

Optimización del diseño de una columna de concreto armado mediante el algoritmo de SIMULATED ANNEALING, PERÚ

Noemi Lidia Neyra-Julcamoro¹, Juan Aldahir Cabanillas-Jave¹, Eduardo Manuel Noriega Vidal, Mg.²

¹Escuela de Ingeniería Civil, Universidad César Vallejo, Perú, nneyraj@ucvvirtual.edu.pe,
jacabanillas@ucvvirtual.edu.pe

²Asesor de Tesis, Universidad César Vallejo, Perú, enoriegavi@ucvvirtual.edu.pe

Resumen.- El presente proyecto de tesis aborda el problema de optimización, haciendo uso de tecnología de última generación para encontrar los mejores valores, de modo que las columnas evaluadas puedan tener la más óptima resistencia, el mínimo costo total, y un menor tiempo de cálculo comparado al diseño tradicional. Las columnas evaluadas en esta investigación fueron columnas centrales. Gracias al algoritmo desarrollado se pudo encontrar los mejores valores para el área base, altura, resistencia al concreto y la cuantía, asumiendo únicamente el área tributaria como dato. Además, el algoritmo desarrollado nos brinda el costo total que tendrá la columna en un corto tiempo. Como ejemplo práctico se analizó una columna con área tributaria de 42tn, donde el algoritmo nos mostró a una columna de 0.25m*0.25m como la opción más óptima, con una resistencia al concreto de 210kg/cm² y con 4 barras longitudinales de 5/8". Todos estos parámetros están dentro de lo estipulado por la norma, como su cuantía a 1.2% y su precio de S/. 197.00. Así obtuvimos un diseño óptimo y económico. Esta investigación es de tipo teórica, sin embargo, con el uso de la tecnología desarrollada puede ser en un futuro fácilmente llevada a la práctica. Palabras clave: Optimización, Simulated Annealing, columna, diseño.

Abstract.- The present thesis project addresses the optimization problem, making use of state-of-the-art technology to find the best values, so that the evaluated columns can have the most optimal strength, the minimum total cost, and a shorter design time compared to the traditional design. The columns evaluated in this research were central columns. Thanks to the algorithm developed, it was possible to find the best values for base area, height, concrete strength and amount, assuming only the tributary area as

data. In addition, the algorithm developed gives us the total cost that the column will have in a short time. As a practical example, a column with a tributary area of 42tn was analyzed, where the algorithm showed a 0.25m*0.25m column as the most optimal option, with a concrete strength of 210kg/cm² and with 4 longitudinal bars of 5/8". All these parameters are within the stipulations of the standard, as well as its amount at 1.2% and its price of S/. 197.00. Thus, we obtained an optimal and economical design. This research is theoretical, however, with the use of the developed technology it can be easily put into practice in the future.

Keywords: Optimization, Simulated Annealing, column, design.

I. INTRODUCCIÓN

La industria constructora en el Perú está siendo bastante innovadora y productiva gracias a acciones del Estado. Este ha ido promoviendo la inversión por medio de proyectos para mejorar la infraestructura pública y los servicios de saneamiento en zonas rurales. [1] Las estadísticas nos revelan un aumento del 4.9% en la producción del 2022 con respecto al 2021. Además, comparando las cifras de enero-abril de ambos años se pudo ver un aumento del 0.88%. [2]

De acuerdo a datos de la CCL, solamente en Lima se pudo ver cómo entre enero-mayo del 2022 sus cifras aumentaban en un 0.74%. [3]

En la actualidad los niveles productivos son incluso mayores a los registrados antes de la pandemia y su aporte al PIB ha llegado a ser del 6,7%, alrededor de 16.500 millones de dólares. Esta industria también ha generado empleo formal para 211.455 personas en todo el Perú, siendo casi la mitad solo población Limeña. [4]

Ante esta importante actividad económica dedicada a la ejecución de proyectos de infraestructura [5] es necesario tener en cuenta factores como el costo, diseño, etc. para ver si efectivamente, el proyecto es viable o no. [6]

Evidentemente, el análisis de esos factores constituye un arduo trabajo para los especialistas. Por ello, muchos expertos han buscado una manera de optimizar ese análisis [7] para balancear todos los valores de la mejor manera. [8] Una de las técnicas de optimización es el uso de módulos para la construcción de casas; esta técnica se está empezando a usar en Perú, sin embargo, es muy popular en países como Brasil. [9]

