

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN FUNCIÓN AL COSTO DE
EDIFICACIONES REGULARES DE CONCRETO ARMADO
DE MEDIANA ALTURA EN LA CIUDAD DE LIMA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

ELABORADO POR

**MIGUEL ANGEL BENITES SURCO
ID: 0009-0007-6664-8749**

ASESOR

**Dr. LUIS GABRIEL QUIROZ TORRES
ID: 0000-0002-2556-2291**

**Lima- Perú
2025**

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Benites Surco, Miguel Angel

mbenitess@uni.pe

939714134

Dedicatoria

*A Dios, por brindarme su apoyo y fortaleza;
a mi madre, por su dedicación y esfuerzo constante;
a mi padre, por su educación y guía en momentos difíciles;
a mis hermanos, por su apoyo y motivación;
a toda mi familia, por estar siempre a mi lado;
gracias a todos por su presencia en este camino*

Agradecimientos

Al concluir este viaje académico, lleno de desafíos y aprendizajes, me embarga una profunda satisfacción por haber alcanzado esta meta. Sin embargo, este logro no habría sido posible sin el apoyo incondicional de diversas personas e instituciones que han estado a mi lado en cada paso del camino. Por ello, es un honor para mí dedicar este espacio a expresar mi más sincero agradecimiento:

A mi asesor, el Dr. Luis Gabriel Quiroz Torres, por su invaluable tiempo, dedicación y observaciones perspicaces. Su guía constante y su compromiso con mi desarrollo académico han sido fundamentales para la realización de esta tesis.

A mis familiares, quienes han sido mi pilar en este proceso. Su apoyo incondicional y sus palabras de aliento me han dado la fuerza necesaria para culminar esta etapa. Gracias por creer en mí y por estar siempre a mi lado, incluso en los momentos más difíciles.

A mi compañero Miguel Luna, cuya colaboración ha sido vital para el desarrollo de esta investigación. Su generosidad al compartir sus conocimientos y su disposición para ayudarme en cada etapa del trabajo han sido esenciales para alcanzar los objetivos propuestos. Sin su apoyo, este proyecto no habría sido el mismo.

- A la Universidad Nacional de Ingeniería, y en particular a la Facultad de Ingeniería Civil, por brindarme la oportunidad de formarme tanto profesional como personalmente. Este lugar ha sido el escenario de mis sueños y aspiraciones, y siempre llevaré conmigo los aprendizajes adquiridos.

- A todos los docentes y compañeros que, de alguna manera, han contribuido a mi formación y crecimiento. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en mi camino, y por ello, les agradezco sinceramente.

ÍNDICE

Capítulo I:	Introducción	19
1.1	Generalidades	19
1.2	Problemática.....	22
1.3	Objetivos	24
1.3.1	Objetivo general	24
1.3.2	Objetivos específicos.....	24
1.4	Hipótesis.....	25
1.4.1	Hipótesis general.....	25
1.4.2	Hipótesis específicas	25
Capítulo II:	Marco teórico y conceptual	26
2.1	Optimización estructural	26
2.2	Tipos de optimización estructural.....	27
2.2.1	Optimización de la sección transversal	27
2.2.2	Optimización de la forma o geometría	27
2.2.3	Optimización topológica.....	27
2.3	Función objetivo	27
2.3.1	Definición de la función objetivo	27
2.3.2	Significado y significancia de la función objetivo.....	28
2.3.3	Variables y parámetros en la función objetivo.....	28
2.3.4	Importancia en la toma de decisiones y diseño.....	28
2.3.5	Representación vectorial de la función objetivo	29
2.4	Variables de diseño	29
2.4.1	Variables continuas	30
2.4.2	Variables discretas	30
2.4.3	Variables activas	30
2.4.4	Variables pasivas	31
2.5	Espacio de soluciones	31
2.5.1	Definición del espacio de soluciones	31
2.5.2	Exploración del espacio de soluciones	31
2.5.3	Dimensión y complejidad del espacio de soluciones.....	32
2.5.4	Impacto en la toma de decisiones y diseño	32
2.6	Parámetros.....	32
2.6.1	Definición de parámetros en optimización	32
2.6.2	Importancia de los parámetros en la optimización	33

2.6.3	Adaptación de parámetros en la búsqueda de soluciones	33
2.6.4	Impacto en la precisión y eficiencia de la optimización	33
2.6.5	Representación vectorial de los parámetros	34
2.7	Restricciones en un problema de optimización	34
2.7.1	Definición de restricciones en optimización	34
2.7.2	Importancia de las restricciones en la optimización	34
2.7.3	Representación vectorial de las restricciones	35
2.8	Métodos heurísticos de optimización estructural.....	35
2.8.1	Salto múltiple aleatorio	36
2.8.1.1	Introducción al método	37
2.8.1.2	Esquema general del método de saltos múltiples aleatorios..	39
2.8.1.3	Consideraciones realizadas.....	46
2.8.2	Búsqueda por entornos	47
2.8.2.1	Introducción al método	48
2.8.2.2	Esquema general del método de búsqueda por entornos.....	48
2.8.2.3	Parámetros considerados.....	52
2.8.3	Algoritmos genéticos	53
2.8.3.1	Introducción al método	55
2.8.3.2	Descripción del método	55
2.8.3.3	Representación de las soluciones	56
2.8.3.4	Evaluación de la aptitud del individuo	59
2.8.3.5	Selección.....	59
2.8.3.6	Cruzamiento	60
2.8.3.7	Mutación.....	61
2.8.3.8	Elitismo.....	62
2.8.3.9	Adición al método	63
2.8.3.10	Esquema general del método de algoritmos genéticos.....	64
Capítulo III:	Definición del problema de optimización	65
3.1	Parámetros	65
3.1.1	Parámetros geométricos.....	65
3.1.2	Parámetros relativos a las acciones permanentes	68
3.1.3	Parámetros relativos a las acciones sísmicas.....	68
3.1.4	Parámetros relativos a los factores de reducción.....	69
3.1.5	Parámetros relativos a las propiedades mecánicas	70
3.2	Variables de diseño	70
3.3	Restricciones	73

3.3.1	Restricciones consideradas de la Norma Técnica E.030	73
3.3.2	Restricciones consideradas de la Norma Peruana E.060	74
3.4	Función objetivo	76
3.4.1	Formulación de la función objetivo.....	76
Capítulo IV:	Métodos heurísticos empleados.....	81
4.1	Salto múltiple aleatorio	81
4.1.1	Generación de soluciones iniciales.....	81
4.1.2	Evaluación de factibilidad	81
4.1.3	Selección de la mejor solución	81
4.2	Búsqueda por entornos.....	81
4.2.1	Definición del entorno	82
4.2.2	Evaluación de soluciones cercanas	82
4.2.3	Actualización de la solución.....	82
4.3	Algoritmos genéticos	82
4.3.1	Inicialización de la población	82
4.3.2	Evaluación de la aptitud.....	83
4.3.3	Selección, cruzamiento y mutación.....	83
4.3.4	Elitismo y convergencia	83
4.3.4.1	Elitismo.....	83
4.3.4.2	Convergencia	83
Capítulo V:	Resultados de la optimización estructural	84
5.1	Introducción.....	84
5.2	Justificación del número de ensayos utilizados para el método de algoritmos genéticos	87
5.3	Salto múltiple aleatorio	89
5.4	Algoritmos genéticos	91
Capítulo VI:	Análisis de resultados	98
6.1	Salto múltiple aleatorio	98
6.2	Algoritmos genéticos	99
6.2.1	Variación del costo respecto al inicial	100
6.2.2	Variación del peso de concreto respecto al inicial.....	102
6.2.3	Variación del peso del acero respecto al inicial.....	104
Conclusiones		107
Recomendaciones		109
Referencias Bibliográficas		111
Anexos		115

RESUMEN

En la etapa de diseño estructural, el pre-dimensionamiento de los elementos estructurales y la experiencia del ingeniero civil son fundamentales para definir un diseño inicial que cumpla con las normativas peruanas vigentes. Si la estructura cumple con dichas normativas, generalmente no se realizan más ajustes en las dimensiones de los elementos, lo que impide explorar soluciones alternativas que podrían reducir costos manteniendo el cumplimiento normativo.

Esta investigación aplica métodos heurísticos para optimizar estructuras regulares de concreto armado de mediana altura en Lima, con el objetivo de reducir costos en los elementos estructurales. Para ello, se sigue el siguiente procedimiento: (1) Definir los parámetros inalterables y las variables de diseño, las cuales pueden asumir un conjunto de valores específicos durante el proceso de optimización. (2) Establecer restricciones que aseguren el cumplimiento de las normas peruanas E.030 y E.060, y que reduzcan el esfuerzo computacional limitando los intervalos de variación de las variables de diseño. (3) Seleccionar el método heurístico a emplear. Inicialmente, se utilizará el método de saltos múltiples aleatorios para definir una solución de partida sólida en el proceso de optimización.

La aplicación de estos métodos permitirá explorar soluciones estructurales más eficientes y económicas sin comprometer la seguridad ni el cumplimiento normativo, contribuyendo así a un diseño estructural más óptimo para edificaciones de mediana altura en la ciudad de Lima.

Palabras Clave: optimización, heurísticos, estructuras, costo.

ABSTRACT

The structural design stage of buildings requires an initial pre-dimensioning of the structural elements and also the experience of the civil engineer. This pre-dimensioning is very helpful in obtaining an initial design for the building, which can comply with current Peruvian standards and, if it does not comply, some modifications are made to the dimensions of the structural elements. In most cases, when it is seen that the structure complies with the regulations, changes are no longer made to the dimensions or properties of the structural elements of the buildings, so the engineer in charge of carrying out the design could not know if there is one or many solutions that comply with current Peruvian standards and are less expensive than the one initially designed.

This research makes use of heuristic methods for the structural optimization of regular medium-rise reinforced concrete structures for the city of Lima, with the aim of reducing the costs of the structural elements. To solve the optimization problem using these heuristic methods, the following procedure must be carried out: 1) Define the constant variables, which remain unchanged throughout the optimization problem, and the discrete variables, which can assume a specific set of values and vary as the optimization process progresses. 2) Establish the restrictions to which the structure to be optimized will be subject. These restrictions will help to comply with the requirements established by the Peruvian standards E.030 and E.060, in addition to being able to reduce the computational effort, since the variation intervals of the discrete variables can be reduced. 3) Establish the heuristic method to be used. As a first step, it is essential to use the random multiple jump method to define an initial solution, since this approach is fundamental to guarantee a robust starting point in structural optimization.

The application of these optimization methods could help reduce the costs of the structural elements of regular reinforced concrete structures of medium height in the city of Lima.

Keywords: optimization, heuristics, structures, cost.

PRÓLOGO

En la presente investigación, el autor aborda la optimización heurística en el diseño de edificaciones regulares de concreto armado de mediana altura en la ciudad de Lima. Este estudio se centra en la necesidad de reducir los costos de los elementos estructurales, un aspecto crucial en el contexto actual de la construcción, donde la eficiencia económica es fundamental.

El trabajo comienza con un análisis detallado del proceso de diseño estructural, enfatizando la importancia del pre-dimensionamiento de los elementos. Para ello, el autor utiliza el software ETABS para modelar los elementos estructurales y las cargas aplicadas (muertas, vivas y sísmicas). A través de la aplicación de métodos heurísticos, se busca identificar variables de diseño y restricciones que permitan optimizar tanto las dimensiones como los costos de las estructuras. El autor utiliza algoritmos genéticos y el método de saltos múltiples aleatorios, logrando una optimización efectiva que resalta la capacidad de estos métodos para encontrar soluciones más económicas.

Además, se establece un procedimiento claro para abordar el problema de optimización, que incluye la definición de parámetros inalterables y la identificación de las restricciones necesarias para cumplir con las normativas peruanas. Este enfoque no solo facilita la obtención de soluciones más económicas, sino que también permite una mejor comprensión de las interacciones entre las variables de diseño.

El autor también revisa investigaciones previas en el campo de la optimización estructural, destacando la relevancia de los métodos heurísticos en comparación con enfoques más tradicionales. Se concluye que la aplicación de estos métodos puede ser una herramienta valiosa para los ingenieros civiles, permitiendo un diseño más eficiente y adaptado a las necesidades del mercado.

Este trabajo no solo contribuye al conocimiento en el área de la optimización estructural, sino que también ofrece un marco práctico para la implementación de técnicas de optimización en proyectos de construcción. Las conclusiones y

recomendaciones presentadas en esta tesis son de gran utilidad para la comunidad académica y profesional, abriendo nuevas vías para futuras investigaciones en el ámbito de la ingeniería civil.

Dr. Luis Gabriel Quiroz Torres

Asesor de la tesis

Dr. Luis Gabriel Quiroz Torres

Asesor de la tesis

LISTA DE TABLAS

Tabla N°2. 1: Intervalos de variación de las variables.	53
Tabla N°2. 2: Elementos de un individuo.	57
Tabla N°3.1: Parámetros geométricos.	66
Tabla N°3.2: Parámetros relativos al peso propio de la estructura.	68
Tabla N°3.3: Parámetros relativos a las acciones sísmicas.	69
Tabla N°3.4: Parámetros relativos a los factores de reducción.	70
Tabla N°3.5: Parámetros relativos a las propiedades mecánicas.	70
Tabla N°3. 6: Intervalos de variación de las variables.	71
Tabla N°3.7: Variables consideradas en el problema de optimización.	72
Tabla N°5.1: Comparación de resultados con 10 y 100 ensayos.	87
Tabla N°5. 2: Resultados obtenidos utilizando Saltos Múltiples Aleatorios.	90
Tabla N°5.3: Resultados de las ejecuciones con el método de algoritmos genéticos.	91
Tabla N°5.4: Resultados de la Optimización del Costo en Diversas Ejecuciones.	100
Tabla N°5.5: Resumen Estadístico de la Optimización del Costo de la Estructura.	101
Tabla N°5.6: Resultados de la Optimización del Peso del Concreto en Diversas Ejecuciones.	102
Tabla N°5.7: Resumen Estadístico de la Optimización del Peso del Concreto.	103
Tabla N°5.8: Resultados de la Optimización del Peso del Acero en Diversas Ejecuciones.	105
Tabla N°5.9: Resumen Estadístico de la Optimización del Peso del Concreto.	105

LISTA DE FIGURAS

Figura N°1.1: Proceso de un diseño estructural convencional.	22
Figura N°2.1: Ejemplo del método de los saltos múltiples aleatorios.....	37
Figura N°2. 2: Diagrama de flujo del método de saltos múltiples aleatorios.	42
Figura N°2. 3: Proceso- Se extraen resultados y se verifican las restricciones. .	45
Figura N°2.4: Vecindario o entorno de una solución del problema de optimización.....	48
Figura N°2.5: Diagrama de flujo del método de la Búsqueda por entornos.....	52
Figura N°2.6: Proceso de selección natural en las jirafas.	54
Figura N°2. 7: Representación de un individuo.	58
Figura N°2. 8: Diagrama de flujo del método de Algoritmos Genéticos.	64
Figura N°3.1: Vista en planta de la edificación analizada en la presente tesis. ..	66
Figura N°3.2: Vista del corte A-A de la estructura.	67
Figura N°3.3: Vista del corte B-B de la estructura.	67
Figura N°3.4: Secciones consideradas en las vigas por eje.	72
Figura N°5. 1: Vista en 3D de la estructura creada de manera automatizada. ...	84
Figura N°5. 2: Vista en perfil de la estructura creada de manera automatizada.	85
Figura N°5. 3: Vista en planta de la estructura creada de manera automatizada.	86
Figura N°5. 4: Vista en planta de la estructura creada de manera automatizada.	86
Figura N°5. 5: Costo de Edificación más óptima a través de 100 ensayos.	88
Figura N°5. 6: Resultados obtenidos utilizando Saltos Múltiples Aleatorios.	89
Figura N°5.7: Distribución de Costos por Ejecución- Saltos Múltiples Aleatorios.	90
Figura N°5.8: Distribución de Costos por Ejecución- Algoritmos Genéticos.	92
Figura N°5.9: Costo de la edificación vs el número de generaciones de población 1.	92
Figura N°5.10: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 2.	93
Figura N°5.11: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 3.	93
Figura N°5.12: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 4.	94
Figura N°5.13: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 5.	94
Figura N°5.14: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 6.	95
Figura N°5.15: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 7.	95

Figura N°5.16: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 8.	96
Figura N°5.17: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 9.	96
Figura N°5.18: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 10.	97
Figura N°5.19: Reducción de Costos y Variabilidad por Ejecución.	101
Figura N°5.20: Análisis de Reducción de Peso y Optimización por Ejecución.	103
Figura N°5.21: Análisis de Reducción de Peso del Acero y Optimización por Ejecución.	106

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

H_i	: Altura de entrepiso
D_x	: Longitud del vano del eje X-X
D_y	: Longitud del vano del eje Y-Y
N_x	: Número de ejes en el eje X-X
N_y	: Número de ejes en el eje Y-Y
F_{OBJ}	: Función objetivo
$\vec{p}$	: es el vector que contiene a todos los parámetros del problema de optimización.
$\vec{x}$	: es el vector de variables de diseño que se plantean en el problema de optimización.
r_i	: Restricciones del problema de optimización
AG	: Algoritmos genéticos
Z	: Factor de Zona
S	: Factor de Suelo
U	: Factor de Uso
T_P	: Período que define la plataforma del Factor de Amplificación Sísmica (C)
T_L	: Período que define el inicio de la zona del Factor de Amplificación Sísmica (C)
$\emptyset_{VIGASF}$	: Factor de reducción por flexión en vigas
$\emptyset_{VIGASC}$	: Factor de reducción por cortante en vigas
$\emptyset_{COLUMNAS}$	: Factor de reducción por carga axial en columnas
ϵ_c	: Deformación unitaria máxima del concreto en compresión
f_y	: Esfuerzo de fluencia del acero
g	: Aceleración de la gravedad
$(\vec{b}_{VIGAS})_{n \times n}$	: Es una matriz diagonal que tiene como elementos todas las bases de las vigas.
$(\vec{h}_{VIGAS})_{n \times n}$	: Es una matriz diagonal que tiene como elementos todas las alturas de las vigas.

$(\vec{b}_{COLUMNAS})_{n \times n}$	: Es una matriz diagonal que tiene como elementos todas las bases de las vigas.
$(\vec{h}_{COLUMNAS})_{n \times n}$	: Es una matriz diagonal que tiene como elementos todas las alturas de las vigas.
$\overrightarrow{PV}_{NOM}$	: Matriz diagonal que contiene todos los pesos nominales de los aceros longitudinales.
$\vec{L}_{ASIV}$	: Matriz diagonal que contiene todas las longitudes asignadas para cada tramo de acero, de acuerdo a la ubicación de sus respectivos elementos estructurales.
CC_1	: Costo del concreto en los elementos estructurales.
PU_i	: Precio por metro cúbico de concreto.
D_c	: Longitud del vano que corresponda al elemento estructural, ya sea en el eje X-X o en el eje Y-Y.
CA_1	: Costo total del acero longitudinal en los elementos estructurales.
NT_{SV}	: Número de varillas en el tramo superior de las vigas.
NT_{IV}	: Número de varillas en el tramo inferior de las vigas.
NT_{SC}	: Número de varillas en el tramo superior de las columnas.
NT_{IC}	: Número de varillas en el tramo inferior de las columnas.
NT_{IZC}	: Número de varillas en el tramo izquierdo de las columnas.
NT_{DEC}	: Número de varillas en el tramo derecho de las columnas.
V_{ACERO}	: Precio unitario por kilogramo del acero.
$I_{n \times n}$	: Matriz identidad.
CA_2	: Costo total del acero transversal para vigas y columnas
$\overrightarrow{PV}_{NOM}$	: Vector columna que contiene todos los pesos nominales de los aceros longitudinales.
V_{ACERO}	: Precio unitario por kilogramo del acero.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Cada país tiene determinadas normas de diseño vigentes que se deben de cumplir al realizar un diseño estructural en las edificaciones, cabe mencionar que según McCormac (2006), el diseño estructural significa abarcar la disposición y dimensionamiento de las estructuras y sus partes, de tal forma que puedan soportar las cargas que se les asignen. Sin embargo, debido al ahorro de tiempo, la mayoría de profesionales encargados de realizar este diseño prefieren hacer uso de la experiencia obtenida en otros proyectos y utilizan diseños que emplearon en otras edificaciones y, efectivamente, hacen que la edificación diseñada cumpla con las normas de diseño vigentes establecidas por su país, pero que no son los mejores diseños teniendo en cuenta una serie de factores como el costo de la estructura, el peso de la estructura, el impacto ambiental que tiene este sobre su entorno, la facilidad constructiva, entre otros, lo que ocasiona sobrecostos económicos.

Según Queizan y Sonzogni (2006), la optimización estructural trata de encontrar diseños estructurales que minimicen el costo o peso de la estructura, teniendo determinadas variables de diseño y restricciones que cumplir. Dentro de estos problemas de optimización, existe lo que se conoce como la función objetivo, que según La Torre (2018), es dependiente de las variables de diseño y su valor corresponde a la meta a minimizar en el problema de optimización (costo, peso, impacto ambiental, etc.). Los problemas de optimización estructural pueden ser mono- objetivos, que significa que tienen solo una función objetivo y esta puede ser el costo, peso, impacto ambiental, etc. o multi- objetivos, que significa que tiene dos o más funciones objetivo, como por ejemplo pueden ser el costo y el peso, el peso y el impacto ambiental, el impacto ambiental y la facilidad constructiva, etc.

En la actualidad existen métodos de optimización estructural para poder reducir los costos económicos de algunos tipos de edificaciones de concreto armado teniendo en cuenta las normas de diseño vigentes de su respectivo país, por ejemplo, los métodos basados en criterios de optimización y los métodos basados en programación matemática. La Torre (2018), define a los métodos basados en criterios de optimización como métodos que buscan minimizar la función objetivo hasta que se cumpla con un criterio determinado y no necesariamente llegar a la solución más óptima. De igual manera, La Torre también define a los métodos basados en programación matemática como métodos que aplican algoritmos numéricos con el fin de poder encontrar una solución exacta general, siempre que sea posible la programación de todo el procedimiento para poder resolver el problema de optimización. Dentro de los métodos basados en programación matemática, se encuentran los métodos heurísticos, que según Payá (2007) son algoritmos sencillos e intuitivos, que necesitan de un costo computacional muy elevado, es decir, que la ejecución de estos algoritmos necesitará evaluarse mucho tiempo en la computadora, ya que la función objetivo y las restricciones del problema de optimización requieren iterarse una gran cantidad de veces. Existen muchos métodos heurísticos, en donde se encuentran los siguientes: Saltos Múltiples Aleatorios, Búsqueda por Entornos, Algoritmos Genéticos y Cristalización Simulada.

