

OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL PARA ENSAYO DE CALIFICACIÓN SÍSMICA

STRUCTURAL OPTIMIZATION FOR SEISMIC QUALIFICATION TEST

**Martín Domizio^{a,b}, Hernán Garrido^{a,b}, Ramón Codina^{a,b}, Fernanda de Borbón^{a,b} y
Daniel Ambrosini^{a,b}**

^a *Área de Dinámica Experimental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Parque General San Martín – 5500, Mendoza, Argentina, mndomizio@gmail.com.*

^b *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET.*

Palabras clave: Optimización estructural, Algoritmo genético, Propiedades dinámicas.

Resumen. En el presente trabajo se estudia la optimización de una estructura auxiliar utilizada en el ensayo de calificación sísmica del primer sistema de extinción del reactor CAREM25. Para realizar un ensayo de vibraciones forzadas que permita calificar sísmicamente el mecanismo, es necesario diseñar una estructura auxiliar que represente el comportamiento dinámico de la estructura de soporte real del mecanismo, denominada Barrel. Como condicionante de diseño se contempla también la masa total de la estructura auxiliar, denominada mock-up del Barrel, de modo tal que sea posible realizar el ensayo del mecanismo en escala real. Las secciones transversales de los elementos que componen el mock-up del Barrel y las dimensiones de su geometría global fueron definidas mediante un algoritmo de optimización evolutivo, utilizando una función objetivo que tiene en cuenta las condiciones de diseño mencionadas. De este modo se evalúa en este trabajo la eficiencia que es posible alcanzar con la optimización estructural planteada.

Keywords: Structural optimization, Genetic algorithm, Dynamic properties.

Abstract. This work studies the optimization of an auxiliary structure used in the seismic qualification test of the first extinction system of the CAREM25 reactor. In order to perform a forced vibration test that allows the seismic qualification of the aforementioned system, it is necessary to design an auxiliary structure that represents the dynamic behavior of the real support structure of the system mechanism, called Barrel. As a design condition, the total mass of the auxiliary structure, called Barrel mock-up, is also considered, so that it is possible to perform the test of the mechanism in real scale. The cross sections of the elements that compose the Barrel mock-up and the dimensions of its global geometry were defined by means of an evolutionary optimization algorithm, using an objective function that takes into account the aforementioned design conditions. In this way, the efficiency that can be achieved with the proposed structural optimization is evaluated in this work.

1 INTRODUCCION

En la actualidad, un diseño estructural confiable, eficiente y funcional puede alcanzarse utilizando diversos algoritmos de optimización. En particular, cuando las variables de diseño son discretas, o se definen funciones objetivos con una gran cantidad de mínimos locales o con un gradiente de difícil evaluación, los algoritmos metaheurísticos representan una alternativa atractiva (Saka et al., 2016). A pesar de que se han propuesto numerosos algoritmos metaheurísticos orientados a la optimización estructural de manera relativamente reciente (Gandomi and Roke, 2015; Gholizadeh and Ebadijalal, 2018; Gonçalves et al., 2015; Kaveh and Ilchi Ghazaan, 2017; Tejani et al., 2019), los algoritmos genéticos siguen siendo ampliamente utilizados (Abd Elrehim et al., 2019; Di Trapani et al., 2020; Gentils et al., 2017; Ghorbani et al., 2018; Papavasileiou and Charmpis, 2016).

En el presente trabajo se utiliza un algoritmo genético para optimizar el diseño de una estructura auxiliar empleada en el ensayo de calificación sísmica del Primer Sistema de Extinción (PES) del reactor CAREM25 (Marcel et al., 2017). En este ensayo de vibraciones forzadas, un sistema de actuación debe imponer una acción dinámica sobre el PES simulando un evento sísmico determinado. En la condición real de actuación del mecanismo que compone la cadena cinemática del PES existen múltiples puntos de vinculación con la estructura que lo soporta horizontalmente, denominada Barrel. Durante un evento sísmico estos múltiples puntos de soporte tienen desplazamientos horizontales relativos entre sí, por lo que para una correcta calificación sísmica del sistema es necesario poder reproducir de la manera más fiel posible los desplazamientos horizontales del Barrel. La manera en la que este punto es tenido en cuenta en el proceso de optimización, así como la resolución del mismo y el análisis de resultados son detallados en el desarrollo del presente trabajo.

