupos de diseño 1, 2 y 6 por ser los más representativos (Tabla 1). El grupo de diseño 1 corresponde a las vigas interiores de 7 m de luz, el 2 a las exteriores de esa misma luz y el 6 a las vigas de 6 m de luz. Aquí se exponen las dimensiones de la sección transversal de cada grupo  $h*b$  (m), así como la distribución del refuerzo longitudinal positivo y negativo (Ref. +, Ref. -).



**Tabla 1.** Comparación de resultados al realizar el diseño sin optimizar y optimizado para los grupos de diseño 1, 2 y 6

| MODELO CASA SÍNDICO | Grupos de diseño para diseño optimizado |         |         | Sin optimizar | Optimizado |
|---------------------|---|---------|---------|---------------|------------|
|                     |   |         |         |               |            |
|                     | 1                                       | h*b (m) |         | 0.5*0.3       | 0.4*0.25   |
|                     |   | Ref. +  |         | 5Ø16          | 5Ø16       |
|                     |   | Ref. -  |         | 8 Ø16         | 9 Ø16      |
|                     | 2                                       | h*b (m) |         | 0.5*0.3       | 0.4*0.25   |
|                     |   | Ref +   |         | 5Ø16          | 4 Ø13      |
|                     |   | Ref -   |         | 8 Ø16         | 4 Ø19      |
| 6                   | h*b (m)                                 |         | 0.5*0.3 | 0.4*0.25      |            |
|                     | Ref +                                   |         | 4 Ø16   | 3 Ø16         |            |
|                     | Ref -                                   |         | 4 Ø16   | 5Ø16          |            |

Un aspecto interesante es lo que ocurre en los grupos de diseño 2 y 6, donde se obtiene una disminución de la sección transversal de los elementos y del área de refuerzo longitudinal (positivo fundamentalmente) a la misma vez, evidenciando que la optimización se debe efectuar al conjunto estructural completo, ya que así se puede realizar una redistribución más racional de las solicitaciones, o sea, que las variaciones provocadas en un elemento no solamente lo afectan a él, sino a todo el conjunto.

En la Tabla 2 se puede apreciar la comparación de resultados de longitud de los elementos dividido el peralte óptimo obtenido ( $L/h_{\text{ópt}}$ ) la cuantía geométrica óptima ( $\rho_{\text{geom-ópt}}$

$\rho_{\text{pt}}=A_s/h*b$ ) para el refuerzo positivo y negativo, la resistencia a compresión del hormigón ( $f'_c$ ) para las vigas más representativas (luz de 6 y 7 m), así como el costo total de las vigas sin optimizar y optimizando el diseño.

Se puede observar que optimizando el diseño del modelo se obtiene una reducción del costo directo de las vigas en un 13.35 %. De forma general se puede deducir que el elemento fundamental de la reducción de los costos es la disminución de los peraltos (y el aumento de la relación  $L/h$ ), aunque esto acarree un aumento de las cuantías geométricas del refuerzo longitudinal.

**Tabla 2.** Comparación de resultados de  $L/h_{\text{ópt}}$ ,  $\rho_{\text{geom-ópt}}$  y  $f'_c$  para las vigas de 6 y 7m de luz y del costo total de las vigas de los diseños optimizados y sin optimizar

| MODELO CASA SÍNDICO | $L/h_{\text{ópt}}$                  | L=7m |          | Sin optimizar | Optimizado |
|---------------------|-------------------------------------|------|----------|---------------|------------|
|                     |                                     |      |          |               | 14         |
|                     |                                     | L=6m |          | 12            | 15         |
|                     | $\rho_{\text{geom-ópt}}$ (%)        | L=7m | Ref +    | 0.66          | 0.99       |
|                     |                                     |      | Ref -    | 1.06          | 1.79       |
|                     |                                     | L=6m | Ref +    | 0.53          | 0.99       |
|                     |                                     |      | Ref -    | 0.53          | 1.55       |
|                     | $f'_c$ (MPa)                        |      | 25       | 35            |            |
|                     | Costo total de todas las vigas (\$) |      | 13608.69 | 11791.34      |            |

Un aspecto interesante, es el uso de un hormigón de 35 MPa para las vigas, lo cual está en contra de los resultados obtenidos en otras investigaciones, pues los elementos sometidos a flexión no necesitan hormigones de altas resistencias a compresión. Este resultado se puede explicar por la gran asimetría del modelo, lo cual produce un incremento de los asentamientos diferenciales de los cimientos debido a la diferencia de solicitaciones a los que están sometidos los cimientos de un mismo grupo (mismas dimensiones), por lo que el elemento rigidizador vertical de

la estructura resultan las vigas y hormigones de más calidad garantizan más rigidez ( $E = 4700\sqrt{f'_c}$ ).