Entre los autores que elaboraron investigaciones acerca de los métodos basados en criterios de optimización, se encuentra La Torre (2018) que realizó un estudio sobre la optimización estructural enfocado en el costo de edificaciones educativas de concreto armado. El objetivo general del estudio fue optimizar de forma gráfica una institución educativa típica 780 actual (denominado así por la dimensión del ancho que existe entre los ejes del pórtico, el cual es 780 cm), minimizando el costo de los materiales de los elementos estructurales de concreto armado. El autor realiza como procedimiento un primer análisis estructural para tener los valores de las fuerzas internas de los elementos de la superestructura de la edificación, paso seguido optimiza de forma gráfica la sección transversal de las vigas, teniendo en cuenta la función objetivo y las restricciones para los valores discretos tanto de ancho como de peralte de las vigas.

Los resultados obtenidos de este estudio han sido que el costo de la superestructura de la institución educativa presentada disminuye si se proyecta con concreto premezclado de resistencia superior a 21 MPa y losas aligeradas con bloques de poliestireno expandido.

Respecto a los autores que realizaron investigaciones de los métodos de basados en programación matemática, se encuentra Payá (2007) que utilizó diseño algoritmos que permitan automatizar el diseño óptimo de pórticos de concreto armado. Este trabajo analiza de manera general la optimización mono- objetivo y multi- objetivo. Para la minimización del costo económico de un pórtico de dos vanos y cuatro plantas sometido a fuerzas verticales y horizontales utilizó cinco métodos heurísticos: Saltos Múltiples Aleatorios, Búsqueda por Entornos, Cristalización Simulada, Aceptación por Umbrales y Algoritmos Genéticos. De los resultados obtenidos al emplear estos métodos, se puede apreciar que hay una disminución de los costos económicos de las superestructuras respecto al costo inicial.

Como se aprecia en los dos últimos párrafos, hay investigaciones que aplican los métodos basados en criterios de optimización y otros que aplican los métodos basados en programación matemática, de donde se puede mencionar lo siguiente:

- Los métodos basados en criterios de optimización pueden llegar a ser laboriosos o difíciles de aplicar cuando las restricciones no están bien limitadas, ya que estos métodos requieren de tener constante supervisión para poder saber qué variables de diseño varían, además de poder saber qué tanto cambian sus valores. Por otro lado, en los métodos basados en programación matemática no se requiere de una supervisión constante, debido a que en la elaboración del algoritmo se consideran todas las restricciones que pueda haber en el problema de optimización, y así evitar estar verificando resultados constantemente.

En base a las investigaciones presentadas, el aporte principal de esta investigación radica en la aplicación de métodos heurísticos para la optimización estructural de edificaciones de mediana altura de concreto armado en la ciudad de Lima y así poder estimar el porcentaje de variación tanto del costo y dimensiones de los elementos estructurales de las edificaciones a optimizar entre una solución inicialmente planteada con otra que es la solución optimizada, que es resuelta con los métodos heurísticos.

1.2 PROBLEMÁTICA

En la actualidad, las investigaciones sobre optimización estructural son muy importantes debido a que pertenecen a un área de investigación de la ingeniería estructural que puede llegar a aportar conocimientos para tener diseños estructurales de bajo costo, menor impacto ambiental, mayor facilidad constructiva, etc. Para realizar una optimización estructural, generalmente se necesitan hacer varias iteraciones, correcciones y ajustes respecto al proyecto que se planteó de manera inicial hasta obtener el diseño que cumpla con lo que el proyectista desee, es decir, un diseño seguro y que cumplan con las normas requeridas. Según Hernández (1990), la experiencia del ingeniero que realiza el diseño estructural aporta mucho en cuanto al resultado final y también en el tiempo que se emplea, ya que existen gran cantidad de soluciones para un problema.

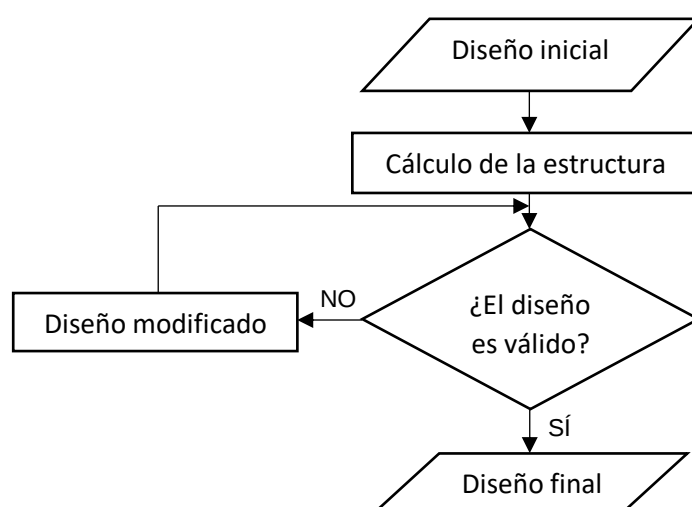


Figura N°1.1: Proceso de un diseño estructural convencional.

Fuente: Elaboración propia.

Al existir muchas soluciones frente a un solo problema de diseño estructural, diversos autores estudiaron el cómo obtener la estructura más óptima frente a un problema estructural. Según Moragues (1980), la estructura óptima es dependiente del objetivo que se requiere obtener en el diseño, por ejemplo, una estructura con el menor peso posible, una estructura que tenga un bajo costo o una estructura que se realice en el menor tiempo posible. Es así, teniendo en cuenta los diversos factores que se necesitan para optimizar una solución en un problema de diseño estructural, la sociedad requiere, por ejemplo, que una estructura sea lo más económica y a la vez que sea segura. La seguridad de una edificación se puede verificar con la normativa vigente del país, en el caso del Perú hay dos: la Norma Técnica Peruana E.030 y la Norma Técnica Peruana E.060

De acuerdo con Osyczka (1985), el tener muchos factores (costo, peso, tiempo de ejecución, etc.) hace que estos mismos entren en conflicto, por ejemplo, al optimizar el costo, no se podrá optimizar el peso o al optimizar el tiempo de ejecución, no se podrá optimizar el costo de la estructura. Es así, que el ingeniero civil o estructural debe de buscar una solución que encuentre el mejor resultado teniendo en cuenta todos los factores que se plantean optimizar.

La falta de realizar una optimización estructural en las edificaciones de concreto armado, ocasionan sobre costos en el proyecto a ejecutar, ya que se plantea uno de los muchos diseños estructurales, por lo que, las dimensiones finales que se plantean hacen que el diseño cumpla con la normativa vigente, pero que no necesariamente sea el más económico.

En la actualidad, aún no hay muchos estudios de optimización estructural aplicando métodos heurísticos en el Perú. Por ello, con la presente investigación, se espera aportar con el conocimiento respecto a esta rama de la ingeniería estructural.

Problema General

¿La aplicación de métodos heurísticos en el proceso de diseño de edificaciones regulares de mediana altura de concreto armado en la ciudad de Lima, usando las normas vigentes, permitirá optimizar las dimensiones de los elementos estructurales de la superestructura?

Problemas Específicos

- ¿Es posible identificar las variables de diseño, restricciones y función objetivo del problema de optimización?
- ¿Es posible resolver el problema de optimización aplicando métodos heurísticos?
- ¿En qué porcentaje se optimizarán las dimensiones, cantidad de acero y costo de los elementos estructurales?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Aplicar métodos heurísticos en el proceso de diseño de edificaciones regulares de concreto armado de mediana altura ubicadas en la ciudad de Lima diseñadas bajo las normas vigentes para optimizar las dimensiones de los elementos estructurales de la superestructura.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir el problema de optimización para identificar las variables de diseño, restricciones y función objetivo.
- Aplicar métodos heurísticos para resolver el problema de optimización.
- Estimar el porcentaje de optimización de las dimensiones, cantidad de acero y costo de los elementos estructurales.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis General

La aplicación de métodos heurísticos en el proceso de diseño de edificaciones regulares de concreto armado de mediana altura ubicadas en la ciudad de Lima diseñadas bajo las normas vigentes permite optimizar las dimensiones de los elementos estructurales de la superestructura y el costo del acero de refuerzo.

1.4.2 Hipótesis Específicas

- Mediante la definición del problema de optimización se pueden identificar las variables de diseño, restricciones y función objetivo.
- Mediante la aplicación de métodos heurísticos se puede resolver el problema de optimización.
- Es posible estimar el porcentaje de optimización de las dimensiones, cantidad de acero y costos de los elementos estructurales.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

Según Lozano, Velásquez y Zepeda (2010), la optimización es un campo de investigación que busca desarrollar metodologías que permitan encontrar nuevos diseños, basándose en la modificación de la forma de las estructuras, cumpliendo con diversos criterios como por ejemplo temperatura, reducción de peso, factores de seguridad, etc.

La optimización estructural, según Queizan y Sonzogni (2006), trata de encontrar diseños estructurales que minimicen el costo o peso de la estructura, teniendo determinadas variables de diseño y restricciones que cumplir.

Radica principalmente en seleccionar los mejores valores para las variables de diseño que estén relacionadas con propiedades como lo son la geometría, sección transversal y/o topología de los elementos estructurales. (La Torre, 2018)

Según Payá (2007), para poder plantear un problema de optimización estructural es necesario que, aparte de la función objetivo, se definan:

- Los parámetros o elementos de valor constante, que son las variables que no varían o en todo el proceso de optimización.
- Las variables de diseño, que son las variables que pueden variar en el proceso de optimización. Todos los valores que adoptan estas variables de diseño definen al conjunto del espacio de soluciones.
- Las restricciones, que son las condiciones que se deben de cumplir para que el problema pueda considerarse realmente como tal, porque con estas restricciones se tendría un sentido físico o geométrico y cumplir con las condiciones de diseño que establece la normativa vigente. Los diseños que cumplen con todas las restricciones se llaman soluciones factibles.

2.2 TIPOS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

Klarbring (2009) menciona los siguientes tipos de optimización estructural:

2.2.1 Optimización de la Sección Transversal

Este tipo de optimización se da cuando las variables de diseño son la forma y dimensiones de la sección transversal de los elementos estructurales.

2.2.2 Optimización de la Forma o Geometría

Este tipo de optimización se da cuando las variables de diseño describen las fronteras del dominio y pueden llegar a modificar la geometría del modelo.

2.2.3 Optimización Topológica

Este tipo de optimización se da cuando las variables de diseño tratan de distribuir de la mejor manera la materia de un determinado dominio. Unos ejemplos podrían ser la existencia o no de elementos estructurales, la forma de cómo se conectan los elementos entre sí, etc.

2.3 FUNCIÓN OBJETIVO

2.3.1 Definición de la Función Objetivo

En el ámbito de la optimización matemática, la función objetivo es un componente fundamental que define el objetivo principal del problema. Es una expresión matemática que representa la medida de rendimiento, calidad o eficiencia que se busca maximizar o minimizar. La función objetivo se construye en función de las variables del problema y los parámetros que caracterizan la situación específica. El propósito de la optimización es encontrar los valores de las variables que optimizan o satisfacen los requisitos de la función objetivo, lo que puede llevar a una solución óptima del problema (Bazaraa, Sherali, & Shetty, 2010).

2.3.2 Significado y Significancia de la Función Objetivo

La función objetivo tiene un papel crucial en la toma de decisiones y el diseño de soluciones en problemas de optimización. Representa el criterio o métrica que se pretende optimizar, ya sea maximizando los beneficios, minimizando los costos, optimizando la eficiencia o alcanzando cualquier otro objetivo deseado. La elección de la función objetivo refleja los objetivos y prioridades del problema y guía la búsqueda de soluciones que cumplan con estos criterios. La formulación adecuada de la función objetivo es esencial para obtener resultados coherentes y significativos (Chong & Zak, 2013).

2.3.3 Variables y Parámetros en la Función Objetivo

La función objetivo se construye a partir de las variables del problema y los parámetros que definen la situación particular. Las variables representan las incógnitas cuyos valores se determinan para optimizar la función objetivo. Los parámetros influyen en la forma y el comportamiento de la función objetivo, ya que pueden representar coeficientes de ponderación, costos, ganancias u otras magnitudes relevantes. La combinación de variables y parámetros en la función objetivo crea una representación matemática que guía la búsqueda de soluciones óptimas (Boyd & Vandenberghe, 2004).

2.3.4 Importancia en la Toma de Decisiones y Diseño

La función objetivo desempeña un papel esencial en la toma de decisiones y el diseño de soluciones en una variedad de disciplinas. En campos como la ingeniería, la economía, la ciencia y la planificación, la función objetivo define los criterios de optimización que guían la selección de soluciones óptimas. Al formular la función objetivo de manera adecuada, los tomadores de decisiones pueden evaluar diferentes alternativas y elegir la opción que mejor cumpla con sus objetivos y restricciones. La representación precisa de la función objetivo es fundamental para la obtención de soluciones significativas (Birge & Louveaux, 2011).

2.3.5 Representación vectorial de la Función Objetivo

En 1981, Kirsch (citado en La Torre, 2018) define a la función objetivo como una función que depende de las variables de diseño y que su propósito es minimizar el problema de optimización.

Esta función objetivo se puede representar de la siguiente manera:

$$\vec{f} = [f_1(\vec{x}) \quad f_2(\vec{x}) \quad f_3(\vec{x}) \quad \dots \quad f_n(\vec{x})]^T$$

En donde:

$\vec{f}$: es el vector de funciones objetivo que se desean optimizar.

$\vec{x}$: es el vector de variables de diseño que se plantean en el problema de optimización.

Existen dos tipos de funciones objetivo: función mono- objetivo y función multi-objetivo. Según Payá (2007), la función mono- objetivo es aquella que se da cuando el vector $\vec{f}$ tiene una sola componente, es decir, que solo se tiene una función objetivo, mientras que la función multi- objetivo se da cuando el vector $\vec{f}$ posee de dos a más componentes, es decir, posee dos o más funciones objetivo.

2.4 VARIABLES DE DISEÑO

Las variables de diseño son los valores que no fueron asignados previamente durante el proceso de optimización. Según los autores Gallagher (1973) y Kirsch (1981), es posible pre- asignar valores para poder reducir el número total de variables en el problema. Hay diferentes tipos de variables en un problema de optimización, que a continuación se detallan:

2.4.1 Variables Continuas

Las variables continuas son un concepto fundamental en estadísticas y matemáticas que se refiere a las cantidades que pueden tomar un número infinito de valores dentro de un intervalo dado. A diferencia de las variables discretas, que solo pueden asumir valores específicos y separados, las variables continuas pueden tomar cualquier valor dentro de un rango específico, lo que las hace ideales para representar medidas precisas y procesos que cambian de manera constante (Dunn & Everitt, 1995).

2.4.2 Variables Discretas

Las variables discretas son un concepto esencial en estadísticas y matemáticas que se refiere a cantidades que solo pueden tomar valores específicos y separados dentro de un conjunto finito o contable. A diferencia de las variables continuas, que pueden tomar una infinidad de valores en un rango determinado, las variables discretas se caracterizan por tener valores individuales y a menudo cuentan elementos o eventos (Sawyer, 2012).

2.4.3 Variables Activas

Las variables activas son un concepto crucial en la optimización y el análisis de problemas de programación lineal y no lineal. En el contexto de la optimización, las variables activas son aquellas que están en uso y afectan directamente el valor óptimo de la función objetivo o la satisfacción de las restricciones del problema. Estas variables pueden cambiar a medida que se busca una solución óptima y juegan un papel fundamental en la determinación de los puntos factibles y la convergencia de los algoritmos de optimización (Nocedal & Wright, 2006).

2.4.4 Variables Pasivas

En el contexto de la optimización y el análisis de problemas matemáticos, las variables pasivas juegan un papel importante al indicar aquellas que no afectan directamente el valor óptimo de la función objetivo ni la satisfacción de las restricciones del problema. Estas variables permanecen inactivas o no cambian su valor en la solución óptima y, por lo tanto, no contribuyen a la búsqueda de soluciones óptimas. Las variables pasivas son una consideración esencial para simplificar la representación y resolución de problemas de optimización (Bazaraa, Sherali, & Shetty, 2010).

2.5 ESPACIO DE SOLUCIONES

2.5.1 Definición del Espacio de Soluciones

El espacio de soluciones, en el ámbito de la optimización y la modelización matemática, se refiere al conjunto de todos los posibles valores que pueden tomar las variables de un problema dado. Este espacio abarca todas las combinaciones factibles de valores para las variables, de acuerdo con las restricciones impuestas por el problema. La noción del espacio de soluciones es fundamental para analizar y encontrar soluciones óptimas, ya que representa todas las alternativas que deben evaluarse para identificar la mejor respuesta posible (Wolpert & Macready, 1997).

2.5.2 Exploración del Espacio de Soluciones

La exploración del espacio de soluciones es una tarea esencial en la optimización y la búsqueda de soluciones óptimas. Al considerar todas las combinaciones posibles de valores para las variables dentro de los límites establecidos por las restricciones, es posible encontrar la configuración que maximiza o minimiza la función objetivo del problema. La exploración del espacio de soluciones puede llevarse a cabo mediante algoritmos y métodos de optimización que evalúan y comparan diferentes combinaciones de valores para encontrar la mejor solución (Srinivas & Patnaik, 1994).

2.5.3 Dimensión y Complejidad del Espacio de Soluciones

El espacio de soluciones puede variar en dimensiones y complejidad según la cantidad de variables y restricciones involucradas en un problema. En problemas con un número limitado de variables, el espacio de soluciones puede ser explorado de manera más exhaustiva. Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de variables y restricciones, la exploración completa del espacio de soluciones puede volverse computacionalmente costosa y requerir métodos de optimización más eficientes y especializados (Holland, 1975).

2.5.4 Impacto en la Toma de Decisiones y Diseño

El concepto del espacio de soluciones tiene un impacto significativo en la toma de decisiones y el diseño de soluciones en diversas disciplinas. Al comprender las diferentes combinaciones de valores que pueden llevar a soluciones viables, los tomadores de decisiones pueden evaluar las implicaciones de sus elecciones y seleccionar la configuración óptima para cumplir con sus objetivos. La representación y exploración adecuadas del espacio de soluciones son cruciales para encontrar soluciones efectivas y eficientes en áreas como la ingeniería, la economía y la ciencia (Saaty, 1980).

2.6 PARÁMETROS

2.6.1 Definición de Parámetros en Optimización

En el contexto de la optimización matemática y la modelización de problemas, los parámetros son valores numéricos que caracterizan las condiciones y características específicas del problema. Estos valores influyen en la definición de las restricciones, la función objetivo y las limitaciones de un problema de optimización. Los parámetros son esenciales para configurar y adaptar el problema a situaciones particulares, y su variación puede afectar directamente la búsqueda de soluciones óptimas (Bertsimas & Tsitsiklis, 1997).

2.6.2 Importancia de los Parámetros en la Optimización

Los parámetros desempeñan un papel crucial en la formulación y resolución de problemas de optimización. Estos valores numéricos pueden representar coeficientes de restricciones, límites, costos, probabilidades u otras magnitudes relevantes en el contexto del problema. La elección adecuada de los parámetros es fundamental para lograr una representación precisa del problema y obtener resultados significativos. La manipulación y ajuste de los parámetros permiten explorar diferentes escenarios y tomar decisiones informadas (Bazaraa, Sherali, & Shetty, 2010).

2.6.3 Adaptación de Parámetros en la Búsqueda de Soluciones

En el proceso de optimización, la adaptación y ajuste de los parámetros juegan un papel importante en la búsqueda de soluciones óptimas. Al variar los valores de los parámetros, es posible explorar diferentes configuraciones y evaluar su impacto en la función objetivo y las restricciones. Los algoritmos de optimización a menudo incluyen parámetros que afectan la convergencia, el tamaño de paso y otros aspectos del proceso de búsqueda. La elección adecuada de estos parámetros es esencial para lograr una búsqueda eficiente y efectiva (Srinivas & Patnaik, 1994).

2.6.4 Impacto en la Precisión y Eficiencia de la Optimización

El impacto de los parámetros en la precisión y eficiencia de la optimización es significativo. La elección inadecuada de parámetros puede llevar a soluciones subóptimas, convergencia lenta o incluso la incapacidad de encontrar soluciones factibles. Por otro lado, la selección cuidadosa de parámetros puede mejorar la velocidad de convergencia, la calidad de las soluciones y la capacidad de abordar problemas más complejos. La consideración de los parámetros es un aspecto clave para obtener resultados confiables en la optimización (Boyd & Vandenberghe, 2004).

2.6.5 Representación vectorial de los Parámetros

Los parámetros de un problema de optimización se pueden representar vectorialmente de la siguiente manera:

$$\vec{p} = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad \dots \quad p_n]^T$$

Donde:

$\vec{p}$: es el vector que contiene a todos los parámetros del problema de optimización.

2.7 RESTRICCIONES EN UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

2.7.1 Definición de Restricciones en Optimización

Las restricciones son condiciones que limitan o condicionan las posibles soluciones factibles de un problema. Estas restricciones establecen relaciones y limitaciones entre las variables del problema, reflejando las condiciones y requisitos que deben cumplirse para que una solución sea considerada viable. Las restricciones pueden ser expresadas mediante desigualdades o igualdades, y su formulación es esencial para definir el espacio de soluciones factibles y restringir las posibilidades de búsqueda (Bertsimas & Tsitsiklis, 1997).

2.7.2 Importancia de las Restricciones en la Optimización

Las restricciones son elementos críticos en la optimización, ya que delimitan las soluciones factibles y guían la búsqueda de soluciones óptimas. Estas limitaciones pueden representar limitaciones físicas, recursos disponibles, políticas o cualquier otro requisito esencial en el contexto del problema. Las restricciones ayudan a modelar la realidad y a asegurarse de que las soluciones generadas sean viables y practicables en situaciones reales. La consideración precisa y adecuada de las restricciones es crucial para obtener soluciones que satisfagan todas las condiciones necesarias (Chong & Zak, 2013).

2.7.3 Representación Vectorial de las Restricciones

Según U. Kirsch (1981), las restricciones son aquellas funciones de igualdad o desigualdad que necesariamente deben ser satisfechas para obtener resultados admisibles en un problema de optimización.