2 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

2.1 Descripción del problema

La realización del ensayo de calificación sísmica descrito en la sección previa requiere que las partes fijas de la cadena cinemática del PES estén vinculadas a una estructura con características dinámicas análogas a la del Barrel del reactor. Debido a esto, la estructura empleada en el ensayo que cumple esta función se denomina mock-up del Barrel. Para el diseño del mock-up del Barrel se adopta una tipología estructural que se presenta en la Figura 1-a, donde una estructura reticulada a optimizar se vincula a un tubo central que contiene los elementos de la cadena cinemática que son el objeto de la calificación sísmica.

La geometría del Barrel real se presenta en la Figura 1-b, y consiste en un cilindro hueco de acero, que contiene en su interior a los elementos de la cadena cinemática y el núcleo de reactor. A los efectos de la optimización de la estructura del mock-up, se considera al Barrel empotrado en su extremo superior, mientras que en el extremo inferior del Barrel se encuentra un elemento que tiene como función limitar los desplazamientos laterales. Debido a esto surgen dos condiciones de vínculo en el extremo inferior, siendo libre en la primera de ellas (condición de vínculo A), y fijo en la segunda (condición de vínculo B).

Los desplazamientos de los modos fundamentales obtenidos de un modelo de elementos finitos del Barrel con las dos condiciones de vínculo mencionadas se presentan en la Figura 2, siendo las frecuencias fundamentales de 7,19 Hz para la condición de vínculo A y de 22,20 Hz para la condición de vínculo B.

Los parámetros a optimizar de la estructura del mock-up del Barrel son entonces al ancho b y el número de divisiones verticales indicadas en la Figura 1, así como las secciones de los elementos estructurales con secciones S1 a S4 indicadas en la Figura 3. El tubo principal ubicado en el centro del reticulado del mock-up del Barrel tiene un diámetro nominal de

250 mm y un espesor de 9.27 mm, habiendo sido considerado dentro de los elementos estructurales del modelo numérico. A la masa de los elementos estructurales se adicionó de manera distribuida una masa de 1400 kg, correspondiente a los elementos contenidos dentro del tubo y otros accesorios que no aportan rigidez al conjunto.

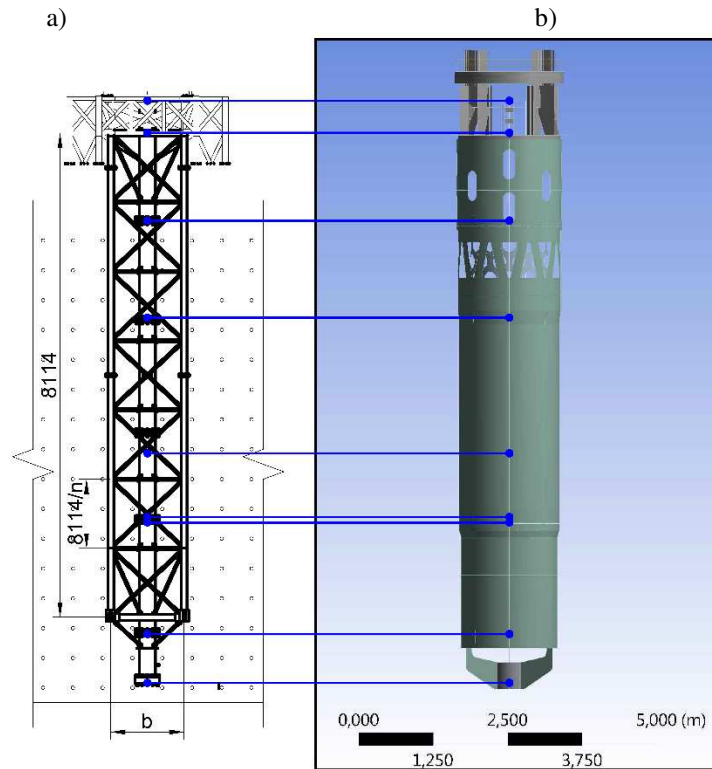


Figura 1: Geometría de: a) mock-up del barrel, b) barrel.