En cuestión de estructuras la optimización viene dada por una serie de patrones matemáticos y programas digitales que facilitan el análisis de las estructuras para los diseñadores. [17] Sin embargo, es necesario conservar una exactitud debida en el proceso para llegar a la respuesta correcta. [18] Es por eso que el ingeniero debe conocer a profundidad el caso a colocar correctamente los datos. [19] A pesar de la gran facilidad que otorgan [20], estos métodos no son comúnmente usados por quienes diseñan estructuras pues requiere conocimiento sobre algoritmos complejos y su uso. [21] Existen diversos trabajos de optimización como el realizado por la UNC (Universidad Nacional de Cajamarca) en una presa de gravedad mediante el programa elementos finitos. [23] En la USMP (Universidad San Martín de Porres), una investigación de optimización estructural en una vivienda ubicada en suelo blando. [24] Y otro realizado en la Universidad Privada del Norte donde se analizó por completo a una viga de concreto armado. [25]

Sin embargo, como podemos ver, algunas estas investigaciones se basan en un análisis teórico, centrado en un material específico y sin abarcar todos los datos necesarios para poder construir al menos un elemento estructural. [21] Es por ello que en este trabajo de investigación se desarrollará con el fin de optimizar el diseño de una columna de concreto armado haciendo uso de inteligencia artificial. En esta investigación se analizarán todos los datos necesarios para la

construcción de una columna como sus dimensiones, resistencia al concreto, cuantía, el número de barras [26] y el costo final de la columna.

Por tanto, bajo estas premisas se plantea el siguiente problema general: ¿Cómo es la optimización del diseño de una columna de concreto armado mediante el algoritmo de Simulated Annealing?

Con la ejecución de este proyecto se busca optimizar el diseño de una columna de concreto armado por medio de algoritmos heurísticos, este permite a los ingenieros actuales verificar si el diseño es el más adecuado usando inteligencia artificial, con lo ya mencionado como justificación general. Por otro lado, la justificación teórica se menciona a continuación: la optimización del diseño de una columna de concreto armado, procura concientizar a los constructores acerca de la inseguridad estructural de una columna no diseñada para resistir fuerzas sísmicas, y la importancia de la optimización en el diseño.

Con lo planteado anteriormente, y justificando nuestro estudio se podría inferir que, de no llevarse a cabo esta investigación no se daría más información sobre la optimización del diseño de una columna de concreto armado mediante el uso de algoritmos heurísticos. Además, se debe destacar con la justificación metodológica que el algoritmo Simulated Annealing usado para la investigación sigue la premisa de encontrar el óptimo global, por lo que se procura que la información generada sea de importancia para futuras investigaciones sobre optimización mediante algoritmos heurísticos.

Tomando en cuenta que nuestro objetivo general será realizar la optimización del diseño de una columna de concreto armado mediante el algoritmo de Simulated Annealing; por consiguiente, nuestros objetivos específicos serán determinar el costo de una columna de concreto armado mediante el algoritmo de Simulated Annealing, determinar la cuantía óptima de una columna de concreto armado mediante el algoritmo de Simulated Annealing, y, determinar la resistencia a la compresión de

una columna de concreto armado mediante el algoritmo de Simulated Annealing.

II. METODOLOGÍA

Tipo de investigación: La investigación aplicada tiene como finalidad la solución de un problema o un método específico, centrándose en la búsqueda del conocimiento y fortaleciéndolo para su aplicación, enriqueciendo así el desarrollo de la cultura y la ciencia. [19] Este tipo de investigación fue usada en este estudio.

Diseño de Investigación: Por otro lado, al no haber modificaciones en las variables independientes en las investigaciones no experimentales, estas solo buscan la obtención de datos a partir del resultado que se obtenga. [20] Por lo que, nuestra investigación será no experimental ya que no se manipula la variable independiente.

A. Población

Es el grupo de personas u objetos sobre los que se desea investigar y conocer algo. Dependiendo del campo de estudio, la población puede representarse por animales, personas, accidentes automovilísticos, novelas, etc. (López, 2004) En este caso, la población que consideraremos para el desarrollo de la investigación son todos los diseños de columnas centrales de concreto armado mediante Simulated Annealing

B. Muestra

El muestreo es un método representado por un conjunto de normas, criterios y técnicas, mediante el cual se obtiene una cantidad de elementos que representen a toda la población y que nos sirva de muestra. (López, 2004). Por lo que nuestro número de columnas centrales de concreto armado de muestra será 20120 iteraciones, para posteriormente ser optimizadas con la ayuda de Recocido Simulado, esta cifra la tomamos usando como referencia la investigación de (Noriega, 2021).

C. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

En esta investigación se usó la técnica de observación o de inspección visual para la

obtención de datos de las variables. En esta técnica el investigador se conecta con la realidad del problema para poder tener una idea concisa del problema que este estudia. (Useche, Artigas, Queipo, & Perozo, 2019)

Con los datos obtenidos con el proceso de observación, se puede procesar el diseño mediante el algoritmo Simulated Annealing. Para comprobar que el proceso sea correcto, se usó la norma técnica de edificación E.060 y E.030. Por lo que para desarrollar esta investigación se usará una ficha de validación

D. Procedimiento

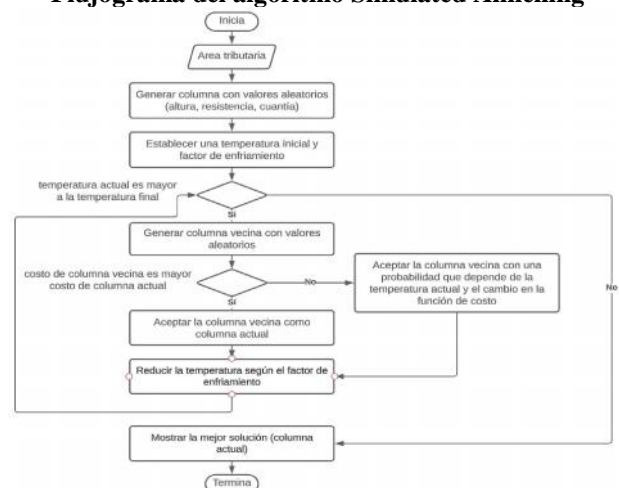
El proceso para realizar este estudio fue recopilar las formulas necesarias para el pre dimensionamiento de una columna cuadrada centrada para luego optimizar este proceso programando un código en el lenguaje Python en el cual se itera 20120 resultados y mediante el algoritmo Simulated Annealing se obtiene el resultado más óptimo, siendo este código estocástico y obteniendo como resultados.

III. RESULTADOS

A. Costo vs El Número de Iteraciones

El Flujograma usado en este estudio esta detallado en la Ilustración 1.

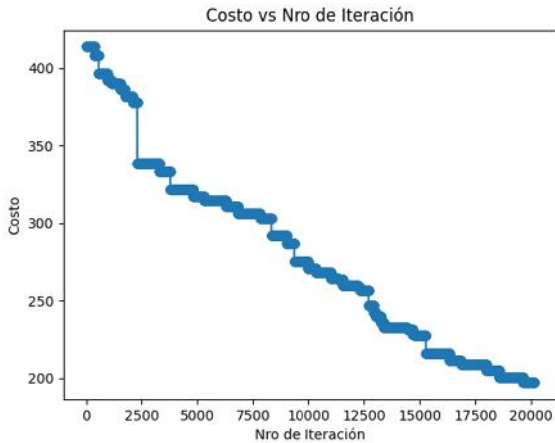
Ilustración 1.
Flujograma del algoritmo Simulated Anelling



Nota: Basado en el procedimiento de recocido metalúrgico, el algoritmo de recocido simulado también llamado es un método de optimización. Su objetivo es descubrir aproximaciones de soluciones a problemas de optimización combinatoria o continua donde el espacio de

búsqueda es demasiado grande para explorarlo por completo.

**Ilustración 2 .
Optimización del costo de una columna mediante el Simulated Annealing**



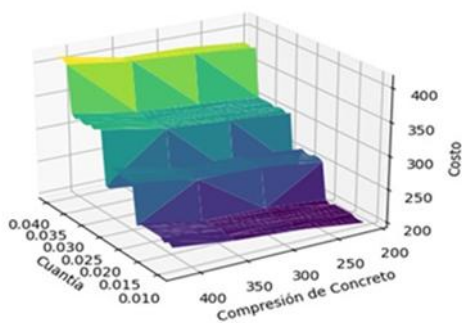
Nota: Para esta investigación se usaron los precios más estandarizados como datos y no se consideró el precio de la mano de obra, en donde el costo de la columna centrada cuadrada con una longitud de lado de 25cm de lado, se obtuvo el precio más alto que fue de S/. 450.00 y se optimizó a S/. 197.00 para la cuantía 1.2% sin considerar la mano de obra, considerando 20120 iteraciones como lo mostraremos en el siguiente gráfico obtenido.