Estas restricciones pueden representarse de la siguiente manera:

$$r_i(\vec{x}, \vec{p}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, z$$

Donde:

- r_i : conjunto de restricciones del problema de optimización.
- $\vec{p}$: es el vector que contiene a todos los parámetros del problema de optimización.
- $\vec{x}$: es el vector de variables de diseño que se plantean en el problema de optimización.
- $i = 1, 2, \dots, z$: indica que hay un total de z restricciones en el problema, y el índice i las enumera

2.8 MÉTODOS HEURÍSTICOS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

En los problemas de optimización estructural, se pueden utilizar diferentes enfoques, principalmente clasificados en métodos deterministas y métodos heurísticos.

Los métodos deterministas, como los métodos de gradiente, son ampliamente utilizados en la optimización. Estos métodos siguen una trayectoria predefinida basada en la evaluación de la función objetivo y sus derivadas, y dirigen el proceso de búsqueda hacia un óptimo local. Sin embargo, en problemas con espacios de soluciones complejos o no lineales, estos métodos pueden quedarse atrapados en óptimos locales, limitando su capacidad para encontrar una solución global (Nocedal & Wright, 2006).

En contraste, los métodos heurísticos introducen elementos aleatorios para escapar de los óptimos locales y explorar más ampliamente el espacio de búsqueda, lo que los hace más efectivos en la resolución de problemas complejos (Goldberg, 1989). Estos incluyen enfoques como la búsqueda por entornos, los algoritmos genéticos, la cristalización simulada, y el método de Saltos Múltiples Aleatorios.

Payá (2007) menciona que estos son algoritmos sencillos e intuitivos que se utilizan para encontrar buenas soluciones a problemas. Estos métodos requieren un costo computacional muy elevado, ya que la función objetivo y las restricciones del problema de optimización deben evaluarse una gran cantidad de veces. Entre estos métodos de optimización se encuentran los Saltos Múltiples Aleatorios, la Búsqueda por Entornos, los Algoritmos Genéticos y la Cristalización Simulada.

2.8.1 Saltos Múltiples Aleatorios

La estrategia de los saltos múltiples aleatorios o también llamado “Random Walk” es un método heurístico que consiste en elegir un conjunto extenso de soluciones del problema de optimización de manera aleatoria tal que de este conjunto se seleccione la solución óptima (Payá, 2007).

Se basa en la exploración de múltiples puntos en el espacio de soluciones de manera aleatoria. En lugar de seguir una estrategia determinista, como en algunos métodos de gradiente, este enfoque se centra en saltar de manera aleatoria entre soluciones en busca de áreas prometedoras para la optimización. A medida que el algoritmo avanza, estos saltos aleatorios pueden conducir a la identificación de soluciones óptimas o áreas cercanas a ellas (Wu & Bai, 2010).

El método de Saltos Múltiples Aleatorios se ha aplicado en una variedad de problemas de optimización, incluidos aquellos con espacios de soluciones complejos y no lineales. Una de las ventajas de este enfoque es su capacidad para escapar de óptimos locales al explorar de manera aleatoria diferentes regiones del espacio de búsqueda. Además, su naturaleza no determinista permite una exploración más diversificada, lo que puede ser beneficioso para encontrar soluciones globales (Wang & Wu, 2017).

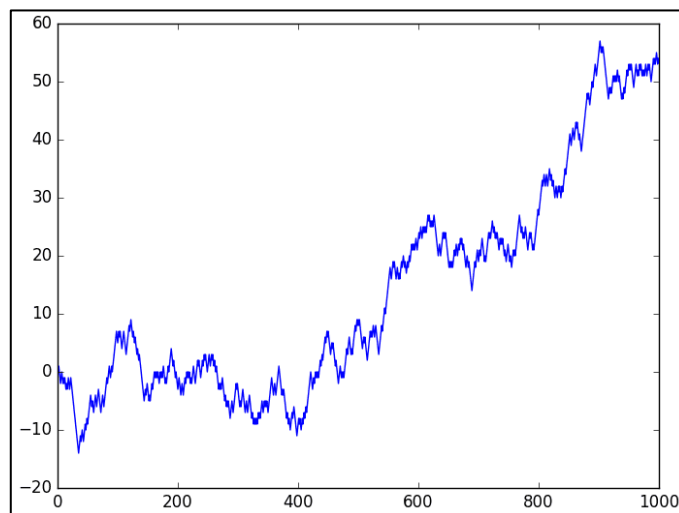


Figura N°2.1: Ejemplo del método de los saltos múltiples aleatorios.

Fuente: *A Gentle Introduction to the Random Walk for Times Series Forecasting with Python*,
Brownlee 2017

Cabe mencionar que las soluciones obtenidas pueden ser tanto las que resuelvan el problema de optimización como las que no, esto debido a que el método toma valores aleatorios de las variables de diseño y realiza el cálculo respectivo de su función objetivo para evaluar su factibilidad.

2.8.1.1 Introducción al Método

Para resolver el problema de optimización, se debe plantear de manera inicial un conjunto de soluciones generadas de manera aleatoria que contenga una gran cantidad de elementos. Este conjunto tendrá tres tipos de elementos a los cuales llamaremos:

- Soluciones no factibles: son soluciones que no cumplen con las restricciones dadas para el problema de optimización.
- Soluciones factibles: son soluciones que sí cumplen con las restricciones dadas para el problema de optimización.
- Solución óptima: es la solución que es factible, además, es la de menor coste.

Este método tiene una serie de limitaciones, que a continuación se mencionan:

- Para obtener una solución factible se necesita un conjunto de soluciones muy extenso, además, el número de estas soluciones factibles depende de cómo se limiten los intervalos de las variables, por lo que se debe de tener un intervalo establecido a través de prueba y error aplicando el algoritmo de este método, el cual se menciona más adelante.
- Como ya se mencionó, se tienen soluciones factibles y no factibles. Estos resultados al ser obtenidos de manera aleatoria, no pueden ser utilizados nada más que para saber cuántas soluciones tenemos tanto factibles como no factibles.

De lo anterior mencionado, se puede decir que este método no cumple con todas las expectativas para poder resolver un problema de optimización estructural de la manera eficiente, ya que requiere de una cantidad extensa y aleatoria de soluciones para poder llegar a tener soluciones factibles y no factibles. A pesar de esto, se puede resaltar de este método lo siguiente:

- Se puede estimar una relación de cantidad entre soluciones factibles y no factibles.
- Puede usarse la solución óptima de este método como punto de partida para los demás métodos heurísticos.

2.8.1.2 Esquema General del Método de Saltos Múltiples Aleatorios

— Consideraciones pre- análisis

Realizadas manualmente por el autor. Se definen los nombres de los elementos estructurales en el software ETABS (vigas, columnas y losa), así como también la ubicación de cada uno de estos. Luego, se colocan las cargas que serán soportadas por la estructura: cargas muertas, cargas vivas y cargas sísmicas. Por último, se procede a pre- dimensionar los elementos estructurales.

Se definen las combinaciones de carga que se realizarán para el análisis y diseño estructural. Se escoge el número de iteraciones a realizar y se establece la cantidad de núcleos de la computadora se utilizarán.

— Automatización con el software ETABS

Se ejecuta el software ETABS mediante un código de programación. El software se abrirá una cantidad de veces igual a la cantidad de núcleos utilizados por la computadora. Es importante destacar que cada instancia del software trabajará de manera independiente.

El código de programación selecciona las dimensiones de los elementos estructurales, el diámetro de los aceros longitudinales y transversales. También determina la cantidad de varillas de acero en los 'tramos' de las vigas y los 'tramos' de las columnas. Por último, define la cantidad de estribos que se colocarán en cada columna.

Con esta información, el código aplica las dimensiones de los elementos estructurales en el software ETABS y procede a realizar el análisis dentro del mismo.

El código extrae los resultados del software ETABS, como cortantes de vigas, momentos de vigas, carga axial de columnas, momentos de columnas, periodos de la estructura, masas participativas y desplazamiento de nodos de la estructura. Finalmente, el código cierra el software ETABS y libera la memoria caché utilizada, con el fin de no disminuir los tiempos de ejecución entre iteraciones.

— Optimización de la estructura

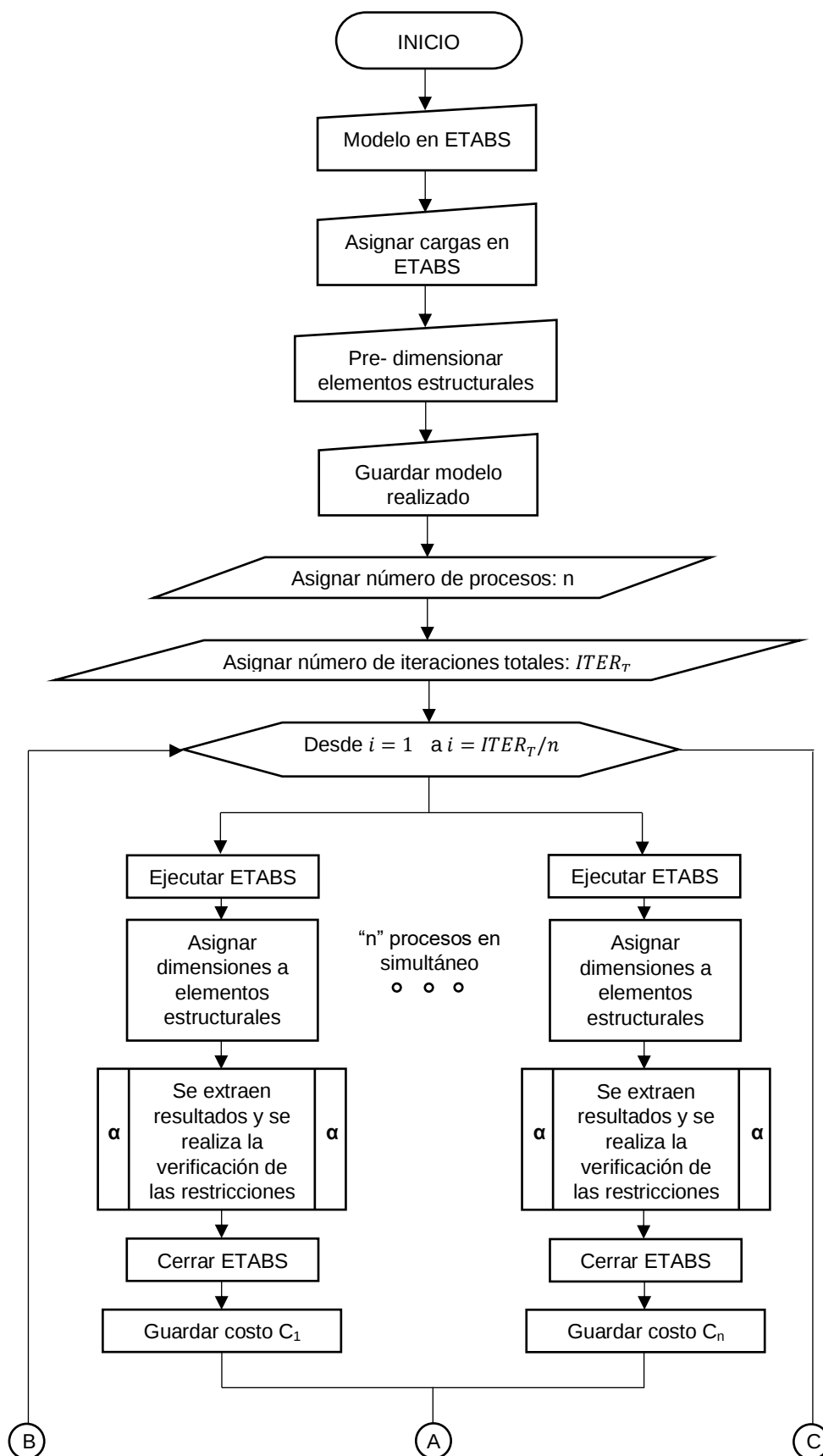
Los resultados del software ETABS se ordenan de tal manera que primero se tenga la solución del primer proceso (S_1), del segundo proceso (S_2), así hasta tener la solución del enésimo proceso (S_n).

Con los datos del software, se procede a realizar la verificación de las restricciones de la NTP.030 y NTP.060. En caso se cumpla con todas las restricciones establecidas, entonces se considera una solución factible y si no cumple se llamará solución no factible.

El proceso se repetirá hasta que la cantidad de soluciones (ST) sea igual a las iteraciones establecidas de manera inicial ($ITER_T$).

La primera solución factible se considerará solución óptima (S_0) y su costo se llamará costo óptimo (C_0). A partir de esta solución óptima, se determinarán las demás soluciones óptimas. Aquella solución que sea factible y que tenga menor costo que la solución óptima anterior, será la nueva solución óptima.

Finalmente, se guardan los resultados obtenidos de la solución óptima: dimensiones de vigas y columnas, diámetros de acero de vigas y columnas, ganchos de columnas y el costo de la estructura. De igual manera, se guardan los resultados de las soluciones factibles, esto para poder tener una población inicial para utilizar el método de los algoritmos genéticos. Todo el esquema del método se presenta a continuación mediante un diagrama de flujo.



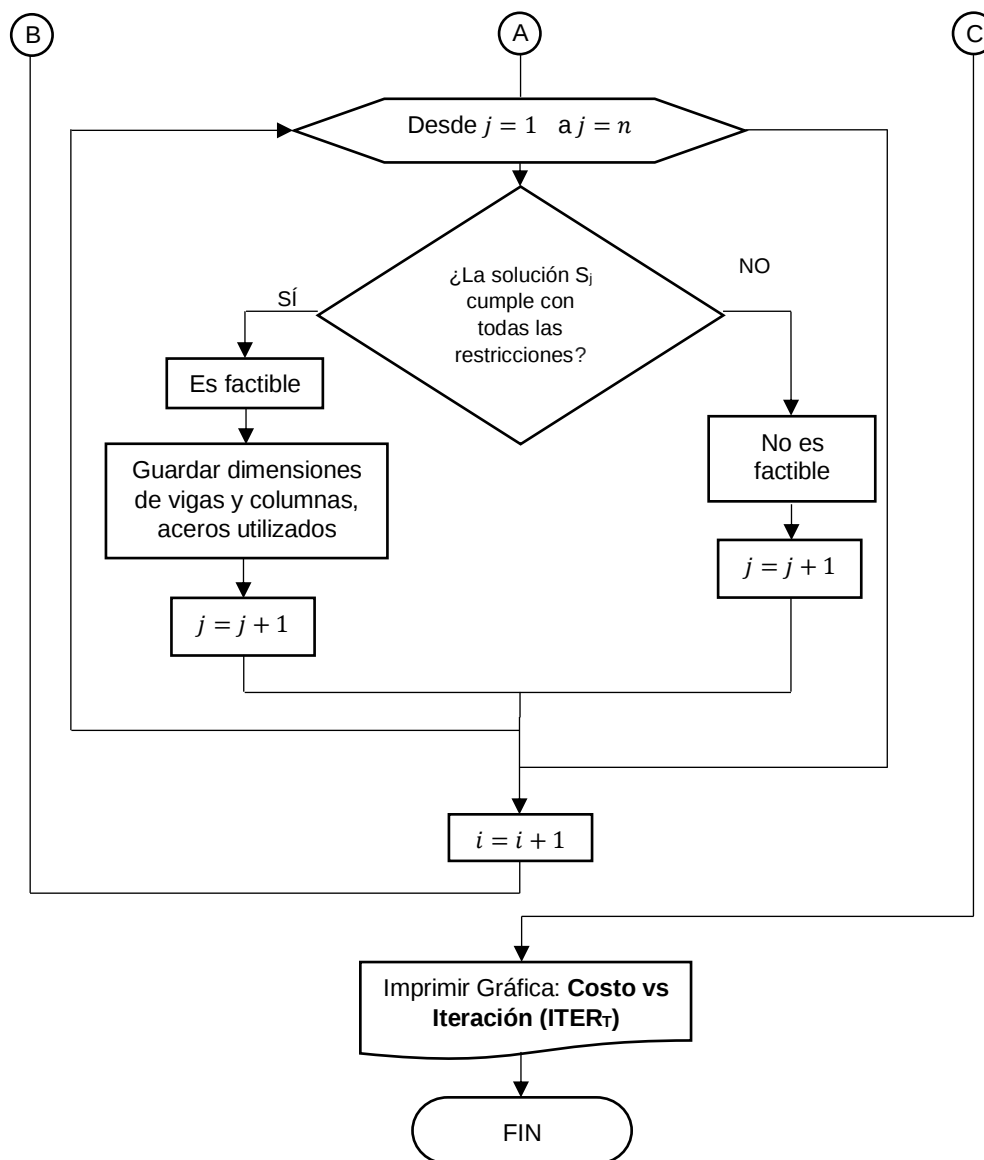


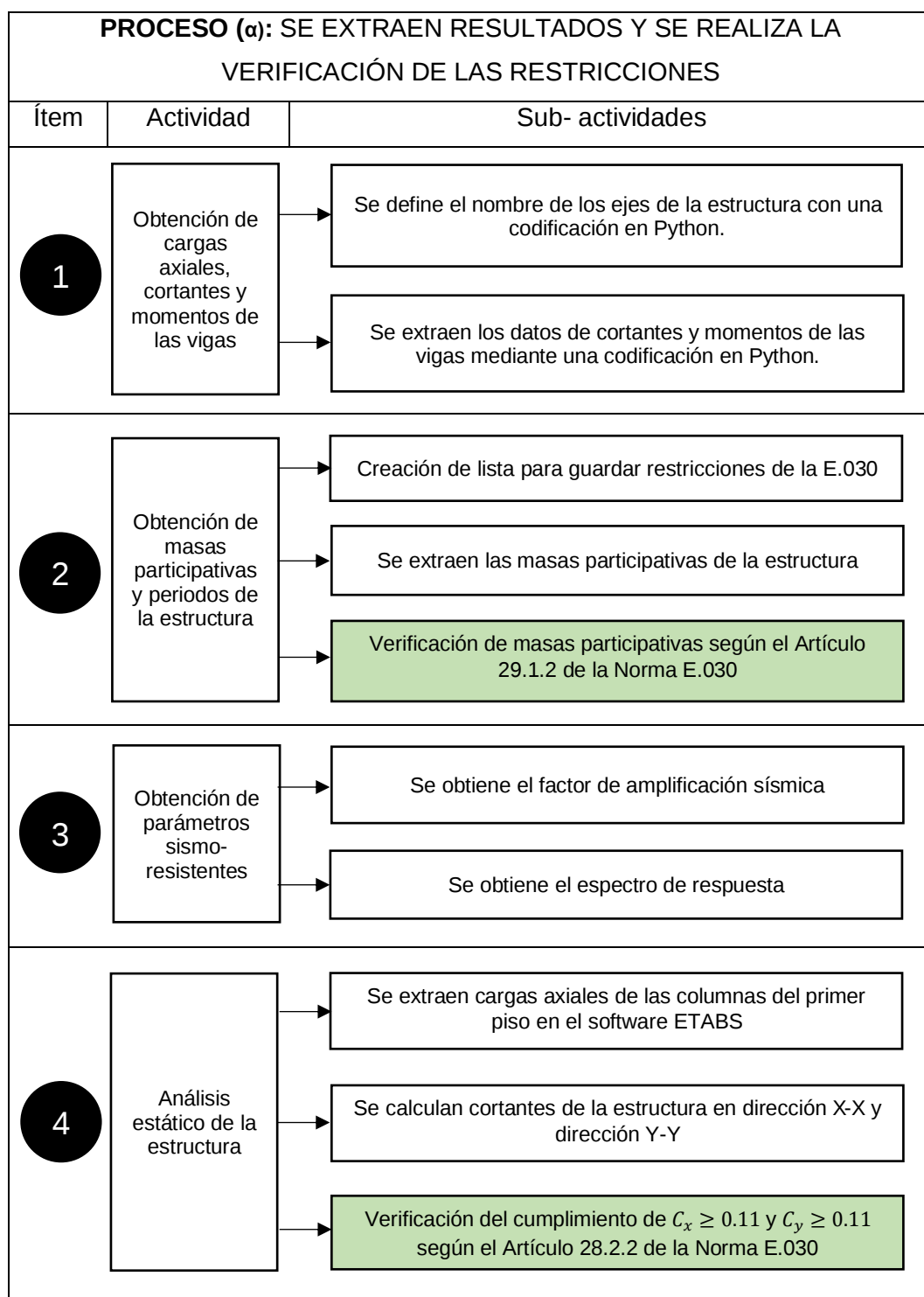
Figura N°2. 2: Diagrama de flujo del método de saltos múltiples aleatorios.

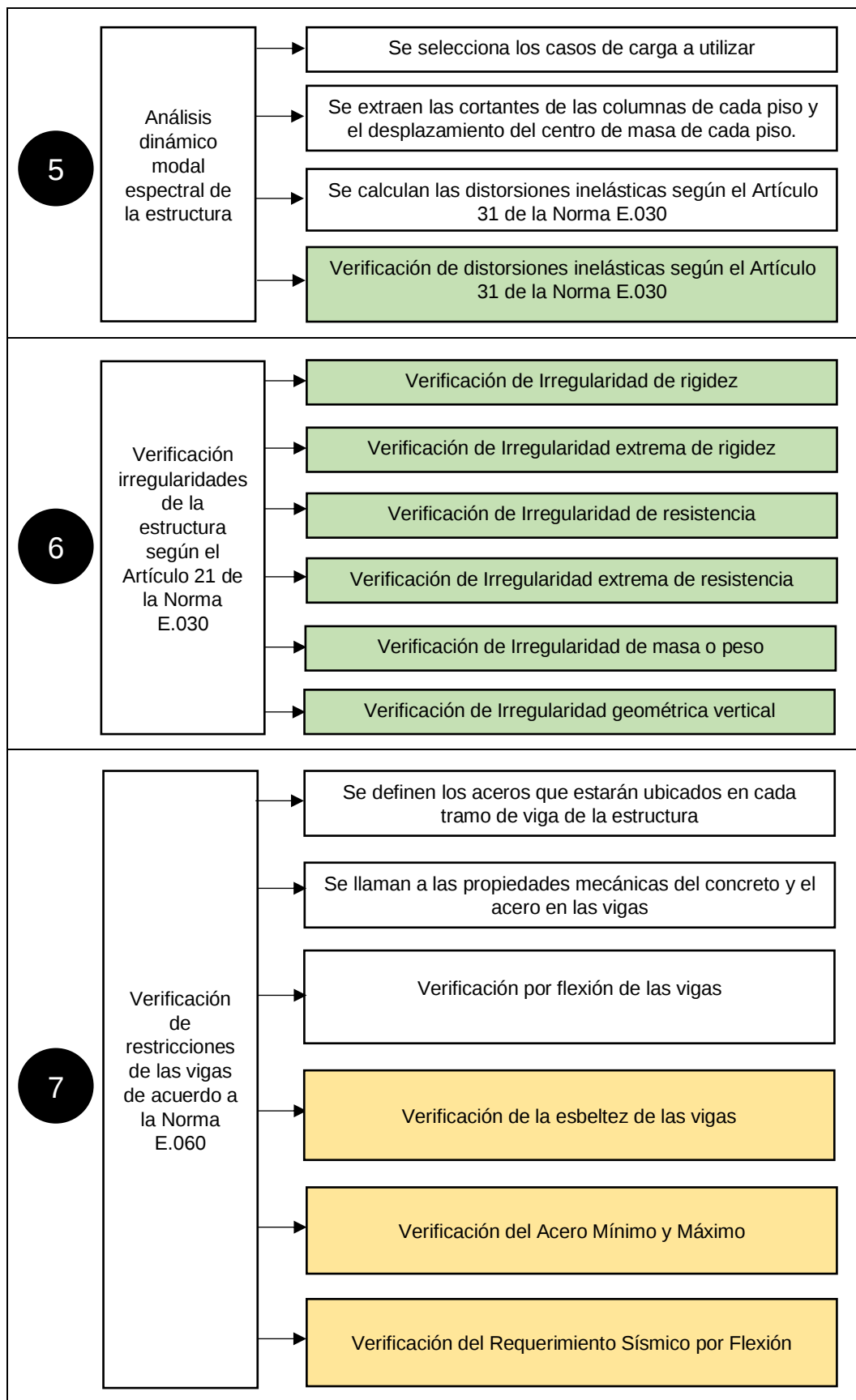
Fuente: Elaboración propia.