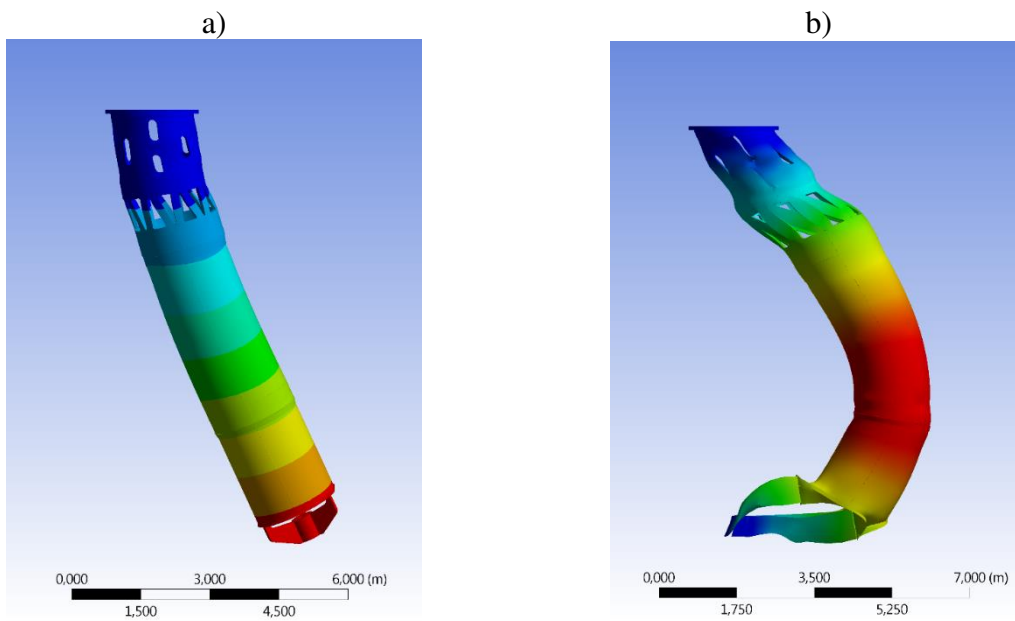


Figura 2: Desplazamientos modales de: a) Barrel con condición de vínculo A, b) Barrel con condición de vínculo B.

El modelo numérico utilizado para determinar las propiedades dinámicas de la estructura durante el proceso de optimización fue realizado en entorno de Matlab (2019), utilizando elementos de barra de 2 nodos y de 6 grados de libertad por nodo. Se consideraron en el modelo los extremos rígidos de cada tramo de la estructura que surgen de la superposición de las secciones en los nudos de la estructura, y tienen efecto directo sobre los modos de vibración. Además de las frecuencias y desplazamientos modales obtenidos mediante la resolución del problema generalizado de autovalores, se verificaron 6 estados de carga estáticos con el objetivo de establecer un factor de seguridad mínimo utilizando el método de tensiones admisibles.