B. Relación cuantía, Resistencia a la compresión y costo

En la Ilustración 3. se grafico la relación de la cuantía, resistencia a la compresión y el costo.

**Ilustración 3.
Relación Cuantía, Resistencia a la Compresión y el Costo**

Costo en función de Cuantía y Compresión de Concreto



Nota: La compresión al concreto es una cantidad que expresa la capacidad que tiene el concreto a soportar las cargas de la estructura. Al

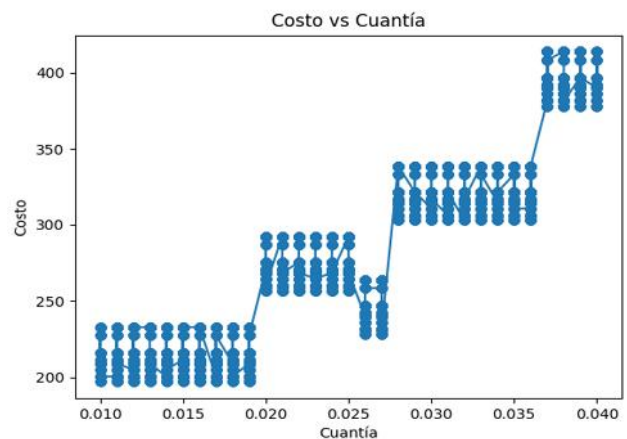
relacionarlo con el costo podemos encontrar que ambos sufren un aumento o descenso de acuerdo a los valores que tomen, esto se debe a que la elaboración de concreto de una resistencia más alta es mucho más cara y por consiguiente su precio de venta también lo es. No obstante, es muy importante reconocer que no en todas las estructuras es necesario un concreto de alta resistencia pues existen proyectos que con el uso de concreto estándar se puede cumplir los requisitos estructurales sin llegar a ser costoso.

Se pudo verificar que existe una relación entre las variables de la resistencia a la compresión, la cuantía y el costo, lo cual indica que la optimización de la columna mediante el algoritmo Simulated Annealing encuentra el menor pico de precio, en este caso.

C. Cuantía óptima

La Ilustración 4. Muestra el comportamiento de las iteraciones relacionando el porcentaje de la cuantía óptima y el costo.

**Ilustración 4.
Porcentaje de cuantía óptima.**



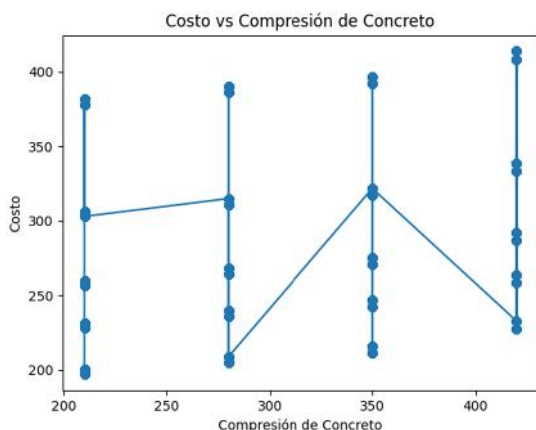
Nota: Según las normas dadas por la American Concrete Institute (ACI), la relación de cuantía debe ubicarse dentro de un rango entre el 1 y el 8 por ciento. Este intervalo de valores ha sido dado teniendo en cuenta el costo final de los proyectos y la resistencia óptima que deban tener. De esto se puede deducir que la cantidad de acero es muy pequeña en comparación con la cantidad de concreto que se utiliza, no obstante, es esencial para la resistencia final de la columna pues actúa junto al concreto para

soportar las cargas que brinde la estructura. El valor óptimo es aquel que se encuentra en equilibrio, el que no conlleva un costo elevado, pero proporciona la resistencia necesaria para la estructura y logra cumplir los estándares de calidad y rendimiento previstos. En el siguiente gráfico obtenido podemos observar que la optimización estructural puede reducir los costos y aumentar la eficiencia de la construcción y es lo que buscamos con el algoritmo Simulated Annealing que nos permite determinar que el 1.2% es donde se encuentra la cuantía óptima.

D. Costo vs Compresión del concreto

En la siguiente Ilustración 5. Se muestra la relación de el costo y la compresión de concreto de la columna mencionada.