La Figura N°2.3 detalla el proceso α : “Se extraen resultados y se realiza la verificación de las restricciones” del diagrama de flujo de la Figura N°2.2.

En el primer ítem se indica que se extraen los siguientes resultados del software ETABS: cargas axiales, cortantes y momentos de las vigas. Paso seguido, se extraen las masas participativas y los periodos de la estructura.

Luego, se realiza una codificación para la obtención de los parámetros sismo-resistentes que se mencionan en la norma E.030. Después, se realiza el análisis estático de la estructura y el análisis dinámico modal espectral. Por último, se realizan las verificaciones de las restricciones de acuerdo a las normas E.030 y E.060, para luego obtener el precio de la estructura.





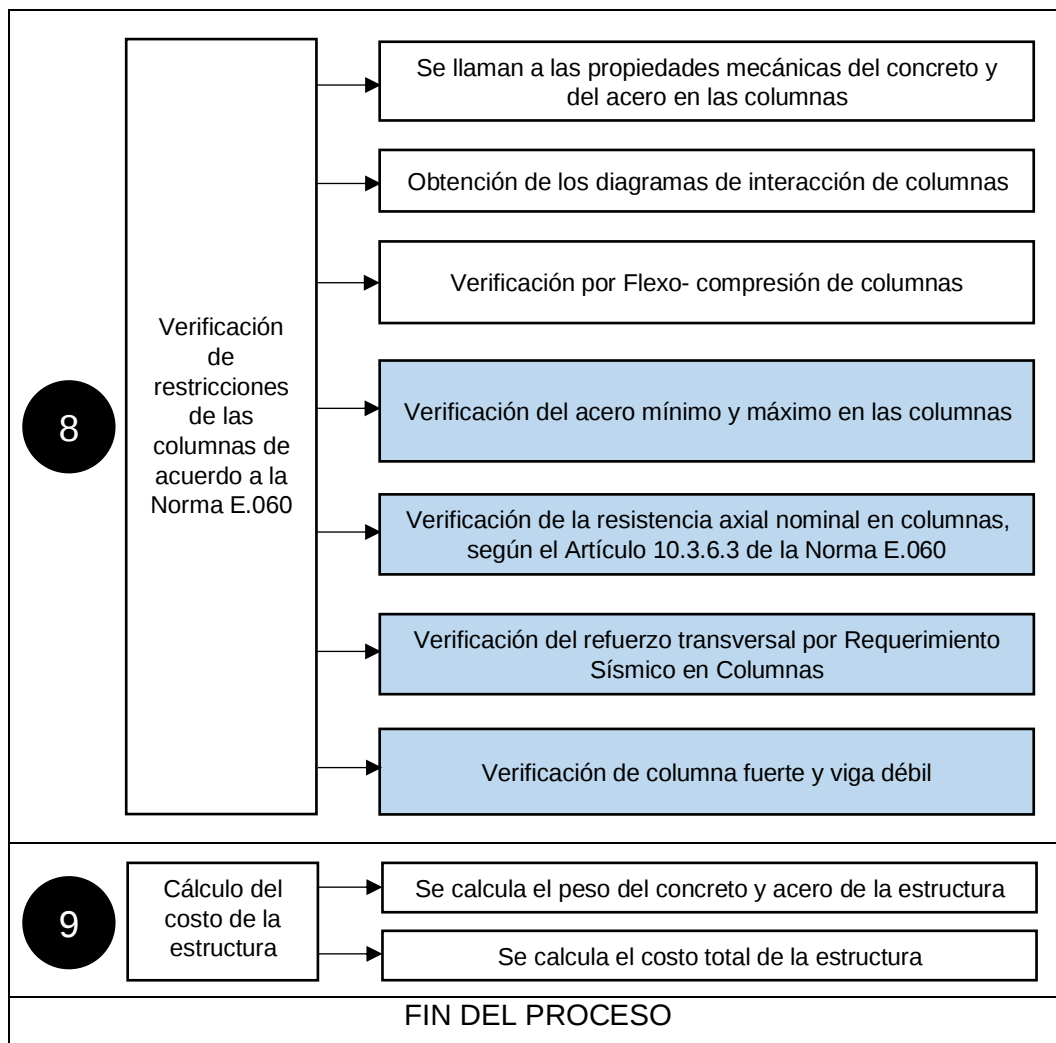


Figura N°2. 3: Proceso- Se extraen resultados y se verifican las restricciones.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se sigue el proceso “Se cierra ETABS” del diagrama de flujo de la Figura N°2.2. En este proceso, se debe de detener el análisis del ETABS mediante un código de programación en Python, luego se debe de limpiar las variables que se utilizaron y por último cerrar el software ETABS.

2.8.1.3 Consideraciones Realizadas

Al tener una gran cantidad de variables, la probabilidad de obtener una solución factible, es casi nula, debido al gran tamaño del conjunto de soluciones totales, ya sean no factibles, factibles u óptimas. Es así, que, teniendo en cuenta el pre-dimensionamiento de vigas y columnas, se tomó como punto de referencia para empezar con el problema de optimización:

- Peralte de vigas: Roberto Morales (2006) nos menciona que un primer dimensionamiento para el peralte de vigas, tomando en cuenta que según la Norma E.030 la edificación pertenece a la categoría “C”, podría calcularse de la siguiente manera:

$$hv = \frac{Ln}{10}$$

Donde:

h : Peralte de la viga

Ln : Longitud de la Luz Libre Crítica

- Ancho de vigas: al igual que para el peralte de las vigas, Roberto Morales (2006) menciona el pre- dimensionamiento que se debe realizar para el ancho de las vigas, que se calcula de la siguiente manera:

$$bv = \frac{hv}{2}$$

Donde:

bv : Ancho de la viga

Ln : Longitud de la Luz Libre Crítica

- Ancho de columnas: Antonio Blanco (1994), nos brinda una serie de recomendaciones para poder pre- dimensionar las columnas. De manera práctica, se tomará para esta investigación, el siguiente método para tomar un primer dimensionamiento para el ancho de las columnas:

$$A_{columna} = \frac{P_{uso} * A_{Trib} * N_{Pisos}}{0.35 * f'_c}$$

Donde:

P_{uso} : Carga de servicio de uso práctico, para este caso es 1000 kg/m^2

A_{Trib} : Área tributaria que la columna soporta.

$A_{columna}$: Área de la sección transversal de la columna.

N_{Pisos} : Número de pisos de la edificación

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto

2.8.2 Búsqueda por Entornos

La Búsqueda por Entornos es un método de optimización que se basa en la exploración de soluciones cercanas en el espacio de búsqueda de una solución. A diferencia de algunos métodos de optimización global, que pueden requerir un análisis exhaustivo de todo el espacio de soluciones, la Búsqueda por Entornos se enfoca en buscar soluciones vecinas y mejorar iterativamente la solución actual a medida que se encuentran soluciones mejores o más prometedoras (Glover, 1989).

El método de Búsqueda por Entornos implica la definición de una solución inicial y la búsqueda de soluciones vecinas alrededor de esta solución inicial. En cada iteración, se examinan las soluciones vecinas y se selecciona la mejor solución según una función objetivo. Este proceso de exploración y mejora iterativa se repite hasta que no se encuentren soluciones mejores o se alcance un criterio de parada (Aarts & Korst, 1989).

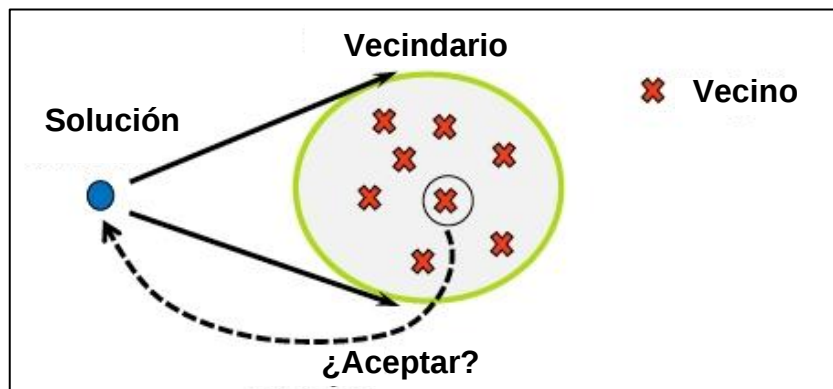


Figura N°2.4: Vecindario o entorno de una solución del problema de optimización.

Fuente: Metaheurísticas: Búsqueda y Optimización, Melián et. al, 2003.

La Búsqueda por Entornos ha demostrado ser efectiva en una variedad de problemas de optimización, como el diseño de redes, la programación y la planificación. Una de sus ventajas es su capacidad para abordar problemas de gran escala y complejidad, ya que se concentra en regiones locales del espacio de soluciones. Además, este método permite la incorporación de conocimiento experto y restricciones específicas del problema en la definición de la vecindad y las soluciones vecinas (Gendreau & Potvin, 2010).

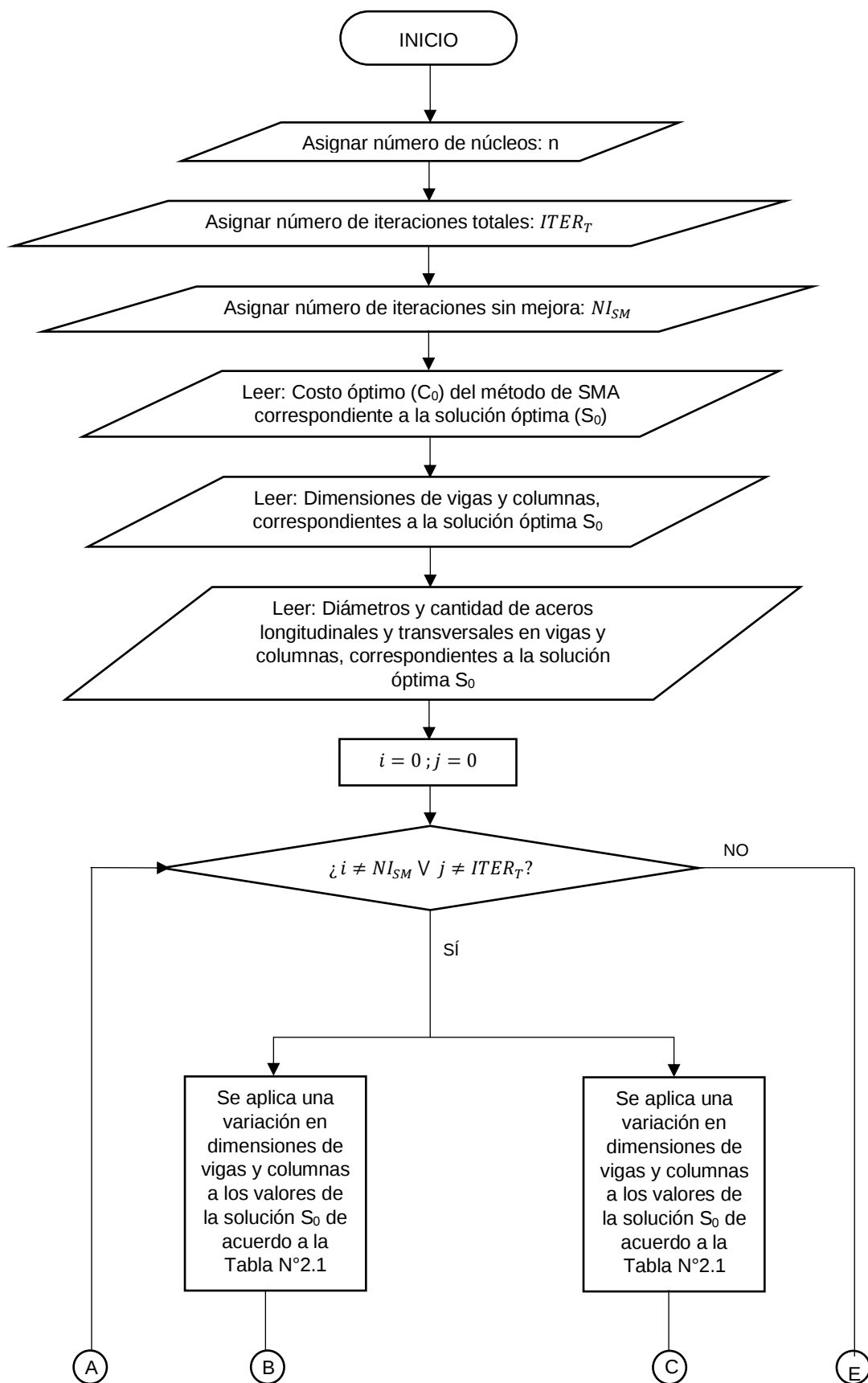
2.8.2.1 Introducción al Método

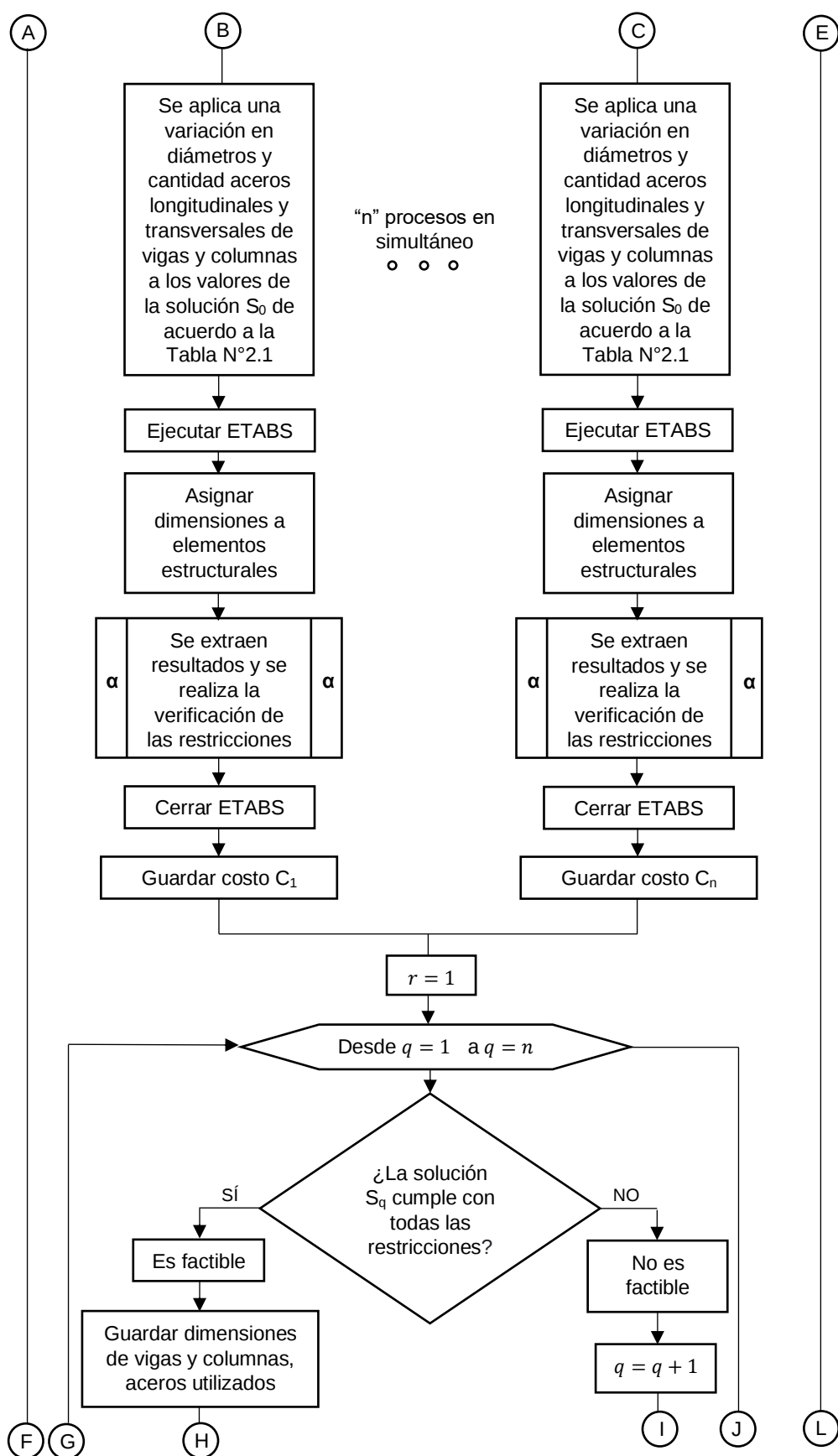
En esta investigación, se ha utilizado el método de búsqueda por entornos como una técnica de optimización aplicada a la mejora de las soluciones estructurales.

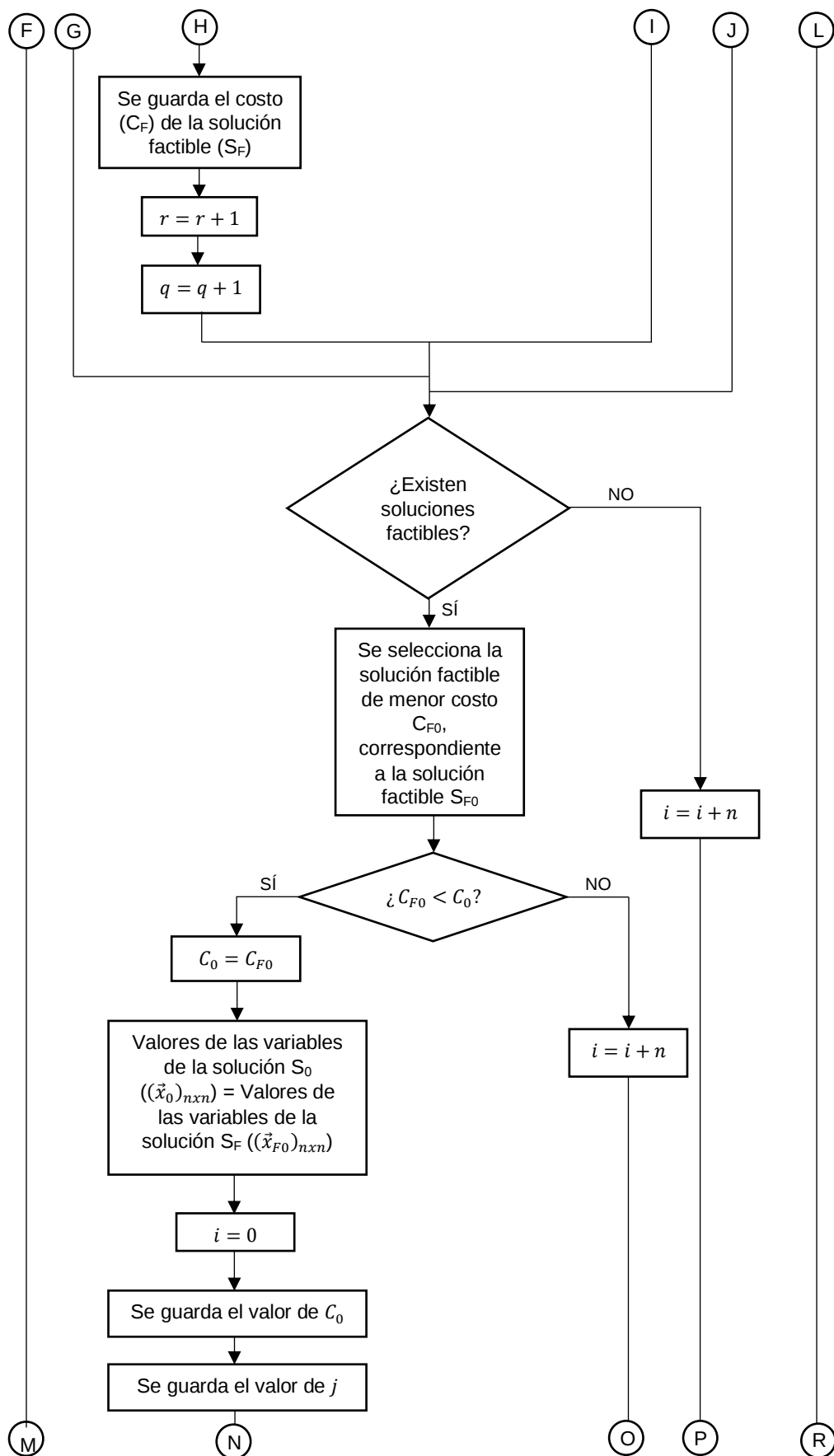
El proceso comienza con una solución inicial obtenida mediante el método de saltos múltiples aleatorios, que proporciona un punto de partida óptimo preliminar.

A partir de esta solución, se realizan ajustes incrementales en las variables de diseño, lo que permite explorar el espacio de soluciones cercanas de manera eficiente. Estos ajustes, intencionalmente pequeños, buscan refinar la solución inicial sin alejarse significativamente de la óptima obtenida inicialmente.