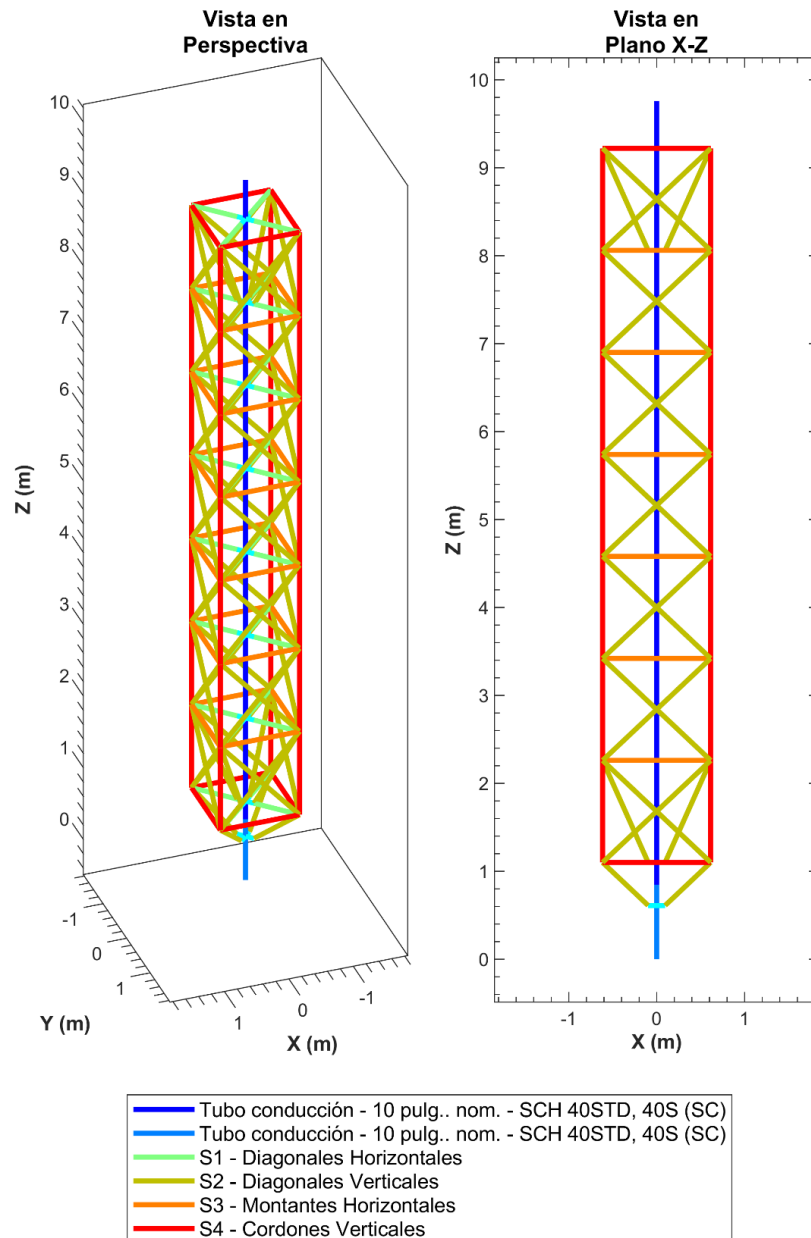


Figura 3: Disposición estructural de las secciones a optimizar.

2.2 Función objetivo

Para representar fielmente el comportamiento dinámico del Barrel, se busca en particular que las frecuencias y los desplazamientos de los modos fundamentales con las condiciones de

vínculo A y B sean reproducidos por el mock-up del Barrel. Al mismo tiempo se pretende que la estructura tenga la menor masa posible, ya que esto tiene un impacto directo en el dimensionado del sistema de actuación sísmica del ensayo. De esta manera, para la optimización del conjunto de parámetros de entrada x que definen a la estructura del mock-up del Barrel se plantea una función objetivo OF de acuerdo con la siguiente expresión:

$$OF(x) = 1 - \frac{w_{fmA} f_{fmA}(x) + w_{dmA} f_{dmA}(x) + w_{fmB} f_{fmB}(x) + w_{dmB} f_{dmB}(x) + w_{me} f_{me}(x)}{w_{fmA} + w_{dmA} + w_{fmB} + w_{dmB} + w_{me}}, \quad (1)$$

donde cada término del numerador está compuesto por el producto de un coeficiente de ponderación w y una función $f(x)$. Estos cinco términos están relacionados con:

- la caracterización de la frecuencia del primer modo de la condición de vínculo A y B, asociada a los términos con subíndices fmA y fmB respectivamente.
- la bondad de ajuste de los desplazamientos modales de las condiciones de vínculo A y B, asociada a los términos con subíndices dmA y dmB respectivamente.
- la masa de los elementos estructurales optimizados del mock-up del barrel, asociada al término con subíndice me .

La caracterización de las frecuencias modales se definió de acuerdo con la siguiente expresión:

$$f_{fm}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{\omega_{mod}(x) - \omega_{ref}}{\omega_{ref}} \right|}, \quad (2)$$

donde $\omega_{mod}(x)$ es la frecuencia del primer modo obtenida del modelo del mock-up del Barrel y ω_{ref} es la frecuencia de referencia del primer modo del modelo del Barrel real. Esta función tiene un valor máximo de 1, y un valor que tiende a 0 medida que aumenta la diferencia entre las frecuencias comparadas.