Ilustración 5.
Resistencia a la compresión óptima



Nota: Al intentar ahorrar en la construcción y el proceso constructivo de una columna esta podría tener una capacidad de carga insuficiente y esto provocando una falla en este elemento estructuras por consiguiente un fallo en toda la estructura y por el contrario una columna sobredimensionada aumenta los costos en la construcción y el mal uso de los recursos, este tipo de columnas al tener una sección transversal inadecuada provocara una distribución desigual de las cargas y una mayor tensión de estas en ciertas áreas, es por ello que debemos encontrar el punto medio entre una estructura buena bonita y barata. El costo de una columna puede variar dependiendo de varios factores, como el tamaño de la columna, la cantidad de acero necesaria, el tipo de concreto utilizado, la

ubicación geográfica y otros factores. En esta investigación los datos que nos arrojaron demuestran que se ha determinado mediante el algoritmo de Simulated Annealing que 210kg/cm² es la compresión de concreto óptima para soportar una columna con longitud de lado 25cm*25cm lo cual se detalla en el siguiente gráfico.

IV. CONCLUSIONES

Se determinó la optimización del diseño de una columna de concreto armado mediante el Algoritmo Simulated Annealing realizando las comprobaciones mediante el ACI 319-19 y la NTP E-060; con lo que se optimizó el costo, características geométricas, propiedades, materiales y refuerzos longitudinales y transversales de la columna.

Este proceso de optimización de la columna de concreto armado mediante Simulated Annealing condujo a determinar una columna de concreto armado con dimensiones 25cm x 25cm x 260cm de altura, a un costo de S/. 197.00., además se determinó la cuantía del refuerzo longitudinal de la columna para la columna optimizada en 4 barras de diámetro Ø 5/8" y con una cuantía del $p = 1.2\%$ obteniendo una columna económica y resistente.

El algoritmo Simulated Annealing permite establecer diferentes propuestas de resistencia a la compresión del concreto según las consideraciones y factores sísmicos del proyecto, haciendo todas las verificaciones y comprobaciones de la NTP E-060 y el ACI 318-19, con lo cual permite construir una columna de concreto con $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ para las características geométricas optimizadas.

Con la función `generate_initial_solution()` el algoritmo genera una solución inicial aleatoria para la columna, incluyendo la altura, resistencia del concreto y la cuantía del acero. Estos valores son seleccionados de forma aleatoria dentro de rangos predefinidos.

El costo de la columna se calcula en la función `calcular_costo(columna)`. Este costo se compone del costo de las barras de acero y el costo del concreto utilizado en la columna. Se multiplican la cantidad de barras de acero por el costo unitario según su tamaño, y se calcula el costo del concreto multiplicando el

volumen de concreto por el costo por metro cúbico.

En cada iteración del algoritmo, se evalúa la solución actual y una solución vecina. Se calcula la diferencia de costo entre ambas soluciones (δ). Si la solución vecina tiene un costo menor o si se cumple una condición probabilística basada en la temperatura actual del algoritmo, se actualiza la solución actual con la solución vecina.

Una vez que el algoritmo ha finalizado, se muestra el resultado final, incluyendo el mejor costo encontrado, la altura, resistencia del concreto y cuantía del acero de la mejor solución, así como las demás características calculadas de la columna. También se muestra el detalle del proceso, como el número de barras, el tamaño de las barras escogidas y los costos asociados.

En resumen, el algoritmo Simulated Annealing utiliza la generación de soluciones iniciales y soluciones vecinas aleatorias, así como cálculos de características y costos para evaluar y actualizar la solución actual. A través del enfriamiento controlado, explora el espacio de búsqueda en busca de la mejor solución que minimice el costo.