2.8.2.2 Esquema General del Método de Búsqueda por Entornos







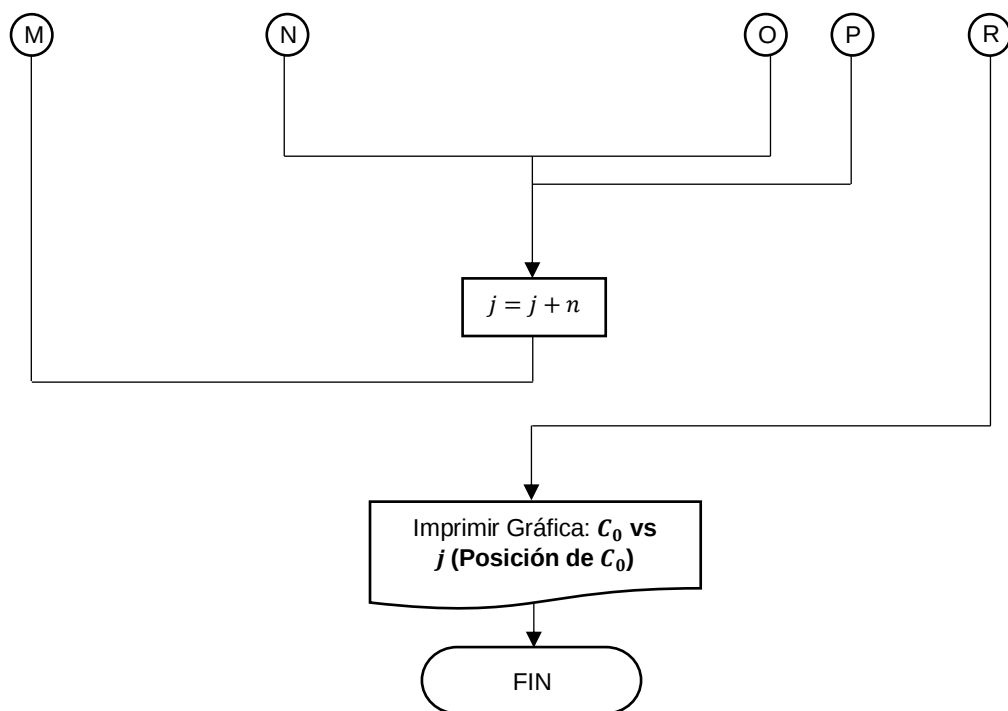


Figura N°2.5: Diagrama de flujo del método de la Búsqueda por entornos.

Fuente: Elaboración propia.

2.8.2.3 Parámetros Considerados

Las variables sufrirán pequeños cambios en sus valores, para así poder explorar soluciones a partir de una solución fijada de manera inicial. Estos valores de variación de las variables se clasifican en tres tipos: dimensiones de vigas y columnas, aceros longitudinales y transversales tanto en vigas como columnas.

VARIACIÓN DE LAS VARIABLES	
Variable	Valores de variación de las variables
Ancho de vigas	[-0.05 m, 0, 0.05 m]
Peralte de vigas	[-0.05 m, 0, 0.05 m]
Ancho de columnas	[-0.05 m, 0, 0.05 m]
Canto de columnas	[-0.05 m, 0, 0.05 m]
Acero longitudinal en las esquinas superiores de las vigas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en las esquinas inferiores de las vigas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo superior de las vigas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo inferior de las vigas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en las esquinas de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo superior de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo inferior de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo izquierdo de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo derecho de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]

Tabla N°2. 1: Intervalos de variación de las variables.

Fuente: Elaboración propia.

2.8.3 Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos son un enfoque de optimización inspirado en la evolución biológica. En su esencia, simulan procesos naturales de selección, cruzamiento y mutación para buscar soluciones óptimas a problemas complejos. Estos algoritmos se basan en la idea de que las soluciones prometedoras evolucionarán con el tiempo, similar al proceso de selección natural en la biología (Holland, 1992).

Los algoritmos genéticos comprenden varios componentes clave. En primer lugar, se crea una población inicial de posibles soluciones, llamadas individuos o cromosomas. Luego, se evalúa la aptitud de cada individuo mediante una función objetivo que mide su calidad en relación con el problema en cuestión.

A continuación, los individuos más aptos se seleccionan para la reproducción, en la que sus características se combinan a través del cruzamiento, y se introducen pequeñas modificaciones a través de la mutación. Estos procesos de selección, cruzamiento y mutación se repiten durante múltiples generaciones para mejorar la solución a lo largo del tiempo (Goldberg, 1989).

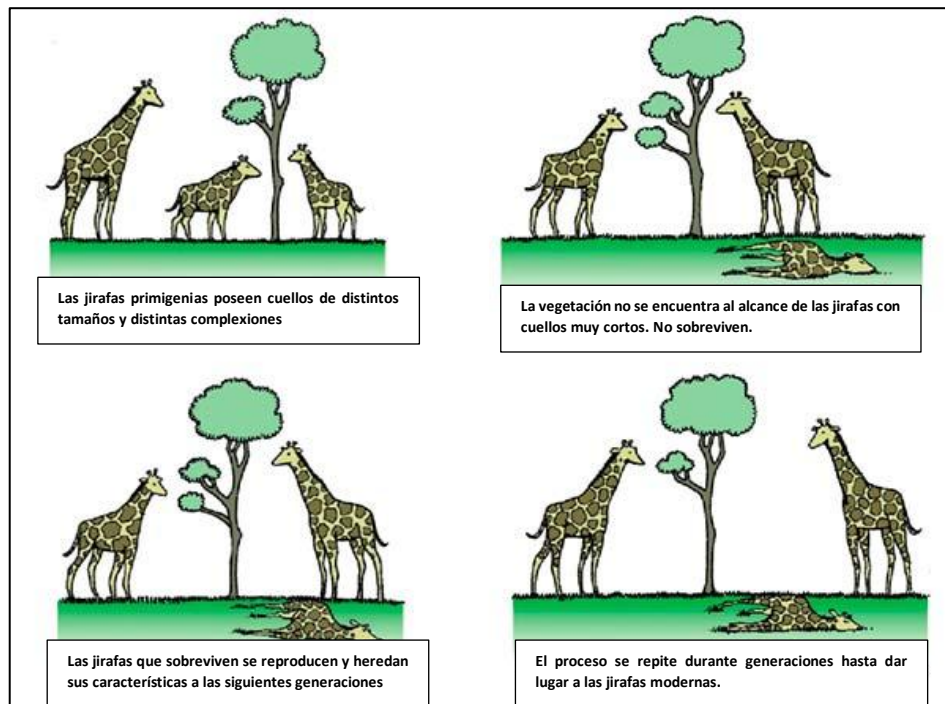


Figura N°2.6: Proceso de selección natural en las jirafas.

Fuente: La selección natural de las especies afectada por el cambio climático, Fernández 2017

Los algoritmos genéticos se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones, desde la optimización de parámetros en problemas de ingeniería hasta la creación de modelos de inteligencia artificial. Una de sus ventajas radica en su capacidad para explorar espacios de soluciones complejos y multidimensionales, lo que puede ser difícil para otros métodos de optimización. Además, los algoritmos genéticos pueden manejar problemas no lineales, lo que los hace adecuados para una variedad de desafíos (Eiben & Smith, 2015).

Aunque los algoritmos genéticos son poderosos y versátiles, también presentan desafíos, como la determinación de parámetros adecuados y la convergencia prematura. Se continúa investigando y desarrollando variantes y mejoras de los algoritmos genéticos para abordar estas limitaciones. A medida que avanzamos en la era de la optimización computacional, se espera que los algoritmos genéticos sigan siendo una herramienta valiosa para resolver problemas complejos en diversas disciplinas.

2.8.3.1 Introducción al Método

En esta investigación, se ha implementado el método de algoritmos genéticos para mejorar las soluciones estructurales. Este método comienza con la representación de cada individuo en una población, seguida de la evaluación de su aptitud. A partir de ahí, se utilizan los operadores de selección, cruzamiento, mutación y elitismo para refinar las soluciones.

2.8.3.2 Descripción del Método

En esta sección, se describe la implementación del método de algoritmos genéticos para la optimización estructural de edificaciones de mediana altura de concreto armado en Lima. El proceso comienza con la generación de una población inicial, compuesta por diferentes configuraciones estructurales posibles.

Una vez que se ha generado esta población inicial, cada configuración es evaluada según su costo total de construcción y su capacidad para cumplir con las normativas estructurales vigentes en Perú. Las configuraciones que presentan los mejores resultados, es decir, las de menor costo y que cumplen con todas las restricciones, se seleccionan para reproducirse.

En el proceso de reproducción, se combinan las características de dos configuraciones seleccionadas para generar nuevas soluciones. A estas nuevas soluciones se les introducen pequeñas variaciones para explorar otras configuraciones posibles que podrían mejorar los resultados. Este proceso de selección, combinación y variación se repite durante varias iteraciones, hasta que se encuentra la configuración estructural óptima que minimiza los costos de construcción y garantiza la seguridad y cumplimiento normativo.

2.8.3.3 Representación de las Soluciones

En esta tesis, cada posible configuración estructural se representa a través de una serie de variables de diseño, que incluyen las dimensiones de vigas y columnas, así como los refuerzos de acero. Estas variables se organizan para cada piso de la edificación.

Cada configuración estructural, correspondiente a un individuo, está compuesta por un conjunto de valores específicos que determinan las características de los elementos estructurales. Por ejemplo, una configuración puede definir que las columnas del primer piso tengan un ancho de 0.35 m y un peralte de 0.50 m, mientras que las vigas del mismo piso tienen un ancho de 0.30 m y un peralte de 0.45 m.

A medida que el algoritmo genético avanza, estas configuraciones son modificadas y combinadas para encontrar la solución más eficiente. Las modificaciones se realizan ajustando ligeramente las dimensiones y refuerzos, buscando mejorar la solución en términos de costo y cumplimiento normativo.

INDIVIDUO		
CROMOSOMA	GEN	ALELO
CROMOSOMA $n - 1$	Ancho de vigas piso n	0.30 m
	Peralte de vigas piso n	0.60 m
	Diámetro del acero de las vigas piso n	$\frac{5}{8}$ pulg
	Número de varillas en las secciones de las vigas piso n	1
CROMOSOMA $n - 2$	Ancho de columnas piso n	0.50
	Largo de columnas piso n	0.50
	Diámetro del acero de las columnas piso n	$\frac{3}{4}$ pulg
	Número de varillas en las secciones de las columnas piso n	1

Tabla N°2. 2: Elementos de un individuo.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2.2 presenta un individuo que representa una solución estructural optimizada dentro del contexto de algoritmos genéticos, compuesto por dos cromosomas que corresponden a las variables de diseño estructural para un piso específico de la edificación, denotado por n . Aquí, n se refiere al número del piso en cuestión, lo que significa que los valores asignados a las variables de diseño están específicamente relacionados con ese piso en particular.

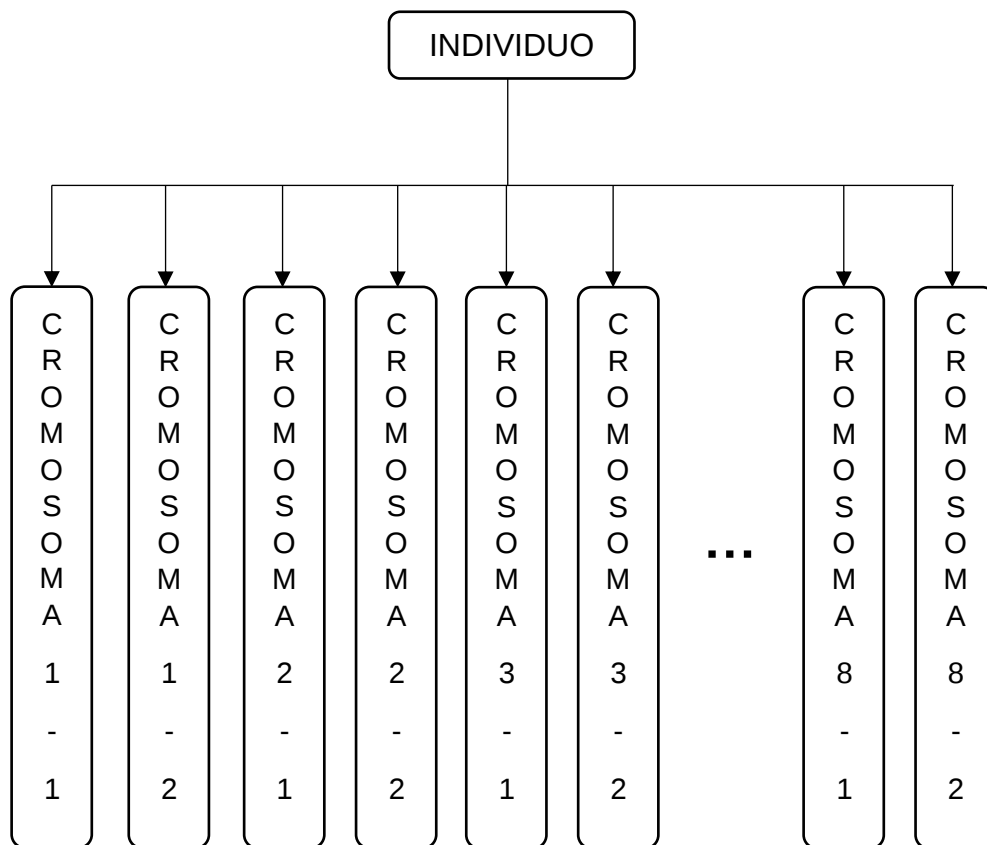


Figura N°2. 7: Representación de un individuo.

Fuente: Elaboración propia.

El Cromosoma $n - 1$ agrupa las variables de diseño de las vigas en el piso n , incluyendo el ancho de vigas (0.30 m), el peralte de vigas (0.60 m), el diámetro del acero de las vigas (5/8 pulg), y el número de varillas en las secciones de las vigas (1). Mientras tanto, el Cromosoma $n - 2$ se enfoca en las variables relacionadas con las columnas del mismo piso n , como el ancho de columnas (0.50 m), el largo de columnas (0.50 m), el diámetro del acero de las columnas (3/4 pulg), y el número de varillas en las secciones de las columnas (1). Este esquema en la Figura 4.4 ilustra cómo cada piso de la edificación tiene su propia configuración de diseño optimizada, permitiendo la personalización y optimización de las vigas y columnas para cada nivel de la estructura.

2.8.3.4 Evaluación de la Aptitud del Individuo

En esta investigación, la aptitud de cada individuo se evalúa utilizando la función objetivo. La función objetivo mide el costo total de la superestructura de concreto armado. Un menor valor de la función objetivo (F_{obj}) indica una mejor aptitud, ya que representa un menor costo total. Los individuos de la población con menor F_{obj} son considerados más aptos. Esto se puede expresar de la siguiente manera: para dos individuos i y j , si se cumple que $F_{obj,i} < F_{obj,j}$, entonces el individuo i es más apto que el individuo j .

2.8.3.5 Selección

En el marco de esta investigación, el proceso de selección se lleva a cabo utilizando un torneo probabilístico, un enfoque particularmente adecuado para optimizar estructuras de edificaciones de mediana altura de concreto armado. Este método se encarga de seleccionar los individuos que contribuirán a la siguiente generación, asegurando que las mejores configuraciones estructurales sean las que predominan en el proceso evolutivo.

Durante cada torneo, se seleccionan aleatoriamente dos individuos de la población existente. El individuo con mejor desempeño, es decir, aquel que presenta una configuración estructural más económica y eficiente, tiene una probabilidad del 80% ($P_{torneo} = 0.8$) de ser elegido para reproducirse. Este proceso no solo maximiza la probabilidad de transmitir las mejores características a la siguiente generación, sino que también preserva una pequeña posibilidad de selección para individuos menos aptos, manteniendo así la diversidad de soluciones estructurales dentro de la población.

Este equilibrio entre selección preferencial y preservación de diversidad es crucial para evitar la convergencia prematura hacia soluciones subóptimas y permite una exploración más completa del espacio de soluciones, aumentando las probabilidades de encontrar la configuración estructural óptima al final del proceso evolutivo.

2.8.3.6 Cruzamiento

El cruzamiento es un componente clave en la aplicación de algoritmos genéticos para la optimización estructural de edificaciones de concreto armado. Este proceso no implica una combinación aleatoria de características entre dos soluciones, sino que sigue un conjunto de reglas que aseguran la coherencia estructural y la viabilidad técnica de las configuraciones generadas.

En esta investigación, se emplea un cruzamiento de n puntos de forma aleatoria, donde n puede variar en cada iteración del algoritmo. Esto significa que se seleccionan de uno a varios puntos de corte en la secuencia de genes (variables de diseño) de los individuos padres. En estos puntos, se intercambian exclusivamente los genes equivalentes, respetando las restricciones necesarias para mantener la consistencia estructural.

Por ejemplo, la base de una viga solo se intercambiará con la base de otra viga, el peralte de una viga únicamente con el peralte de otra viga, y así sucesivamente. Esto garantiza que, aunque se intercambien múltiples genes entre los individuos, las configuraciones resultantes sigan siendo viables y técnicas, adaptándose correctamente a los requerimientos estructurales y normativos.

Este enfoque de cruzamiento de n puntos permite una mayor flexibilidad y diversidad en la generación de nuevas soluciones. Al seleccionar aleatoriamente el número de puntos de corte y su ubicación en la secuencia de genes, el algoritmo explora un espacio de soluciones más amplio, aumentando las probabilidades de encontrar configuraciones estructurales óptimas.

Por ejemplo, en una iteración, el algoritmo podría seleccionar tres puntos de corte, permitiendo el intercambio de la base de la viga, el peralte de la columna, y el refuerzo transversal en columnas entre dos individuos. En otra iteración, podría seleccionar solo dos puntos de corte, intercambiando únicamente el ancho de las vigas y el diámetro del refuerzo longitudinal.

Este método no solo incrementa la diversidad de la población, sino que también asegura que el proceso de evolución mantenga una dirección hacia soluciones estructurales más eficientes y económicas, evitando la convergencia prematura hacia soluciones subóptimas. La implementación correcta del cruzamiento de n puntos es, por lo tanto, un factor decisivo para lograr el éxito en la optimización de las estructuras en esta investigación.

2.8.3.7 Mutación

La mutación es un proceso crucial en la implementación de algoritmos genéticos para la optimización estructural de edificaciones de concreto armado. En esta investigación, la mutación se utiliza para introducir variabilidad en la población, permitiendo la exploración de nuevas configuraciones estructurales y previniendo que el algoritmo se estanque en soluciones subóptimas.

Durante el proceso de mutación, se realizan pequeñas modificaciones aleatorias en los genes de los individuos seleccionados. Estas modificaciones pueden afectar cualquier variable de diseño estructural, como el ancho de una viga, el peralte de una columna, o el diámetro del refuerzo de acero. Por ejemplo, el ancho de una columna que inicialmente es de 0.35 m podría mutar a 0.40 m en un individuo seleccionado.

En nuestro caso, la probabilidad de que ocurra una mutación se ha definido en 0.5%, lo que significa que solo un pequeño porcentaje de la población se verá afectado en cada generación. Esta tasa de mutación controlada permite mantener la estabilidad en las configuraciones más prometedoras, mientras se exploran nuevas posibilidades de diseño estructural que podrían conducir a soluciones más eficientes.

Las modificaciones introducidas por la mutación son esenciales para garantizar que el algoritmo explore un espacio de soluciones más amplio, superando limitaciones impuestas por el cruzamiento y la selección. Esta diversidad genética adicional es clave para la evolución continua de la población hacia configuraciones

que no solo cumplen con las normas estructurales vigentes, sino que también optimizan los costos de construcción.

La correcta implementación de la mutación, ajustada a la tasa de 0.5% y al contexto de las variables de diseño específicas de esta tesis, permite mejorar las posibilidades de encontrar la solución estructural óptima, asegurando un equilibrio entre la exploración de nuevas configuraciones y la explotación de las mejores soluciones existentes.

2.8.3.8 *Elitismo*

En esta tesis, el elitismo se implementa para asegurar que los mejores individuos de cada generación se preserven y pasen intactos a la siguiente. Este enfoque permite que las configuraciones estructurales más eficientes, identificadas durante la evolución del algoritmo genético, continúen influyendo en las futuras generaciones.

Para cada generación, se selecciona un grupo reducido de individuos con las mejores aptitudes estructurales y estos se copian directamente a la siguiente generación sin aplicarles cruzamiento ni mutación. Esto garantiza que las soluciones más prometedoras se mantengan y sigan guiando la optimización hacia configuraciones estructurales que maximicen la seguridad y minimicen los costos.

La implementación del elitismo en esta investigación contribuye a acelerar la convergencia del algoritmo hacia la solución óptima, evitando la pérdida de soluciones valiosas durante el proceso evolutivo.

2.8.3.9 Adición al método

En el desarrollo de esta investigación, se identificó que, al utilizar exclusivamente el método de algoritmos genéticos, los valores generados a través de las múltiples ejecuciones tendían a intercambiarse entre sí sin lograr una optimización real. Aunque el proceso de cruzamiento y mutación permitía la combinación y variación de las soluciones, estas operaciones no garantizaban una mejora significativa en los costos estructurales, lo que se traducía en una falta de convergencia hacia soluciones óptimas. El problema radicaba en que los individuos en la población evolucionaban mediante intercambios de valores que, aunque diferentes, no necesariamente representaban una optimización en el contexto del problema planteado.

Para superar esta limitación, se integró el método de búsqueda por entornos dentro del proceso de algoritmos genéticos. Este método permitió realizar ajustes finos y específicos en las soluciones, asegurando que cada iteración no solo intercambiara valores entre los individuos, sino que realmente optimizara las configuraciones estructurales en términos de costos y cumplimiento normativo. Al aplicar la búsqueda por entornos, se pudo explorar más a fondo las proximidades de las soluciones obtenidas, permitiendo identificar configuraciones que, de otro modo, podrían haber sido pasadas por alto. Esta combinación mejoró significativamente la capacidad del algoritmo genético para converger hacia soluciones óptimas, asegurando que el proceso no solo produjera resultados diferentes, sino que también generara mejoras tangibles y sustanciales en la optimización estructural.