Para definir la bondad de ajuste de los desplazamientos modales se utilizó la siguiente expresión:

$$f_{dm}(x) = \frac{1}{1 + \text{NRMSE}(d_{mod}(x), d_{ref})}, \quad (3)$$

donde NRMSE es la raíz del error cuadrático medio definido a partir de los desplazamientos del primer modo obtenidos en los puntos de control del mock-up del Barrel, $d_{mod}(x)$, y los obtenidos en los puntos de control Barrel real d_{ref} . La función que mide la bondad de ajuste tiene entonces un valor máximo de 1 cuando la coincidencia entre los desplazamientos modales comparados es total, y tiende a 0 cuando las diferencias aumentan. Los puntos de control donde fueron evaluados los desplazamientos modales se presentan en la Figura 1, indicados con círculos azules.

Por último, para definir el efecto de la masa estructural en la función objetivo se utilizó la siguiente expresión:

$$f_{me}(x) = 1 - \frac{m_e(x)}{m_{ne}}, \quad (4)$$

dónde m_e es la suma de la masa de los elementos estructurales optimizados y m_{ne} es la suma de las masas de los elementos que componen el mock-up del barrel y que no están sujetos a la optimización. En este caso la función definida para cuantificar el efecto de la masa de la estructura optimizada en la función objetivo adopta un máximo de 1 y un valor que disminuye indefinidamente a medida que la masa de los elementos optimizados

aumenta.

Para definir la importancia relativa de cada término se adoptó un coeficiente de ponderación igual a 1 para cada término asociado a la respuesta modal y un coeficiente de ponderación igual a 2 para el término asociado a la cantidad de masa del modelo. De esta manera, el ajuste de las propiedades dinámicas tiene un coeficiente de ponderación total de $4/6$ en la función objetivo, lo que equivale al doble de la incidencia de la masa del modelo en la misma función ($2/6$). Estos coeficientes fueron elegidos de modo de priorizar la fidelidad del modelo experimental al barrel real del reactor por sobre la minimización de su masa.

2.3 Algoritmo de optimización empleado

Para encontrar el valor óptimo de los parámetros de la estructura que permitan minimizar la función objetivo $OF(x)$ definida por la Ecuación (1) se utilizó un algoritmo genético ejecutado en entorno de Matlab. De acuerdo a lo mencionado en las secciones precedentes, el vector de parámetros de entrada x fue definido de acuerdo a la siguiente expresión:

$$x = \{S_1; S_2; S_3; S_4; n; b\}, \quad (5)$$

donde S_1 a S_4 son las secciones con posición definida según la Figura 3, n es el número de segmentos en los que se divide la altura del reticulado que contiene al tubo principal, y b es el ancho del mismo reticulado. Los 6 parámetros fueron definidos como variables de números enteros, determinando para las secciones optimizadas una posición en una tabla de secciones comerciales de tubos cuadrados. Para el caso del parámetro b , el número entero que adopta la variable indica la dimensión adoptada en unidad de centímetros.

El límite inferior del vector de parámetros a optimizar fue definido considerando una sección tubular cuadrada de $40 \times 40 \times 2.5$ mm en las secciones, 3 segmentos para la división en altura del reticulado y un ancho de 100 cm. Por otro lado, el límite superior fue definido considerando una sección tubular cuadrada de $100 \times 100 \times 8.35$ mm, 10 segmentos para la división en altura del reticulado y un ancho de 150 cm.

Por último, se estableció como condición de restricción de las soluciones posibles la necesidad de alcanzar un factor de seguridad mínimo de 1.6 frente a los casos de carga estática. Las soluciones que no cumplen con esta restricción tienen una penalidad en el puntaje que obtienen a través de la función objetivo y quedan fuera de la solución óptima elegida finalmente.