En el caso de las columnas, en la Tabla 3 se resume el resultado del diseño sin optimizar y optimizado para los tres principales grupos de diseño establecidos (interiores, exteriores y esquina), expresado en la rectangularidad de la sección transversal en función de la relación Luz/Intercolumnio para los tres tipos fundamentales de grupos, así como el uso de  $f'_c$  y el costo directo total de construcción.

Esta relación luz/intercolumnio está relacionada con la relación de longitudes de las vigas que convergen a las columnas, y por tanto, expresa de cierta manera en que dirección aparece más flexión, ya que, a mayor longitud de la

viga, más sollicitación se transmite. Además, destacar que se pone solo la relación más grande a las que se someten todas las columnas, ya que son estas, en última instancia, las que ofrecen combinaciones de sollicitaciones más críticas.

**Tabla 3.** Comparación de resultados estructurales de las columnas para el diseño optimizado y sin optimizar.

|                     |  | Luz/Intercolumnio |                             | Sin optimizar | Optimizado |
|---------------------|--|-------------------|-----------------------------|---------------|------------|
| MODELO CASA SÍNDICO | Interiores                             | 0.73              | Rectangularidad (DimX/DimY) | 1.00          | 0.7        |
|                     | Exteriores                             | 1.85              | Rectangularidad (DimX/DimY) | 1.00          | 1.33       |
|                     | Esquina                                | 1.85              | Rectangularidad (DimX/DimY) | 1.00          | 1.33       |
|                     | f'c (MPa)                              |                   |                             | 25            | 35         |
|                     | Costo total de todas las columnas (\$) |                   |                             | 6211.42       | 5332.5     |

Se puede apreciar, con la optimización del diseño del modelo, que la principal diferencia radica en el uso de columnas rectangulares sobre las cuadradas. En el caso de las interiores, la rectangularidad queda en la dirección de "y", esto se debe a la asimetría de la planta y la presencia de flexión en esos elementos en esta dirección. En el caso de las exteriores y esquina, la dimensión mayor queda en la dirección de la mayor longitud de las vigas (7 m en la

dirección de "x"), por lo que la flexión predomina, para estos elementos en esa dirección. Para este caso, el hormigón de mejor prestación es el de 35 MPa, quedando un ahorro total en los costos directos totales de las columnas de un 14.15 %.

Para los cimientos, al igual que en las columnas, el principal elemento a comparar es la rectangularidad, como se aprecia en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Comparación de resultados estructurales de los cimientos para el diseño optimizado y sin optimizar, enfocados en la rectangularidad de estos

|                     |                                   | Luz/Intercolumnio |                       | Sin optimizar | Optimizado |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------|------------|
| MODELO CASA SÍNDICO | Interiores                        | 0.73              | Rectangularidad (L/B) | 1             | 0.7        |
|                     | Exteriores                        | 1.85              | Rectangularidad (L/B) | 1             | 1.2        |
|                     | Esquina                           | 1.85              | Rectangularidad (L/B) | 1             | 1.4        |
|                     | f'c (MPa)                         |                   |                       | 25            | 20         |
|                     | Costo total de los cimientos (\$) |                   |                       | 5669.35       | 5048.35    |

Aquí ocurre algo muy parecido a las columnas, donde las rectangularidades están condicionadas por la asimetría de la planta, sobre todo en los cimientos interiores, los demás grupos de elementos quedan con la rectangularidad en dirección de las vigas con mayores luces, al igual que en las columnas. Para este caso, el hormigón óptimo resultó ser el de 20 MPa, lo lógico para elementos que trabajan a flexión fundamentalmente obteniéndose un ahorro del 10.95 %.

De forma general, al aplicar la herramienta, se reducen los costos directos de construcción de las vigas, columnas y cimientos de \$ 25489.46 a \$ 22172.19, lo cual representa un 13% de ahorro, validando el uso de la metodología propuesta. Además, estas estructuras presentan respuestas más eficientes ante las cargas impuestas, ya que, con la optimización del conjunto, los elementos buscan una configuración más racional y efectiva para enfrentarse a las sollicitaciones a las que se someten.