En el proceso de optimización estructural, se implementó un bucle generacional como criterio de parada, donde el algoritmo continúa generando nuevas poblaciones de soluciones hasta que no se observe una mejora en la calidad de los individuos durante 20 generaciones consecutivas o hasta que el número de generaciones totales sea igual a 170. Este enfoque permite asegurar que el proceso de optimización explore suficientemente el espacio de soluciones, evitando la terminación prematura del algoritmo y asegurando que se alcanzan soluciones cercanas al óptimo antes de finalizar el proceso.

2.8.3.10 Esquema General del Método de Algoritmos Genéticos

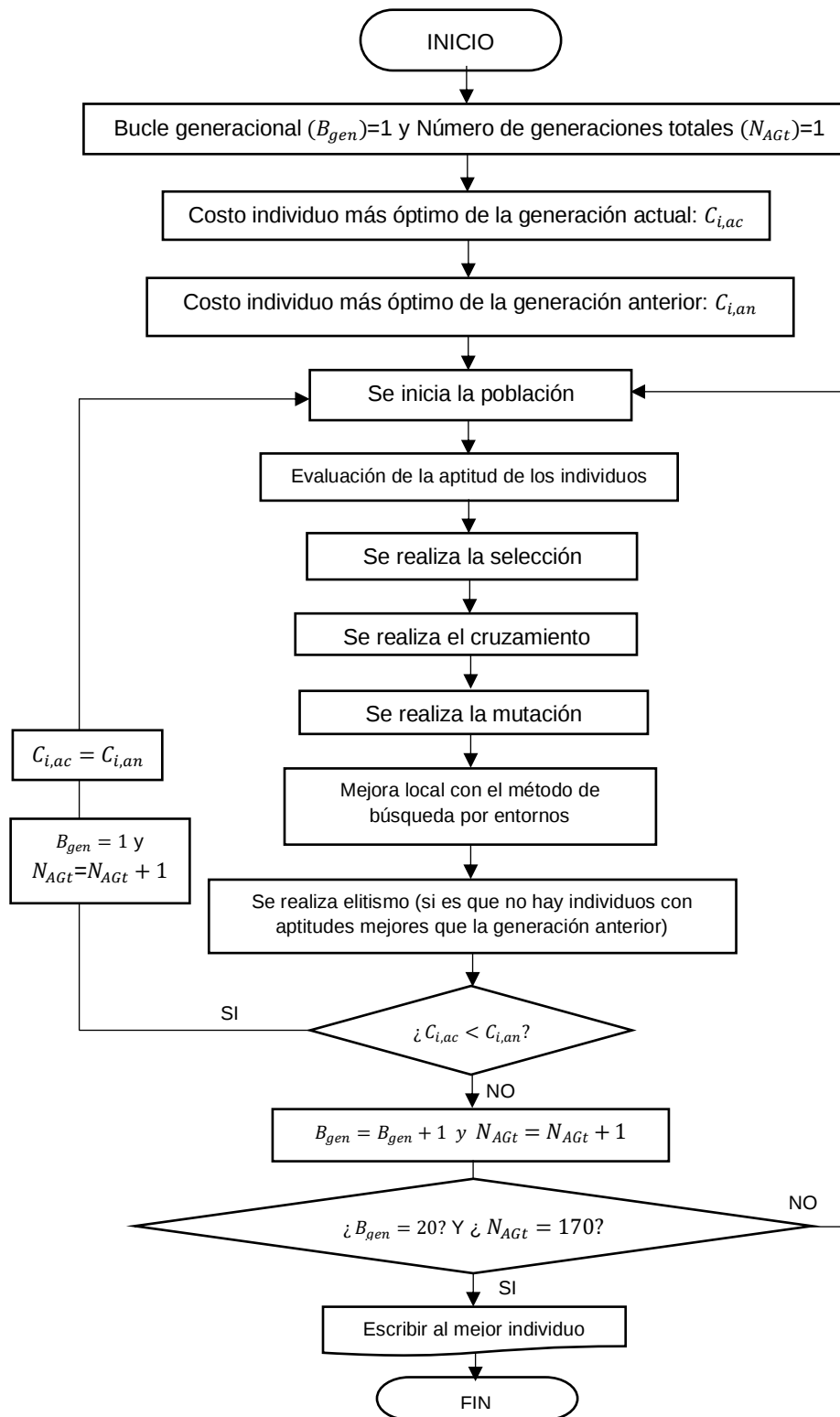


Figura N°2. 8: Diagrama de flujo del método de Algoritmos Genéticos.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

La estructura analizada en la presente tesis es un sistema estructural formado de pórticos de concreto armado. Estos pórticos están compuestos por elementos horizontales (vigas) y elementos verticales (columnas), que son capaces de transmitir las cargas debido a las acciones verticales (peso propio de la estructura) y horizontales (sismo).

La optimización estructural del sistema estructural analizado requiere de parámetros, variables de diseño, restricciones y una función objetivo que a continuación se explicarán.

3.1 PARÁMETROS

El sistema estructural consta de parámetros que están en función de su geometría, del peso propio de la estructura, a las acciones sísmicas que actúan sobre este y a coeficientes de seguridad que se asignan a la estructura y sus elementos.

3.1.1 Parámetros Geométricos

Las edificaciones de mediana altura son consideradas de 4 a 15 pisos (según la clasificación por tamaño del Urban Land Institute). Silva (2019), menciona que la estructura de mediana altura representativa de un edificio típico peruano es una edificación de ocho pisos con 3 vanos a 6 m en dirección X-X y 3 vanos a 5 m en dirección Y-Y, con una altura de entre pisos de 3 m por piso.

En la presente tesis se ha decidido analizar edificaciones de ocho pisos con 3 vanos a 6 m en dirección X-X y 3 vanos a 5 m en dirección Y-Y, con una altura de entre pisos de 3 m por piso. Estos parámetros se detallan a continuación:

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS		
Descripción	Parámetro	Valor en la presente tesis
Altura de entrepiso	H_i	3 m

Longitud del vano del eje X-X	D_x	6 m
Longitud del vano del eje Y-Y	D_y	5 m
Número de ejes en el eje X-X	N_x	3
Número de ejes en el eje Y-Y	N_y	3

Tabla N°3.1: Parámetros geométricos.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N°3.1 muestra, de manera general, la vista en planta de la estructura mencionada en el párrafo anterior. En el apartado 3.2 se mencionan los diferentes tipos de vigas y columnas según su ubicación en la estructura.

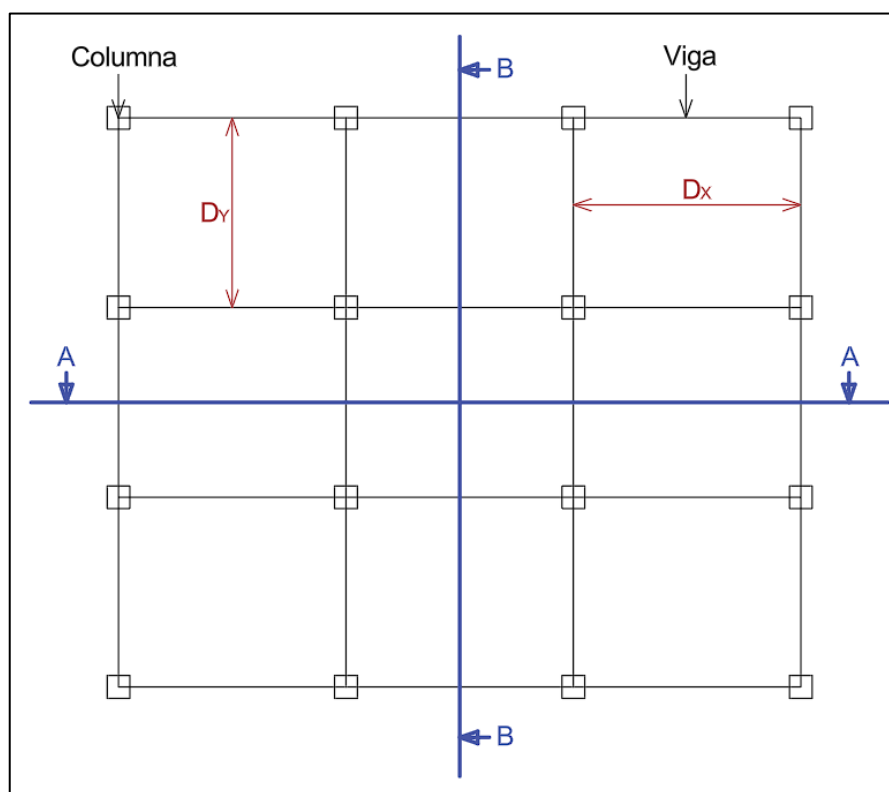


Figura N°3.1: Vista en planta de la edificación analizada en la presente tesis.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N°3.2 se muestra el corte A-A y en la Figura N°3.3 se aprecia el corte B-B, ambos cortes mostrados en la Figura N°3.1. En ambas figuras se muestra de manera general la estructura que se analizará en la presente tesis, en el apartado 3.2 se mencionan los tipos de vigas y columnas según su ubicación.

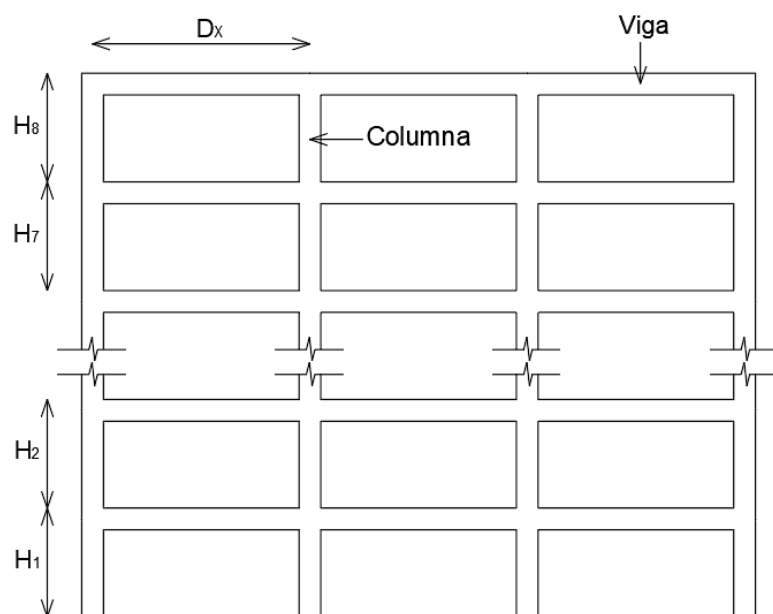


Figura N°3.2: Vista del corte A-A de la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

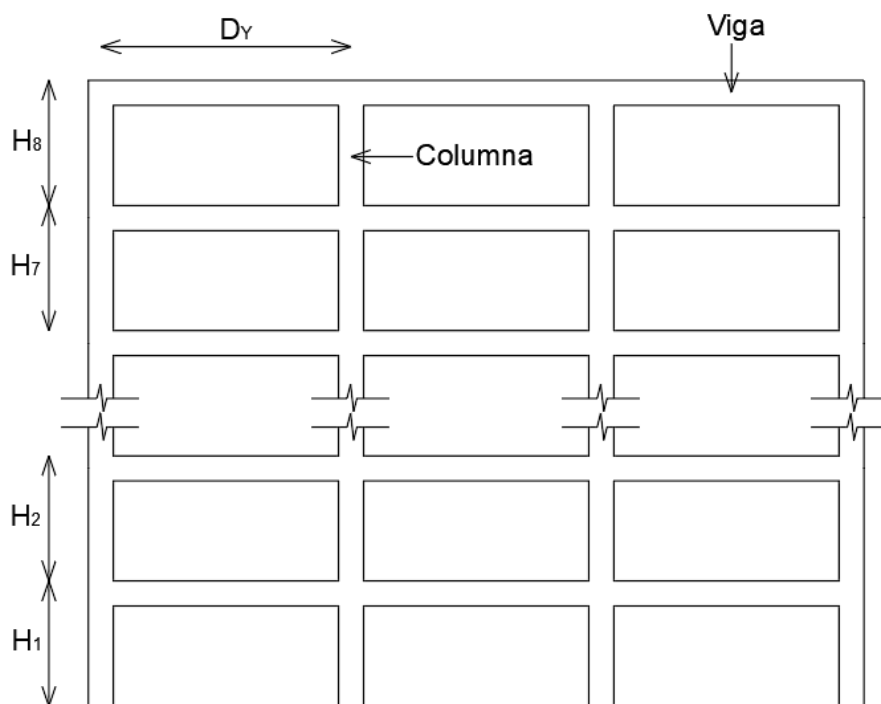


Figura N°3.3: Vista del corte B-B de la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Parámetros relativos a las acciones permanentes

Dentro de estos parámetros se consideran el peso propio de la estructura, de los ocupantes de la estructura y algunas consideraciones tomadas de la Norma Técnica E.020 de Cargas, que se detallan a continuación:

- Carga Muerta: se considera la tabiquería y acabados.
- Carga Viva: Ocupantes, materiales, equipos y otros elementos movibles que soporta la edificación.

PARÁMETROS RELATIVOS A LAS ACCIONES PERMANENTES		
Descripción	Parámetro	Valor en la presente tesis
Cargas de los acabados	C_A	100 kg/m ²
Carga tabiquería	C_T	150 kg/m ²
Cargas vivas	C_V	250 kg/m ²

Tabla N°3.2: Parámetros relativos al peso propio de la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Parámetros relativos a las acciones sísmicas

Las acciones sísmicas en la estructura son halladas mediante el método del análisis dinámico modal espectral, tanto en el eje X-X como en el eje Y-Y. El método utilizado permite aplicar cualquier combinación de factores sísmicos según las normativas vigentes. En esta tesis, se han utilizado los parámetros establecidos en la Norma Técnica E.030 de Diseño Sismorresistente, dado que son representativos de la ciudad de Lima. A continuación, se presentan los valores seleccionados:

Factor de Zona ($Z = 0.45$): Corresponde a Lima y otras zonas de alta sismicidad, conforme a la Norma E.030.

Factor de Suelo ($S = 1.0$): Refleja un suelo intermedio, típico en la mayoría de las zonas urbanas de Lima.

Factor de Uso ($U = 1.0$): Es el valor estándar para edificaciones de uso común, como oficinas o viviendas.

Estos parámetros fueron elegidos por su relevancia en el contexto limeño, garantizando que el análisis refleje adecuadamente las condiciones locales. Aunque el método puede emplearse con otros parámetros, los seleccionados en este caso se alinean con las características más frecuentes en edificaciones en Lima, lo cual está respaldado por estudios como el de Silva (2019).

PARÁMETROS RELATIVOS A LAS ACCIONES SÍSMICAS		
Descripción	Parámetro	Valor
Factor de Zona	Z	0.45
Factor de Suelo	S	1
Factor de Uso	U	1
Período que define la plataforma del Factor de Amplificación Sísmica (C)	T_P	0.4 s
Período que define el inicio de la zona del Factor de Amplificación Sísmica (C)	T_L	2.5 s

Tabla N°3.3: Parámetros relativos a las acciones sísmicas.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Parámetros relativos a los factores de reducción

Estos parámetros son extraídos del Artículo 9.3. de la Norma Técnica E.060 de Diseño de Concreto Armado.

PARÁMETROS RELATIVOS A LOS FACTORES DE REDUCCIÓN		
Descripción	Parámetro	Valor
Factor de reducción por flexión en vigas	ϕ_{VIGASF}	0.9
Factor de reducción por cortante en vigas	ϕ_{VIGASC}	0.85
Factor de reducción por carga axial en columnas	$\phi_{COLUMNAS}$	0.7

Tabla N°3.4: Parámetros relativos a los factores de reducción.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.5 Parámetros relativos a las propiedades mecánicas

Por último, se tiene la Tabla N°3.5. donde se muestra la deformación unitaria del concreto en compresión y el esfuerzo en fluencia del acero, el primer valor extraído del Capítulo 10 de la Norma E.060 de Diseño de Concreto Armado.

PARÁMETROS RELATIVOS A LAS PROPIEDADES MECÁNICAS		
Descripción	Parámetro	Valor
Deformación unitaria máxima del concreto en compresión	ϵ_c	0.003
Esfuerzo de fluencia del acero	f_y	4200 kg/cm ²

Tabla N°3.5: Parámetros relativos a las propiedades mecánicas.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 VARIABLES DE DISEÑO

Antes de nombrar todas las variables establecidas, se requiere mencionar las siguientes acotaciones:

- Por temas de facilidad constructiva se ha considerado la misma resistencia a la compresión del concreto para todas las columnas y vigas de la estructura.
- Tanto las dimensiones de las columnas y vigas toman valores entre un determinado rango fijado de antemano. Al igual que en las dimensiones de vigas y columnas, el acero longitudinal en estos dos elementos estructurales toma valores dentro de un rango fijado de antemano. Estos rangos de valores también se pueden observar a continuación:

VARIACIÓN DE LAS VARIABLES	
Variable	Valores de variación de las variables
Ancho de vigas	[-0.05 m, 0, 0.05 m]
Peralte de vigas	[-0.05 m, 0, 0.05 m]
Ancho de columnas	[-0.05 m, 0, 0.05 m]
Canto de columnas	[-0.05 m, 0, 0.05 m]
Acero longitudinal en las esquinas superiores de las vigas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en las esquinas inferiores de las vigas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo superior de las vigas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo inferior de las vigas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en las esquinas de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo superior de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo inferior de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo izquierdo de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]
Acero longitudinal en el tramo derecho de las columnas	[-0.3175 m ² , 0, 0.3175 m ²]

Tabla N°3. 6: Intervalos de variación de las variables.

Fuente: Elaboración propia.

- Teniendo en cuenta la vista en planta de la Figura N°3.1., se ha decidido distribuir los aceros longitudinales y transversales trabajando por secciones en cada eje en cada dirección X-X e Y-Y. Las secciones A, C, D, F, G e I corresponden a la ubicación en donde estarán los aceros longitudinales superiores que resisten momentos negativos. Las secciones B, E y H corresponden a la ubicación en donde estarán los aceros longitudinales inferiores que resisten momentos positivos.

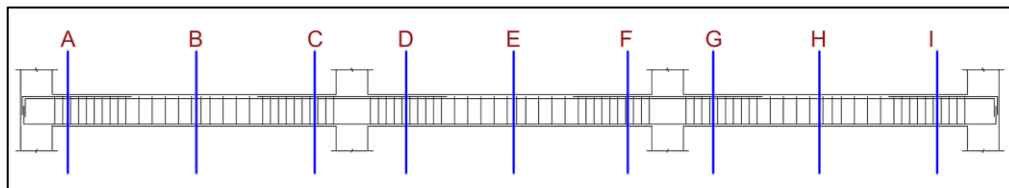


Figura N°3.4: Secciones consideradas en las vigas por eje.

Fuente: Elaboración propia.

- Se han establecido dimensiones mínimas de vigas y columnas, las cuales tendrán un valor de 0.25 m. Este valor mínimo está extraído del Capítulo 18 del ACI 318 (American Concrete Institute).

VARIABLES CONSIDERADAS EN EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN			
Descripción	Variable	Número de valores	Valores
Ancho de vigas	$\vec{b}_{VIGAS}$	7	0.25 m, 0.30 m, 0.35 m, 0.40 m, 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m
Peralte de vigas	$\vec{h}_{VIGAS}$	7	0.30 m, 0.35 m, 0.40 m, 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m, 0.60 m
Ancho de columnas	$\vec{b}_{COLUMNAS}$	7	0.30 m, 0.35 m, 0.40 m, 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m, 0.60 m
Largo de columnas	$\vec{h}_{COLUMNAS}$	7	0.30 m, 0.35 m, 0.40 m, 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m, 0.60 m
Diámetro del acero de las vigas	DA_V	3	$\frac{1}{2}$ pulg, $\frac{5}{8}$ pulg, $\frac{3}{4}$ pulg
Número de varillas en las secciones de las vigas	NT_V	3	0, 1, 2
Diámetro del acero de las columnas	DA_C	3	$\frac{1}{2}$ pulg, $\frac{5}{8}$ pulg, $\frac{3}{4}$ pulg
Número de varillas en los tramos de las columnas	NT_C	3	0, 1, 2

Tabla N°3.7: Variables consideradas en el problema de optimización.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla N°3.7 se muestra el número de valores que pueden adoptar las variables del problema de optimización.

3.3 RESTRICCIONES

Para diseñar una edificación de concreto armado se deben de cumplir ciertas verificaciones de las normas técnicas peruanas E.030 de diseño sismorresistente y E.060 de concreto armado. En la presente tesis se utilizarán estas dos normas para poder establecer que una solución sea factible o no factible. A continuación, se mencionan todas las restricciones consideradas:

3.3.1 Restricciones consideradas de la Norma Técnica E.030

La Norma Técnica Peruana E.030 de Diseño Sismorresistente es de vital importancia para el diseño de una estructura, ya que en esta se especifican las solicitaciones sísmicas que debe de soportar la estructura, así como las verificaciones que se deben de cumplir. A continuación, se mencionan las restricciones tomadas en cuenta para la optimización estructural de la presente tesis:

- Masas Participativas: según el Artículo 29.1.2. se debe de considerar los modos de vibración cuya suma de masas efectivas sea mayor o igual al 90% de la masa total.
- Factor C/R: teniendo en cuenta el Artículo 28.2.2., el valor del Coeficiente de Amplificación Sísmica entre el Coeficiente de Reducción de las Fuerzas Sísmicas (R) debe ser mayor o igual a 0.11
- Distorsiones Inelásticas: tomando en cuenta los Artículos 31 y 32, se debe tener en cuenta que para una estructura de concreto armado, el límite de distorsión de entrepiso es igual a 0.007

Las siguientes irregularidades se mencionan en el Artículo 20 de la Norma Técnica E.030, las cuales se utilizaron en la presente tesis para su verificación. Se mencionan a continuación:

- Irregularidad de Rigidez- Piso Blando: hay irregularidad cuando la rigidez lateral en un entrepiso es menor que el 70% de la rigidez lateral del entrepiso inmediato superior, o es menor que el 80% de la rigidez lateral promedio de los tres niveles superiores adyacentes.
- Irregularidad de Resistencia- Piso Débil: existe irregularidad cuando la resistencia en un entrepiso frente a fuerzas cortantes es inferior a 80% de la resistencia del entrepiso inmediato superior.
- Irregularidad Extrema de Rigidez: esta irregularidad se da cuando la rigidez lateral de un entrepiso es menor que 60% de la rigidez lateral del entrepiso inmediato superior, o es menor que el 70% de la rigidez lateral promedio de los tres niveles superiores adyacentes.
- Irregularidad Extrema de Resistencia: existe esta irregularidad cuando la resistencia de un entrepiso frente a fuerzas cortantes es inferior a 65% de la resistencia del entrepiso inmediato superior.
- Irregularidad de Masa: se da cuando el peso de un piso es mayor que 1.5 veces el peso de un piso adyacente.
- Irregularidad de Geometría Vertical: existe esta irregularidad cuando la dimensión en planta de la estructura resistente a cargas laterales es mayor que 1.3 veces la correspondiente dimensión en un piso adyacente.