Para establecer la solución óptima que es posible alcanzar con la metodología planteada, se definió una población de 50 individuos, optimizada durante 50 generaciones con un factor de mutación de 0.5. En el algoritmo genético de optimización cada individuo representa una posible solución del problema, caracterizada por una serie de valores que adopta el vector de parámetros de entrada. Los individuos son ordenados de acuerdo al puntaje que obtienen en relación al valor que generan en la función objetivo y al cumplimiento de las restricciones impuestas, y definen de este modo su permanencia, posible mutación o reproducción a lo largo de las generaciones.

En la Figura 4-a) se resume el puntaje obtenido por el mejor individuo de la población y el valor promedio de los puntajes de la población en cada generación. Se observa que existe un cambio abrupto en los valores de los puntajes a partir de la generación 16, y esto se debe a que las primeras generaciones están compuestas por individuos que no cumplen con la restricción de factor de seguridad impuesta y son por lo tanto penalizadas con un puntaje elevado. A partir de la generación 16, indicada con línea de trazo gris, los individuos cumplen con la restricción del factor de seguridad y el puntaje general baja, llegando a un valor final de 0.22 y con poco cambio en las últimas generaciones. En la Figura 4-b) se observa los valores que adopta cada

una de las funciones de los objetivos parciales que componen la función objetivo definida por la Ecuación 1 en cada generación. Estos valores de las funciones de objetivos parciales son las alcanzadas por el mejor individuo de cada generación. Se observa que a partir de la generación 16 el cambio más grande se produce en el valor de la masa de los elementos estructurales optimizados, alcanzando un valor aproximado del 50% de las masas definidas inicialmente en el problema y no sujetas a la optimización.

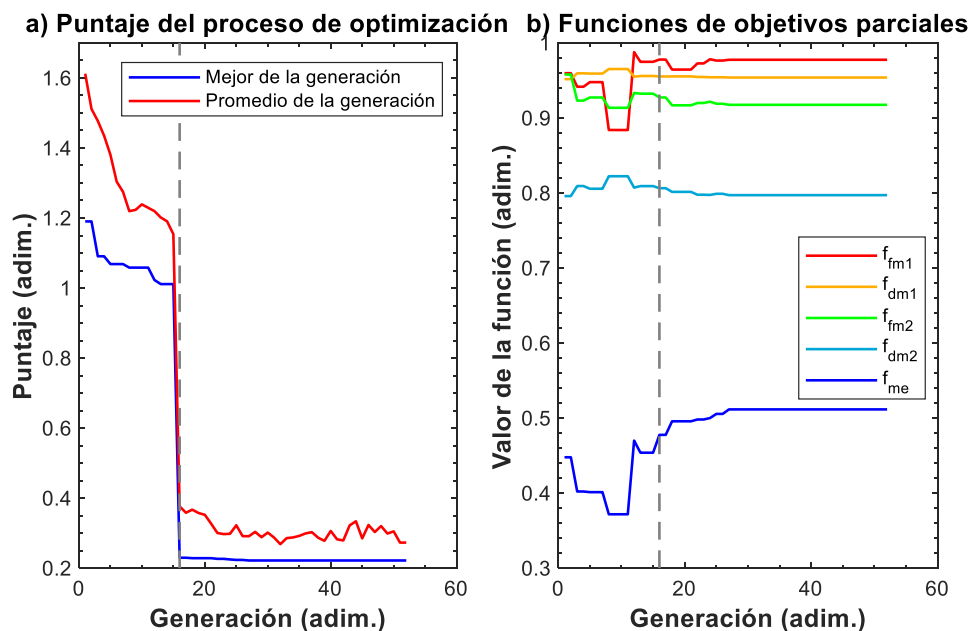


Figura 4: Resumen de proceso de optimización a lo largo de las generaciones.

2.4 Resultados obtenidos

Como resultado final del proceso de optimización se obtuvo una estructura reticulada dividida en 7 segmentos, con un ancho de 123 cm y secciones en los elementos estructurales que se resumen en la Tabla 1. En esta tabla se observa que la sección definida en el límite inferior fue la que resultó óptima en las tres primeras secciones. Por otro lado, en el caso de los cordones verticales, encargados de soportar los esfuerzos axiales derivados de la flexión del reticulado y de dotar de rigidez al conjunto, la sección óptima es cercana al límite superior definido al inicio del proceso de optimización.