Referencias Bibliográficas

- [1] J. B. Moscairo Chura y R. V. Valdivia Daza, Artists, *Mejoramiento de la productividad en proyectos de saneamiento básico rural; caso de estudio: Construcción de casetas sanitarias ejecutados por la empresa SICMA SAC en la region de Puno durante los periodos 2016–2017..* [Art].
- [2] ComexPerú, «El sector construcción registró un crecimiento interanual del 4.9% en abril de 2022,» 2022.
- [3] La Cámara, «Sector construcción acumula crecimiento de 0,74% entre enero y mayo 2022,» 2022.
- [4] Y. Ramirez, «Sector construcción acumula crecimiento de 0.74 % de enero a mayo del 2022,» 2022.
- [5] J. P. Silva, J. Hennings Otoyá y V. R. Echevarría Alvarado, «Análisis macroeconómico del sector construcción en el Perú,» vol. 25, nº 47, pp. 95-101, 2017.
- [6] «Factores para evaluar la viabilidad de proyectos de conservación de edificaciones esenciales, no productivas, en zonas sísmicas,» vol. 13, nº 1, pp. 25-39, 2009.
- [7] Q. W. y L. M. , «Structural optimization in civil engineering: a literature review,» vol. 11, nº 2, p. 66, 2021.
- [8] L. F. Stochino Flavio, «Reinforced concrete slab optimization with simulated annealing,» *applied sciences*, vol. 9, nº 15, p. 3161, 2019.
- [9] Susanna Moreira, «Optimización y eficiencia: La construcción modular en las casas brasileñas,» 24 02 2021.
- [10] F. Casado Bravo, Artist, *Optimización Estructural Mediante Algoritmos Computacionales Inspirados en la Naturaleza.* [Art]. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2022.
- [11] P. Borne, P. Dumitru, F. G. Filip y D. Stefanoiu, «Optimization in Engineering Sciences: Exact Methods,» Great Britain, 2013.
- [12] R. Yurisleidy, Artist, *Optimización de conjuntos estructurales planos utilizando la OAPI SAP2000-MATLAB.* [Art]. Universidad Central de "Marta Abreu" de las Villas, 2017.
- [13] M. Gen y R. Cheng, «Genetic Algorithms and Engineering Optimization,» 2000.
- [14] J. E. La Torre Esquivel, Artist, *Optimización del diseño estructural, enfocado en el costo de edificaciones educativas de concreto armado.* [Art]. 2018.
- [15] Y. A. Bustamante Vásquez, Artist, *Optimización estructural de una presa a gravedad con elementos finitos.* [Art]. Universidad Nacional de Cajamarca, 2017.
- [16] J. M. Meza Espinoza, Artist, *Optimización del diseño estructural de un edificio multifamiliar en suelos blandos, con el modelo interacción suelo-estructura, en Lurín-Lima.* [Art]. 2018.
- [17] E. Noriega, Artist, *Optimización del diseño de una viga de concreto armado mediante Simulated Annealing, Perú.* [Art]. Universidad Privada del Norte, 2021.
- [18] J. Ci, L. Kong, M. Ahmed, Q. Q. Liang, H. Ahmed, S. Chen y C. Wu, «Experimental and numerical studies of axially loaded square concrete encased concrete filled large diameter steel tubular short columns,» vol. 23, nº 5, pp. 2748-2769..
- [19] Z. R. V. Cordero, «La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia

científica.» *Revista educación*, vol. 33, nº 1, p. 12, 2019.

- [20] L. Soto Vázquez, «Investigación y tipos de investigación,» 29 Marzo 2011. [En línea].
- [21] P. L. López, «Población muestra y muestreo,» *Punto cero*, vol. 9, nº 8, 2004.
- [22] M. C. Useche, W. Artigas, B. Queipo y É. Perozo, *Técnicas e instrumentos recolección de datos cuali-cuantitativos*, Guajira: Gente Nueva, 2019.
- [23] O. Möller, J. P. Ascheri, R. O. Foschi, M. Rubinstein y S. Grossman, «Metodología de optimización de estructuras para construcciones sismorresistentes,» vol. 11, 2014.
- [24] V. Y. Piqueras, Artist, *La optimización de estructuras*. [Art]. Universitat Politècnica de València, 2023.
- [25] H&C Proyectos de ingeniería SAS, «¿Qué es la optimización de procesos en la construcción?,» 2021.
- [26] J. La Torre, Artist, *Optimización del diseño estructural, enfocado en el costo de edificaciones educativas de concreto armado*. [Art]. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2018.
- [27] J. J. Tenorio Aguinaga y G. Lozano Valqui, «El sistema de control Interno: Una herramienta para el perfeccionamiento de la gestión empresarial en el sector construcción,» vol. 1, nº 1, 2016.
- [28] A. Ning y J. R. R. A. Martins, «Engineering Design Optimization,» Cambridge, 2022.
- [29] R. R. A. L. y M. F. , «Socio-economically sustainable civil engineering infrastructures by optimization,» vol. 27, nº 3, pp. 187-229, 2005.
- [30] S. S. Rao, de *Engineering optimization: theory and practice*, 2019.
- [31] M. Kripka y G. Fleith Medeiros, «Optimization of reinforced concrete columns according to different environmental impact assessment parameters,» vol. 59, pp. 185-194, 2014.