3.3.2 Restricciones consideradas de la Norma Peruana E.060

En el caso de las restricciones consideradas para la Norma Técnica E.060, se utilizan los artículos referidos a vigas y columnas de un sistema de pórticos de concreto armado.

Las restricciones a tomar en cuenta para las vigas son las siguientes:

- Refuerzo Mínimo Longitudinal: Según el Artículo 10.5.1 de la Norma E.060, el área de refuerzo longitudinal mínimo A_s es: $0.7 * \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} * b * d$. Esto asegura que la viga tenga suficiente refuerzo para resistir las tensiones de flexión.
- Requerimiento Sísmico por Flexión: Según el Artículo 21.5.2 de la Norma E.060, el refuerzo longitudinal debe estar detallado para garantizar una ductilidad adecuada, lo cual incluye la longitud de desarrollo de las barras de refuerzo, el refuerzo transversal adecuado para el confinamiento en zonas críticas, y el anclaje adecuado de las barras. La longitud de desarrollo l_d de una barra de refuerzo se calcula como $l_d = \frac{f_y * \phi}{4 * \tau_b}$, donde f_y es el esfuerzo de fluencia del acero, ϕ el diámetro de la barra, y τ_b la resistencia al corte por adherencia. En las zonas críticas, el espaciamiento máximo de los estribos debe ser el menor de $d/4$ o 100 mm, y fuera de estas zonas, no debe exceder $d/2$ o 150 mm. Adicionalmente, la relación de esbeltez $\lambda = \frac{l}{d}$ de las vigas no debe exceder de 50, asegurando su estabilidad a través de un análisis que considere deflexiones laterales y pandeo.
- Requerimiento Sísmico por Corte: Según el Artículo 21.5.3 de la Norma E.060, en las zonas de confinamiento, se deben usar estribos cerrados o ganchos de 135 grados. El espaciamiento de los estribos en estas zonas debe ser menor o igual a $d/4$, donde d es el peralte efectivo de la viga. Según el Artículo 21.5.4 de la Norma E.060, fuera de las zonas de confinamiento, el espaciamiento de los estribos puede ser mayor, pero no debe exceder $d/2$.

Las restricciones para las columnas se presentan a continuación:

- Acero Mínimo y Máximo Longitudinal: Según el Artículo 21.6.3.1 de la Norma E.060, la cuantía de refuerzo longitudinal no será menor que el 1% ni mayor que el 6% del área total de la sección transversal de la columna.

- Requerimiento Sísmico por Flexión: Según el Artículo 21.6.2.2 de la Norma E.060, la resistencia nominal a flexión de las columnas debe cumplir:
 $\sum M_{n,columna} > 1.2 * \sum M_{n,viga}$. Esto garantiza que las columnas sean más seguras que las vigas para evitar el colapso prematuro de las vigas.

3.4 FUNCIÓN OBJETIVO

En la presente tesis se ha considerado una función objetivo relacionada al costo de la superestructura de concreto armado. Este costo se hallará la formulación que se detalla en el punto 3.4.1.

3.4.1 Formulación de la función objetivo

Para representar la función objetivo de manera matemática, se realizó el siguiente procedimiento:

- Después de obtener los resultados de cualquiera de los métodos aplicados en la presente investigación (saltos múltiples aleatorios, búsqueda por entornos y algoritmos genéticos), se procederá a guardar los datos relevantes, tales como las dimensiones de las vigas y columnas, los refuerzos longitudinales de las vigas y columnas, y los refuerzos transversales de las vigas y columnas.
- Teniendo los datos anteriormente mencionados, se realiza el cálculo de los volúmenes de concreto en los elementos estructurales, así como también los metros lineales de acero para toda la estructura.
- Finalmente, se procede a multiplicar cada cantidad, ya sea volumen o metros lineales, por su respectivo precio unitario, tomando como referencia los precios unitarios publicados por la Revista de la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO) en sus reportes más recientes (CAPECO, 2024).

Siguiendo el procedimiento mencionado, lo primero que se define son las matrices diagonales para poder realizar las operaciones necesarias y obtener los costos.

$$(\vec{b}_{VIGAS})_{n \times n} = \begin{bmatrix} b_{V1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{Vn} \end{bmatrix}_{n \times n} = diag(b_{V1}, \dots, b_{Vn})$$

$$(\vec{h}_{VIGAS})_{n \times n} = \begin{bmatrix} h_{V1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & h_{Vn} \end{bmatrix}_{n \times n} = diag(h_{V1}, \dots, h_{Vn})$$

$$(\vec{b}_{COLUMNAS})_{n \times n} = \begin{bmatrix} b_{C1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{Cn} \end{bmatrix}_{n \times n} = diag(b_{C1}, \dots, b_{Cn})$$

$$(\vec{h}_{COLUMNAS})_{n \times n} = \begin{bmatrix} h_{C1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & h_{Cn} \end{bmatrix}_{n \times n} = diag(h_{C1}, \dots, h_{Cn})$$

$$(\vec{PV}_{NOMV})_{n \times n} = \begin{bmatrix} pv_{V1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & pv_{Vn} \end{bmatrix}_{n \times n} = diag(pv_{V1}, \dots, pv_{Vn})$$

$$(\vec{L}_{ASIV})_{n \times n} = \begin{bmatrix} L_{AV1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & L_{AVn} \end{bmatrix}_{n \times n} = diag(L_{AV1}, \dots, L_{AVn})$$

$$(\vec{L}_{ASIC})_{n \times n} = \begin{bmatrix} L_{AC1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & L_{ACn} \end{bmatrix}_{n \times n} = diag(L_{AC1}, \dots, L_{ACn})$$

$$(\vec{PC}_{NOMC})_{n \times n} = \begin{bmatrix} pc_{C1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & pc_{Cn} \end{bmatrix}_{n \times n} = diag(pc_{C1}, \dots, pc_{Cn})$$

En donde:

$(\vec{b}_{VIGAS})_{n \times n}$: Es una matriz diagonal que tiene como elementos todas las bases de las vigas.

- $(\vec{h}_{VIGAS})_{n \times n}$: Es una matriz diagonal que tiene como elementos todas las alturas de las vigas.
- $(\vec{b}_{COLUMNAS})_{n \times n}$: Es una matriz diagonal que tiene como elementos todas las bases de las columnas.
- $(\vec{h}_{COLUMNAS})_{n \times n}$: Es una matriz diagonal que tiene como elementos todas las alturas de las columnas.
- $(\vec{P}_{V_{NOMV}})_{n \times n}$: Matriz diagonal que contiene todos los pesos nominales de los aceros de las vigas.
- $(\vec{P}_{C_{NOMC}})_{n \times n}$: Matriz diagonal que contiene todos los pesos nominales de los aceros de las vigas.
- $(\vec{L}_{ASIV})_{n \times n}$: Matriz diagonal que contiene todas las longitudes asignadas para cada tramo de acero de las vigas.
- $(\vec{L}_{ASIC})_{n \times n}$: Matriz diagonal que contiene todas las longitudes asignadas para cada tramo de acero de las columnas.

Para calcular el costo total del concreto se planteó la siguiente formulación:

$$CC_1 = \sum_{i=1}^5 PU_i * [Traz([diag(b_{V1}, \dots, b_{Vn}) * diag(h_{V1}, \dots, h_{Vn})] * diag(d_{C1}, \dots, d_{Cn})) + Traz([diag(b_{C1}, \dots, b_{Cn}) * diag(h_{C1}, \dots, h_{Cn})] * H_i)]$$

En donde:

- CC_1 : Costo del concreto en las vigas y columnas
- PU_i : Precio por metro cúbico de concreto.
- d_{Ci} : Longitud del vano que corresponda a la viga o columna, ya sea en el eje X-X o en el eje Y-Y.
- H_i : Altura de entrepiso.

Para calcular el costo total del acero longitudinal se planteó la siguiente fórmula:

$$CA_1 = \left[\text{Traz}(\text{diag}(pv_{V1}, \dots, pv_{Vn}) * \text{diag}(L_{AV1}, \dots, L_{AVn}) * [(NT_{SV} + NT_{IV} + 2 + 2)]) \right. \\ \left. + \text{Traz} \left((\overrightarrow{PC}_{NOMC})_{nx1} * \left[\left((\overrightarrow{L}_{ASIC})_{nx1} \right)^T \right] \right. \right. \\ \left. \left. * [(NT_{SC} + NT_{IC} + NT_{IZC} + NT_{DC} + 2 + 2) * I_{n \times n}] \right) \right] * V_{ACERO}$$

En donde:

CA_1	: Costo total del acero longitudinal para vigas y columnas.
NT_{SV}	: Número de varillas en el tramo superior de las vigas.
NT_{IV}	: Número de varillas en el tramo inferior de las vigas.
NT_{SC}	: Número de varillas en el tramo superior de las columnas.
NT_{IC}	: Número de varillas en el tramo inferior de las columnas.
NT_{IZC}	: Número de varillas en el tramo izquierdo de las columnas.
NT_{DEC}	: Número de varillas en el tramo derecho de las columnas.
V_{ACERO}	: Precio unitario por kilogramo del acero.
$I_{n \times n}$	: Matriz identidad.

Para calcular el costo total de los aceros transversales tanto para vigas como columnas, se presenta la siguiente fórmula:

$$CA_2 = \left[\text{traz} \left[2 * \left[\left((\vec{b}_{VIGAS})_{nx1} + (\vec{h}_{VIGAS})_{nx1} \right) * \left((\overrightarrow{PV}_{NOMV})_{nx1} \right)^T \right] * (\overrightarrow{L}_{ASIV}) \right] \right. \\ \left. + \text{traz} \left(2 * \left[\left((\vec{b}_{COLUMNAS})_{nx1} + (\vec{h}_{COLUMNAS})_{nx1} \right) * \left((\overrightarrow{PV}_{NOMC})_{nx1} \right)^T \right] \right. \right. \\ \left. \left. * (\overrightarrow{L}_{ASIC}) \right) \right] * V_{ACERO}$$

En donde:

CA_2	: Costo total del acero transversal para vigas y columnas
$\overrightarrow{PV}_{NOM}$	: Vector columna que contiene todos los pesos nominales de los aceros de las vigas.

V_{ACERO} : Precio unitario por kilogramo del acero.

Finalmente, la función objetivo quedaría definida de la siguiente manera:

$$F_{OBJ} = CC_1 + CA_1 + CA_2$$

En donde:

F_{OBJ} : Función objetivo

CAPÍTULO IV: MÉTODOS HEURÍSTICOS EMPLEADOS

4.1 SALTOS MÚLTIPLES ALEATORIOS

Este método, introducido en el apartado 2.8.1, se emplea para generar soluciones iniciales dentro del espacio de diseño. Estas soluciones se evalúan iterativamente para seleccionar la que mejor cumple con las restricciones de diseño y minimiza el costo.

4.1.1 Generación de soluciones iniciales

Se generan soluciones aleatorias dentro de los límites permisibles de las variables de diseño, como dimensiones de vigas y columnas. Los límites están definidos en la Tabla 3.1.

Se asegura que cada solución cumpla con las normativas sísmicas y estructurales peruanas (E.030 y E.060).

4.1.2 Evaluación de factibilidad

Cada solución se evalúa siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.4.1 para determinar su factibilidad. Soluciones no factibles se descartan inmediatamente.

4.1.3 Selección de la mejor solución

Entre las soluciones factibles, se selecciona la que minimiza el costo total de la estructura, considerando el costo del material y la mano de obra, siguiendo la metodología del apartado 3.3.2.

4.2 BÚSQUEDA POR ENTORNOS

A partir de las soluciones generadas en el método de Saltos Múltiples Aleatorios, se utiliza la Búsqueda por Entornos, detallada en el apartado 2.8.2, para refinar las soluciones.

4.2.1 Definición del entorno

Se selecciona la mejor solución obtenida en el método anterior como punto de partida. Se aplican pequeñas variaciones a las dimensiones estructurales dentro de los márgenes definidos en el apartado 3.2.

4.2.2 Evaluación de soluciones cercanas

Cada nueva solución generada es evaluada utilizando los mismos criterios de factibilidad descritos en el apartado 3.4.2, con el objetivo de reducir el costo sin violar las restricciones normativas.

4.2.3 Actualización de la solución

Si se encuentra una solución en el entorno que mejora la anterior, se selecciona como la nueva solución base. Este proceso continúa hasta que no se detectan mejoras significativas.

4.3 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los Algoritmos Genéticos, introducidos en el apartado 2.8.3, se utilizan para explorar nuevas combinaciones de variables de diseño y evitar quedar atrapados en soluciones subóptimas.

4.3.1 Inicialización de la población

La población inicial se genera a partir de las mejores soluciones obtenidas previamente. Cada individuo en la población corresponde a una configuración estructural específica.

4.3.2 Evaluación de la aptitud

Cada individuo es evaluado según el costo total y su factibilidad. Los individuos que no cumplen con las restricciones son descartados.

4.3.3 Selección, cruzamiento y mutación

Se seleccionan los individuos más aptos para el cruzamiento, intercambiando variables de diseño. La mutación se utiliza para introducir pequeñas variaciones aleatorias en las soluciones.

4.3.4 Elitismo y convergencia

4.3.4.1 *Elitismo*

En cada generación, las mejores soluciones se conservan sin ser sometidas a cruzamiento o mutación. Esto asegura que las mejoras alcanzadas en generaciones previas no se pierdan, manteniendo la calidad de las soluciones.

4.3.4.2 *Convergencia*

El algoritmo continúa generando nuevas soluciones hasta que se cumple uno de los criterios de convergencia establecidos: ya sea cuando no se observa una mejora significativa en el costo estructural después de varias generaciones, o cuando se alcanza un número máximo de generaciones, garantizando que el algoritmo se detenga cuando se ha alcanzado una solución óptima o cercana al óptimo.

CAPÍTULO V: RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se mostrarán los resultados de la optimización estructural. Para realizar dicho proceso de optimización se hizo uso de una codificación en Python, como se mencionó en el apartado 4.1.2.

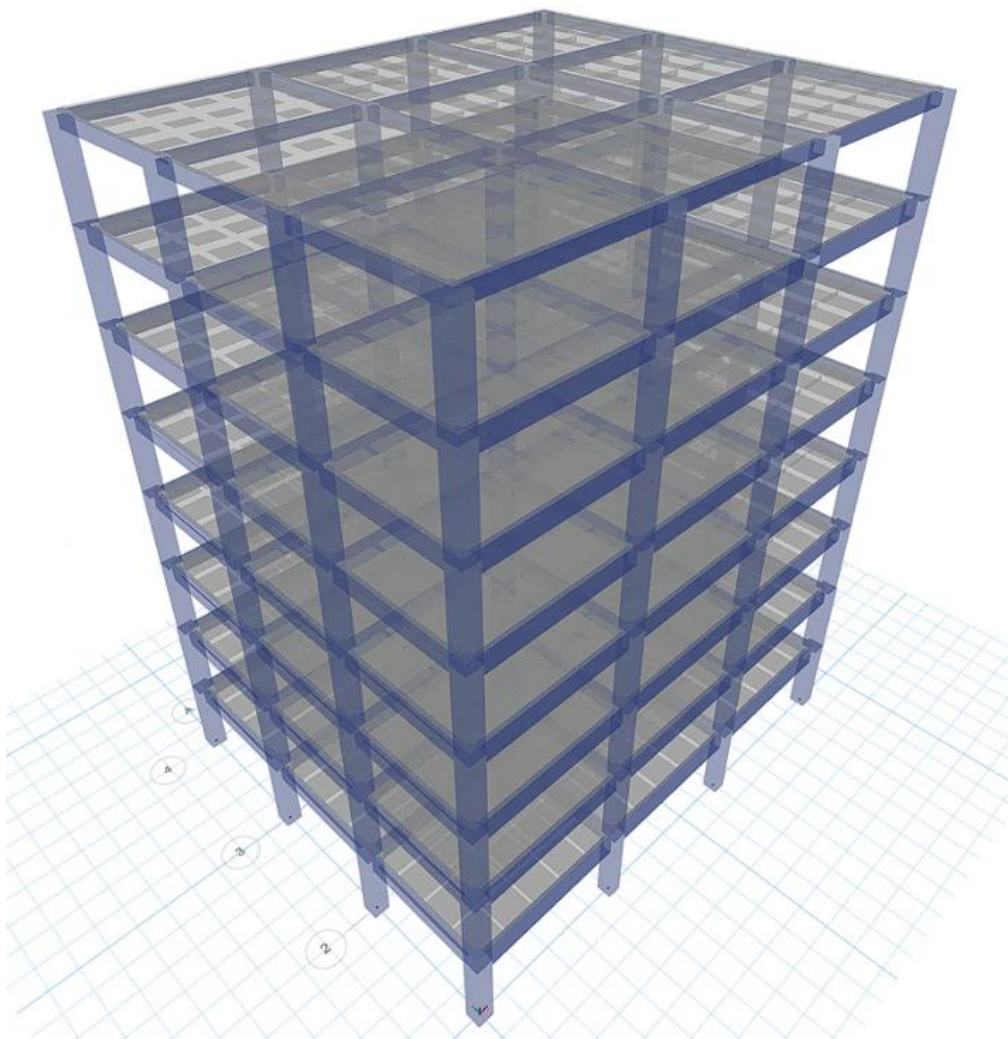


Figura N°5. 1: Vista en 3D de la estructura creada de manera automatizada.

Fuente: Elaboración propia.

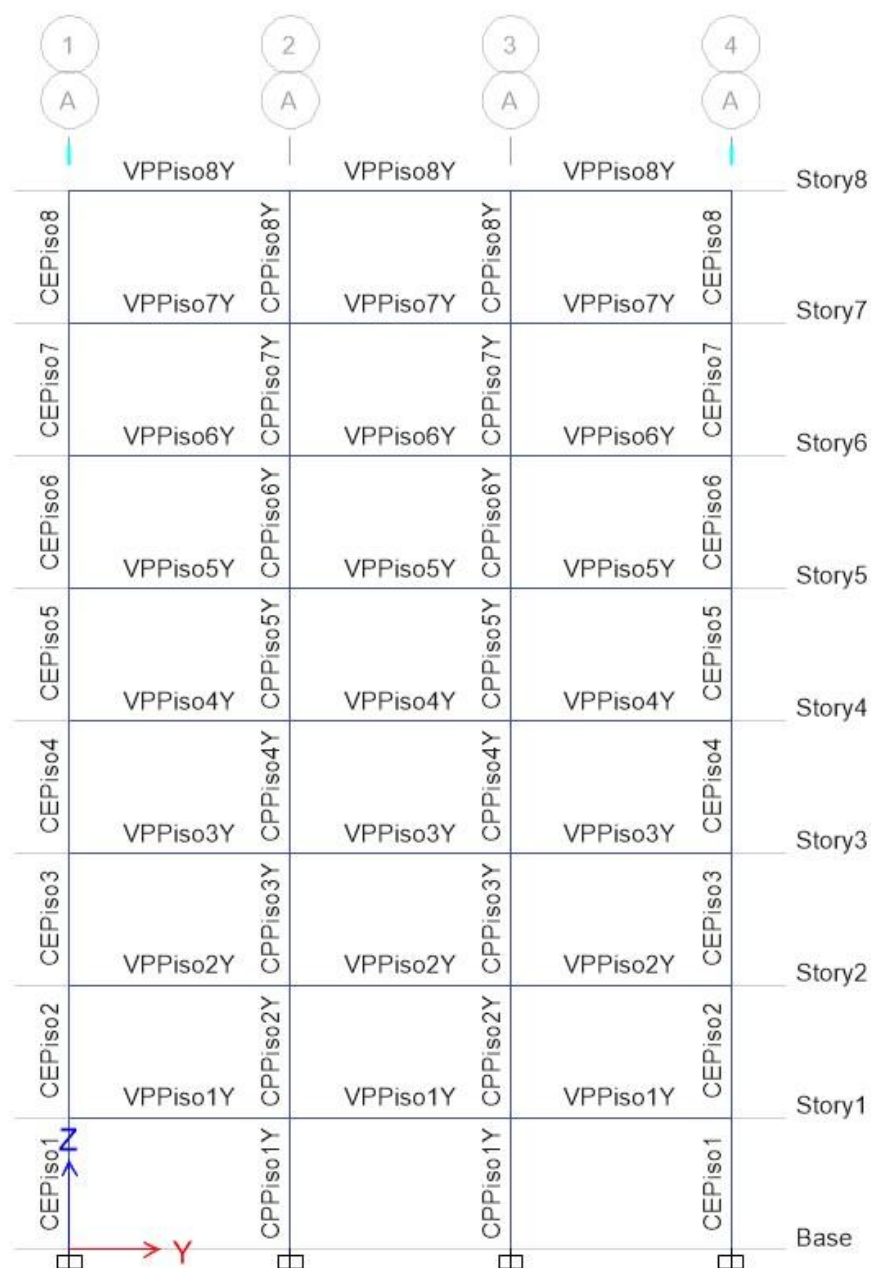


Figura N°5. 2: Vista en perfil de la estructura creada de manera automatizada.

Fuente: Elaboración propia.

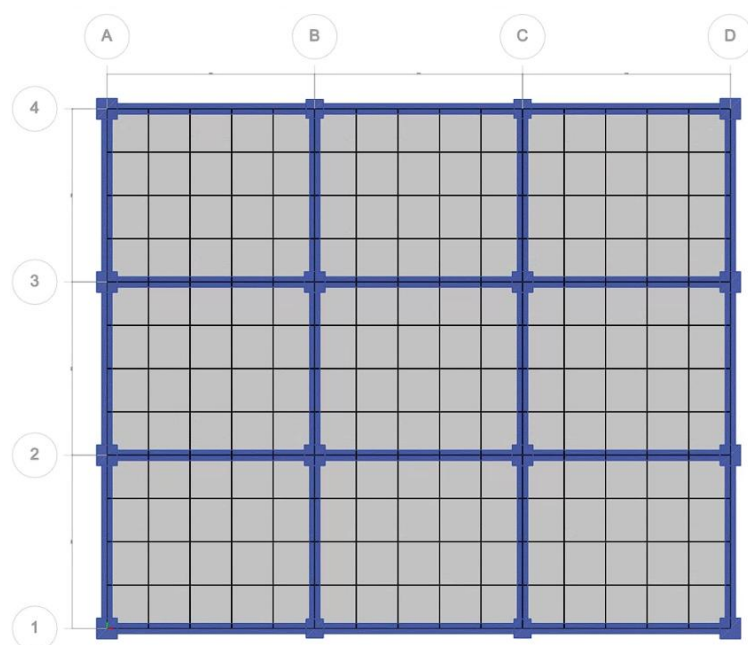


Figura N°5. 3: Vista en planta de la estructura creada de manera automatizada.