Parte del Mock-up	Tipo de Sección	Designación Comercial	Peso total [kg]	Factor de Seguridad	
				Corte	Flexo-compr.
Diagonales horizontales	Tubo cuadrado	40 x 40 x 2.5 mm	69.34	4.25e+02	6.59e+00
Diagonales verticales	Tubo cuadrado	40 x 40 x 2.5 mm	322.64	2.06e+02	2.74e+00
Montantes horizontales	Tubo cuadrado	40 x 40 x 2.5 mm	87.23	2.90e+02	1.80e+01
Cordones Verticales	Tubo cuadrado	100 x 100 x 3.2 mm	413.18	1.72e+02	6.87e+00

Tabla 1: Resumen de secciones obtenidas del proceso de optimización.

La diferencia relativa respecto del Barrel real en las frecuencias de los modos para las condiciones de vínculo A y B son de 2.27% y 6.46% respectivamente. La comparación de los desplazamientos modales en los puntos de control se presenta en la Figura 5, observando el mejor ajuste que es posible alcanzar en el caso de análisis con la condición de vínculo A. Los desplazamientos modales de todos los elementos estructurales que componen el mock-up del Barrel se presentan en la Figura 6.

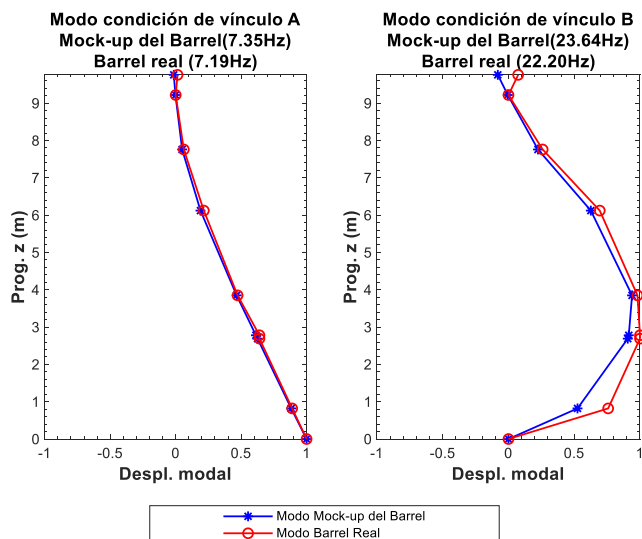


Figura 5: Comparación de los desplazamientos modales en los puntos de control para las condiciones de vínculo A y B.

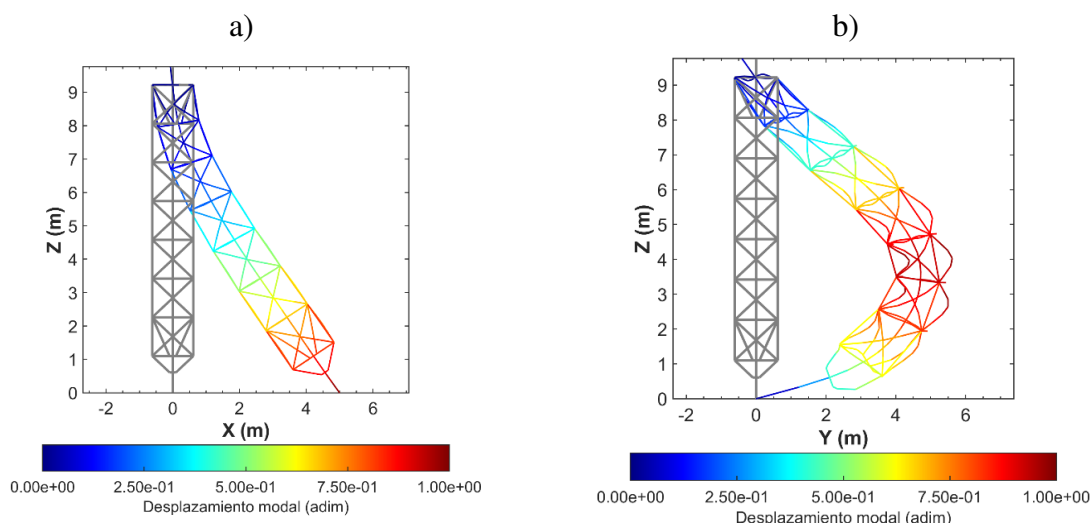


Figura 6: Desplazamientos modales del mock-up del Barrel para: a) condición de vínculo A, b) condición de vínculo B.