## 4. Conclusiones

La metodología de optimización estructural propuesta está programada sobre la base de las funciones CSi API SAP2000-MATLAB, y unifica varios criterios usualmente ignorados por los proyectistas e investigadores. Para estos procesos, PSO muestra un comportamiento superior a GA, aunque ninguno de los dos ofrece los mejores resultados utilizando sus metodologías simples. Realizando una hibridación entre estos, utilizando GA para generar un enjambre inicial para que PSO realice el proceso de optimización, se obtuvieron resultados de hasta un 10 % más económicos. En cuanto a los resultados estructurales, para los costos actuales de Cuba, se recomienda utilizar vigas con peraltos de relación L/h entre 15 y 17.5, a costa de un aumento de la cuantía geométrica de acero hasta un 1 % para el refuerzo positivo y hasta un 1.8 % para el negativo; para las columnas exteriores y esquina se recomienda utilizar secciones rectangulares en la dirección de la mayor luz de las

vigas que concurren a estas, mientras que para las interiores, se recomienda secciones cuadradas, a no ser que la planta de la edificación presente una gran asimetría entre locales continuos; en el caso de los cimientos, para la rectangularidad de estos, se recomienda lo mismo que en las columnas. De forma general, al aplicar la metodología se pudo obtener un ahorro del 13 % en los costos directos de construcción, validando su uso.

## 5. Agradecimientos

En los proyectos SI-VLIR "Computational Techniques for Engineering Applications" y TEAM-VLIR "Vibration Assessment of Civil Engineering Structures", se desarrollaron cursos de posgrado sobre métodos numéricos, optimización, dinámica estructural y otras temáticas afines, además se brinda la posibilidad de utilizar los software para alcanzar estos resultados. A todos los participantes nuestro sincero reconocimiento y agradecimiento.

## 6. Referencias

- Borda, J. L.; Rodríguez, G. (2010)** Optimización de secciones transversales de pórticos de hormigón armado mediante uso de la técnica de programación cuadrática secuencial SQP. *Mecánica Computacional Vol XXIX*, pp. págs. 9719-9738.
- Carretero, F. (2010)** Optimización global con algoritmos genéticos. (Tesis de grado). Barcelona: Escuela Politécnica Superior de Catalunya.
- Chagoyén, E. L., Negrin, I. A., Negrin, A., Napoles, J. (2018)** Modelo de base deformable no lineal para interacción suelo estructura en el diseño óptimo de conjuntos estructurales. La Habana, 19 Convención Internacional de Ingeniería y Arquitectura. IV Congreso Internacional de Ingeniería Civil.
- Chagoyén, E.L. José, H. J., Pérez, R. (2010)** Influencia de distintos factores en la modelación, análisis y diseño automatizado de estructuras de hormigón. Santa Clara, IX Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción.
- Cujía, Y. D. (2010)** Computación en paralelo aplicada a la optimización del diseño estructural: estado del arte. (Tesis de grado). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- García, J. M. (2006)** Algoritmos basados en cúmulos de partículas para la resolución de problemas complejos. (Tesis de grado). Málaga: Universidad de Málaga.
- Kripka, M., Medeiros, G. F., Lemonge, A. C. (2013)** Structural Optimization of Reinforced Concrete Building Grillages considering Cardinality Constraints. Orlando, Florida, USA, 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization.
- Kulkarni, A. R., Bhusare, V. (2016)** Structural Optimization of Reinforced Concrete Structures. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ISSN: 2278-0181, Vol. 5 Issue 07, pp. 123-127.
- Medina, M. (2017)** Interfaz en MATLAB para la optimización de conjuntos estructurales. (Tesis de grado). Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- Mejía, W. A., Orozco, J. E. (2019)** Optimización en el diseño estructural de pórticos de concreto usando SAP2000. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, pp. 98-104.
- Negrin, I. (2016)** Optimización de conjuntos estructurales considerando los factores usualmente ignorados en la modelación usando la OAPI SAP2000-MatLab. s.l.:(Tesis de grado). Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas..
- Negrin, I. (2019)** Herramienta para el diseño óptimo de conjuntos estructurales "DOCE". Aplicaciones. (Tesis de maestría). Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas..
- Negrin, A. (2014)** Optimización de conjuntos estructurales de edificios aporricados de hormigón armado. (Tesis de Maestría). Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- Paya, I. (2007)** Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado. (Tesis doctoral). Valencia: Universitat Politècnica de València.
- PRECONS.II (2008)** Precios para la construcción. PRECONS II. Editorial Obras.
- Quevedo, G. (2000)** Propuesta de Norma Cubana para el Diseño Geotécnico de Cimentaciones Superficiales. Santa Clara: Facultad de Construcciones UCLV.
- Sancho, F. (2016)** PSO: Optimización por enjambre de partículas. [Online] Available at: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=70>