3 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe la metodología empleada para optimizar el diseño estructural del componente que representa al Barrel del reactor CAREM25, denominado mock-up del Barrel. Este mock-up forma parte del ensayo de calificación sísmica del PSE, y su

estructura debe tener frecuencias y desplazamientos modales similares a los del Barrel real. Al mismo tiempo la estructura del mock-up debe ser materializada con la menor cantidad de masa posible. Estos aspectos fueron incluidos en la función objetivo planteada para el problema de optimización. La utilización de un algoritmo genético permitió obtener un diseño de la estructura del mock-up del Barrel con una similitud aceptable en comparación con las propiedades dinámicas del Barrel real. Con relación a las frecuencias se pudo obtener una diferencia de 2.27% y 6.46% para las dos condiciones de vínculo analizadas, con una masa de la estructura optimizada que representa aproximadamente un 50% de la masa que no es objeto de la optimización.

REFERENCIAS

- Abd Elrehim, M.Z., Eid, M.A., and Sayed, M.G., Structural optimization of concrete arch bridges using Genetic Algorithms. *Ain Shams Eng. J.*, 10:507–516, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.01.005>, 2019.
- Di Trapani, F., Malavisi, M., Marano, G.C., Sberna, A.P., and Greco, R., Optimal seismic retrofitting of reinforced concrete buildings by steel-jacketing using a genetic algorithm-based framework. *Eng. Struct.*, 219:110864, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110864>, 2020.
- Gandomi, A.H., and Roke, D.A., Engineering optimization using interior search algorithm. *IEEE SSCI 2014 - 2014 IEEE Symp. Ser. Comput. Intell. - SIS 2014 2014 IEEE Symp. Swarm Intell. Proc.*, 2:20–26, <https://doi.org/10.1109/SIS.2014.7011771>, 2015.
- Gentils, T., Wang, L., and Kolios, A., Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm. *Appl. Energy*, 199:187–204, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.009>, 2017.
- Gholizadeh, S., and Ebadijalal, M., Performance based discrete topology optimization of steel braced frames by a new metaheuristic. *Adv. Eng. Softw.*, 123:77–92, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.06.002>, 2018.
- Ghorbani, B., Shirmohammadi, R., Mehrpooya, M., and Hamed, M.H., Structural, operational and economic optimization of cryogenic natural gas plant using NSGAI two-objective genetic algorithm. *Energy*, 159:410–428, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.078>, 2018.
- Gonçalves, M.S., Lopez, R.H., and Miguel, L.F.F., Search group algorithm: A new metaheuristic method for the optimization of truss structures. *Comput. Struct.*, 153:165–184, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.03.003>, 2015.
- Kaveh, A., and Ilchi Ghazaan, M., A new meta-heuristic algorithm: Vibrating particles system. *Sci. Iran.*, 24:551–566, <https://doi.org/10.24200/sci.2017.2417>, 2017.
- Marcel, C., Schlamp, M., and Calzetta, O., CAREM-25 : A Safe Innovative Small Nuclear Power Plant. *Nucl. España*, 19–23, 2017.
- MATLAB, version 9.6.0 (R2019a), . The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2019.
- Papavasileiou, G.S., and Charmpis, D.C., Seismic design optimization of multi-storey steel-concrete composite buildings. *Comput. Struct.*, 170:49–61, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.03.010>, 2016.
- Saka, M.P., Hasançebi, O., and Geem, Z.W., Metaheuristics in structural optimization and discussions on harmony search algorithm. *Swarm Evol. Comput.*, 28:88–97, <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.01.005>, 2016.
- Tejani, G.G., Pholdee, N., Bureerat, S., Prayogo, D., and Gandomi, A.H., Structural optimization using multi-objective modified adaptive symbiotic organisms search. *Expert Syst. Appl.*, 125:425–441, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.068>, 2019.