Fuente: Elaboración propia.

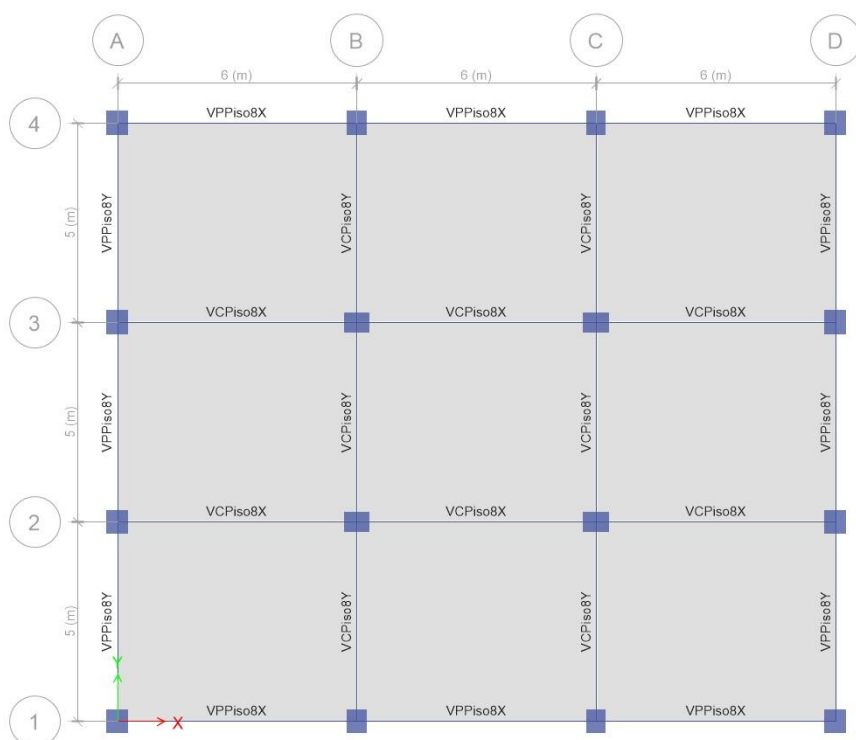


Figura N°5. 4: Vista en planta de la estructura creada de manera automatizada.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 JUSTIFICACIÓN DEL NÚMERO DE ENSAYOS UTILIZADOS PARA EL MÉTODO DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Para garantizar la robustez y fiabilidad de los resultados obtenidos mediante el uso de Algoritmos Genéticos, se realizaron 10 ejecuciones del proceso de optimización. Este número de ensayos fue cuidadosamente seleccionado, tomando en cuenta tanto la precisión de los resultados como la eficiencia en el uso del tiempo y los recursos computacionales.

Una de las razones clave para utilizar 10 ejecuciones es la naturaleza estocástica de los Algoritmos Genéticos. Dado que estos algoritmos dependen de operadores probabilísticos como la selección, el cruce y la mutación, los resultados pueden variar significativamente entre diferentes ejecuciones. Realizar múltiples ensayos permite capturar esta variabilidad y obtener una estimación más precisa de las métricas de interés, como el valor medio y la desviación típica.

Aunque un mayor número de ensayos, como 100, podría proporcionar una mayor precisión y una menor variabilidad en los resultados, la diferencia en precisión no siempre justifica el incremento en el tiempo y los recursos necesarios. En este caso, realizar 10 ensayos ha demostrado ser un equilibrio adecuado entre precisión y eficiencia. A continuación, se presenta una comparación ilustrativa de los resultados esperados para 10 y 100 ensayos, así como el tiempo requerido para cada caso:

	10 ensayos	100 ensayos
Valor medio	S/. 780,685.45	S/. 780,531.24
Desviación típica	S/. 10,449.63	S/. 7,599.73
Coef. de variación	1.34%	0.97%
Tiempo total	168 horas (1 semana)	1680 horas (10 semanas)

Tabla N°5.1: Comparación de resultados con 10 y 100 ensayos.

Fuente: Elaboración propia.

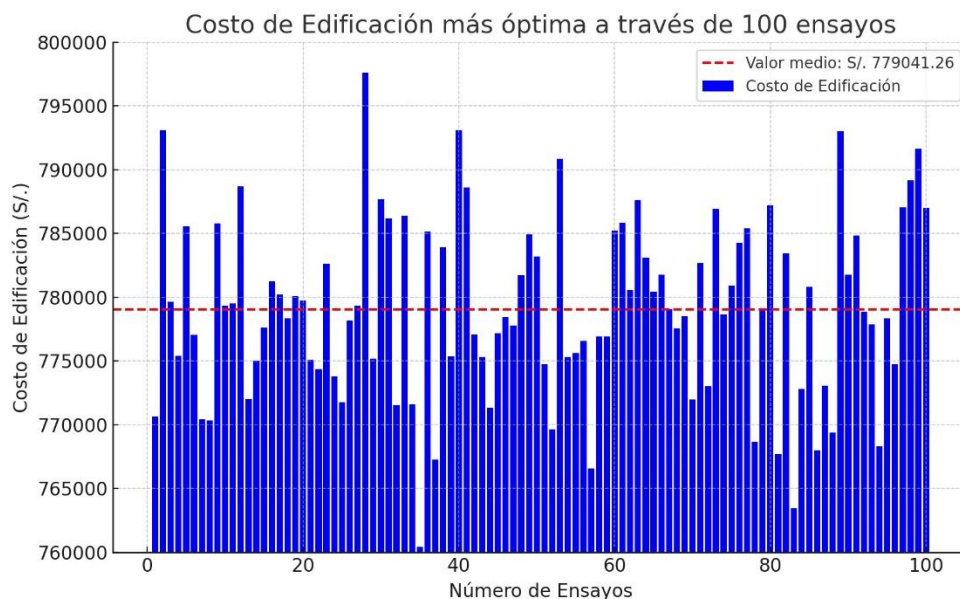


Figura N°5. 5: Costo de Edificación más óptima a través de 100 ensayos.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos con 10 ensayos son suficientemente precisos para los propósitos de este estudio. El valor medio, valor mínimo, desviación típica y coeficiente de variación proporcionan una imagen clara y fiable del rendimiento del algoritmo. Aunque una mayor cantidad de ensayos podría mejorar ligeramente estos valores, el incremento significativo en el tiempo necesario (de 168 horas a 1680 horas) no es justificable para los objetivos actuales. Además, la práctica de realizar 10 ensayos está alineada con las recomendaciones en la literatura de optimización heurística. De acuerdo con Eiben y Smith (2003) en su libro "Introduction to Evolutionary Computing," se sugiere que un rango de 10 a 30 ejecuciones suele ser suficiente para evaluar la performance de los algoritmos genéticos y otros métodos similares. Así, se asegura que las conclusiones derivadas del análisis no sean producto de la casualidad, sino que reflejen el comportamiento consistente del algoritmo frente al problema de optimización planteado.

La decisión de realizar 10 ensayos se basa en un balance entre la necesidad de precisión y la eficiencia en el uso de recursos. Esta cantidad de ensayos es adecuada para obtener resultados robustos y fiables sin incurrir en tiempos de cómputo excesivamente largos.

5.3 SALTOS MÚLTIPLES ALEATORIOS

En esta sección se detallan los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de Saltos Múltiples Aleatorios. En total se hubo 10 ejecuciones y por cada una de estas se realizaron diez mil iteraciones.

En la Figura N°5.4 se muestra la gráfica que representa las soluciones factibles y las soluciones no factibles. La solución con la menor función objetivo, es decir, la solución óptima por cada ejecución, se presenta en la Tabla N°5.2.

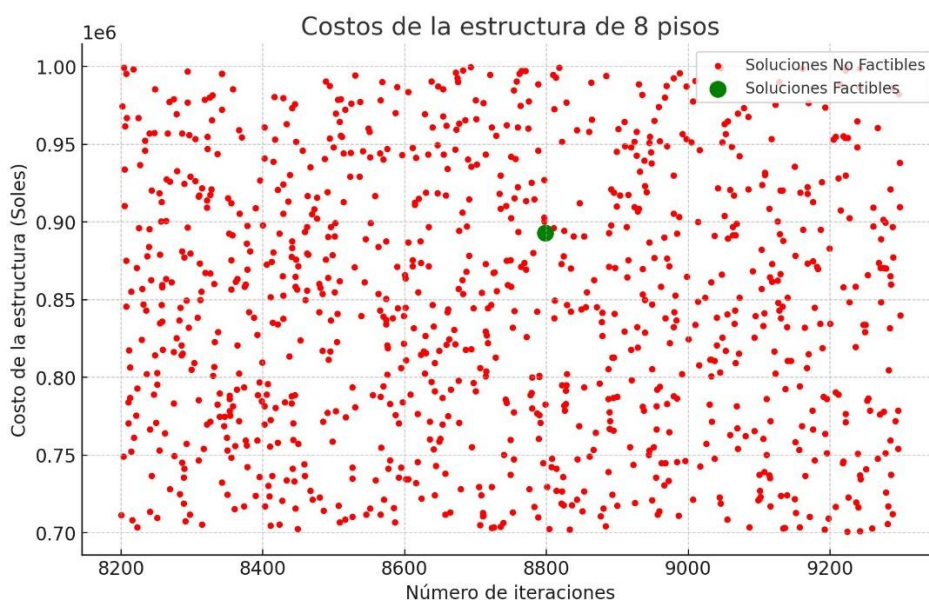


Figura N°5. 6: Resultados obtenidos utilizando Saltos Múltiples Aleatorios.

Fuente: Elaboración propia.

Número de ejecución	Costo (S/.)
1	884,957.70
2	898,132.19
3	909,705.30
4	895,317.88
5	896,902.28
6	893,085.72
7	866,597.49
8	899,236.96
9	879,829.89
10	883,954.74
Valor medio	890,772.02
Valor mínimo	866,597.49
Desviación típica	12,166.96
Coef. de variación	1.37%

Tabla N°5. 2: Resultados obtenidos utilizando Saltos Múltiples Aleatorios.

Fuente: Elaboración propia.

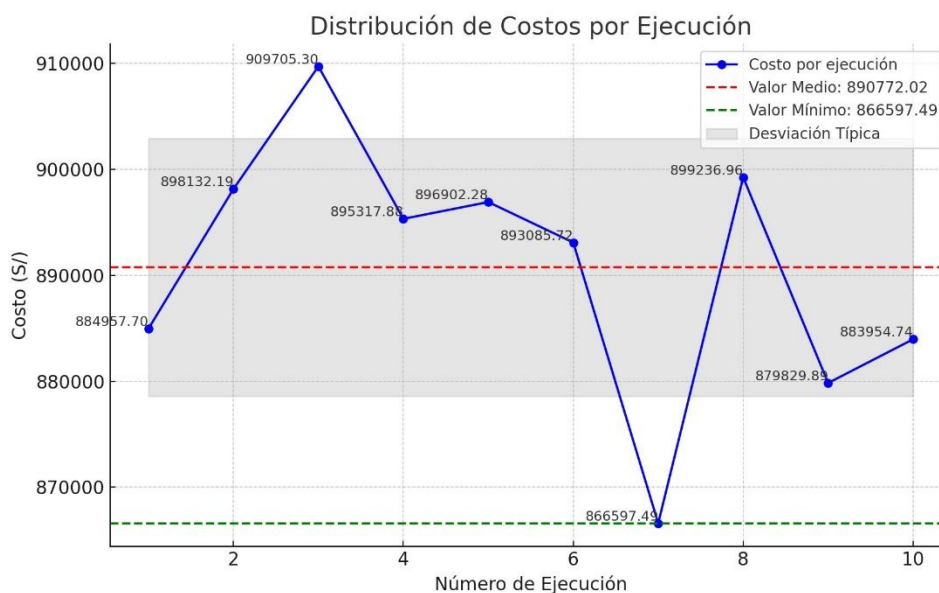


Figura N°5.7: Distribución de Costos por Ejecución- Saltos Múltiples Aleatorios.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 ALGORITMOS GENÉTICOS

En esta sección se detallan los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de Algoritmos Genéticos. Para garantizar la robustez y la consistencia de los resultados, el método fue ejecutado 10 veces, cada una con su propia población inicial de 10 individuos. Este enfoque permitió capturar la variabilidad inherente al algoritmo y asegurar que las soluciones obtenidas sean consistentes y optimizadas.

Para cada una de las 10 ejecuciones, se generó una población inicial de 10 individuos. Además, para cada individuo en la población, se integró el método de búsqueda por entornos, aplicando entre 500 y 2000 iteraciones adicionales por individuo, como se indicó en el apartado 4.3.9. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en términos de costos (en soles) para cada una de las ejecuciones:

Número de ejecución	Costo (S/.)
1	770,868.33
2	781,883.21
3	779,950.25
4	782,470.85
5	792,920.49
6	787,424.25
7	796,483.77
8	770,868.33
9	771,351.48
10	771,598.77
Valor medio	780,581.97
Valor mínimo	770,868.33
Desviación típica	9,499.66
Coef. de variación	1.22%

Tabla N°5.3: Resultados de las ejecuciones con el método de algoritmos genéticos.

Fuente: Elaboración propia.

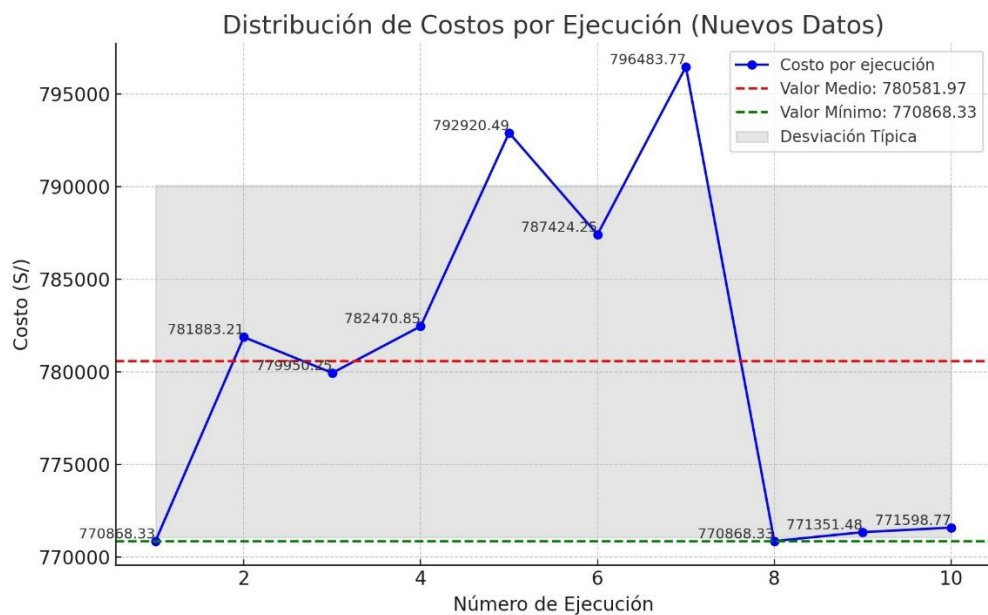


Figura N°5.8: Distribución de Costos por Ejecución- Algoritmos Genéticos.

Fuente: Elaboración propia.

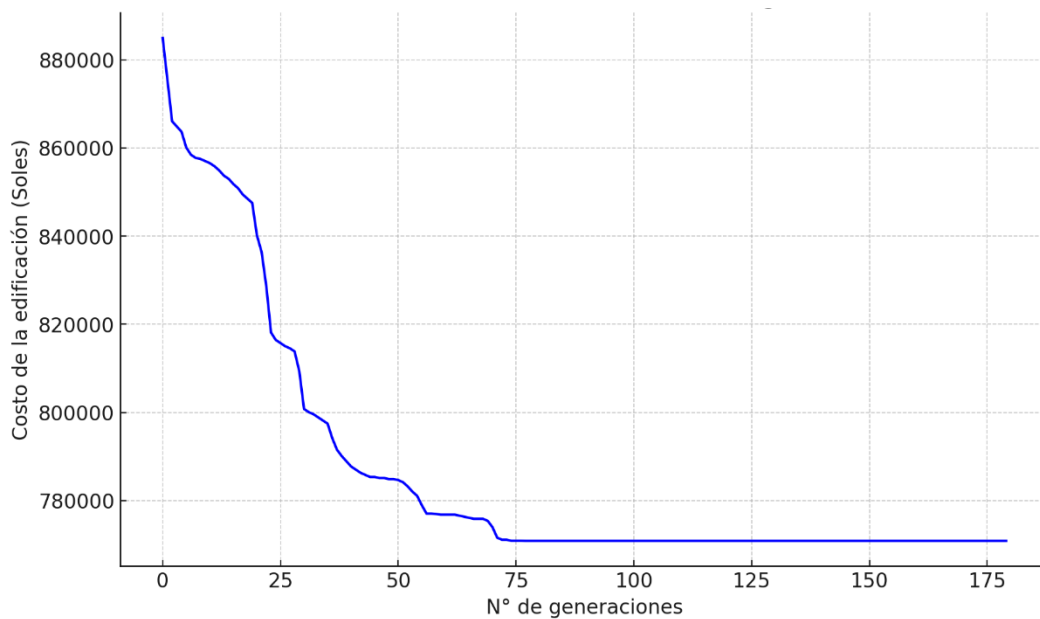


Figura N°5.9: Costo de la edificación vs el número de generaciones de población 1.

Fuente: Elaboración propia.

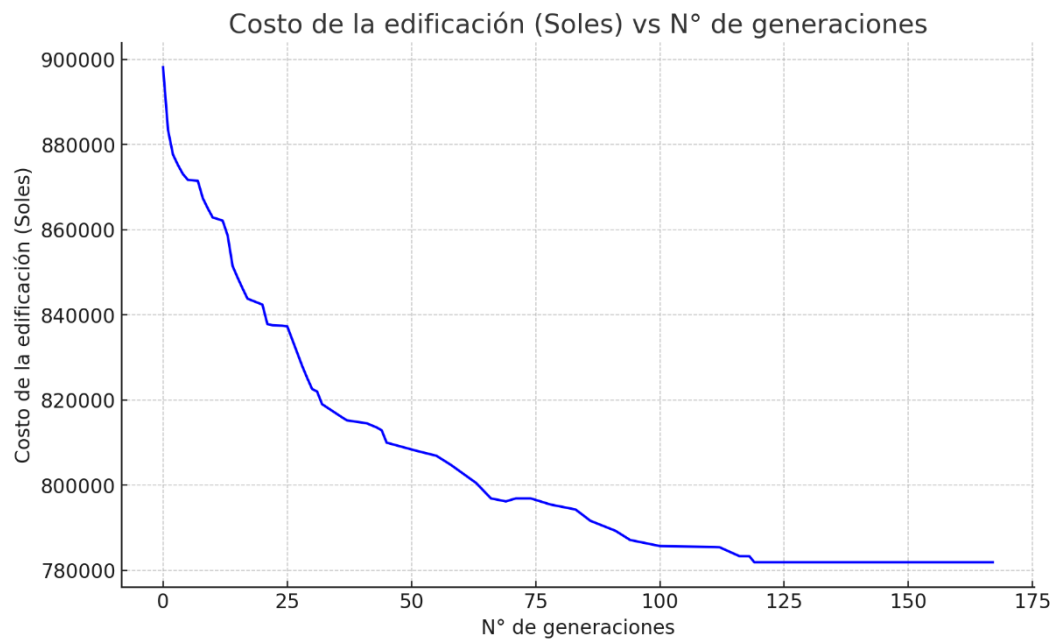


Figura N°5.10: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 2.

Fuente: Elaboración propia.

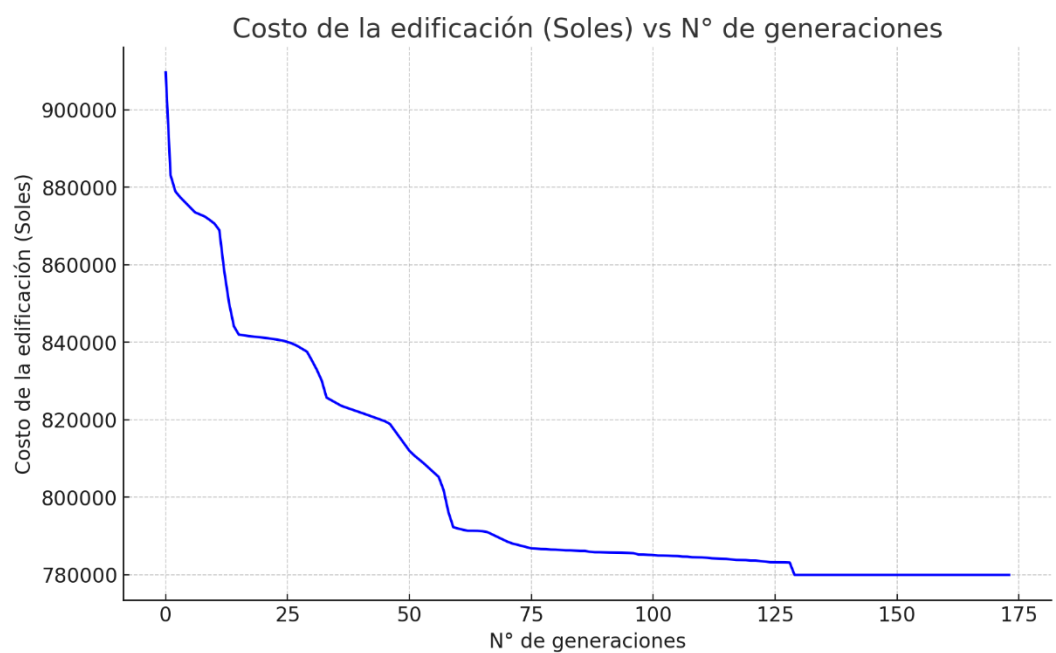


Figura N°5.11: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 3.

Fuente: Elaboración propia.

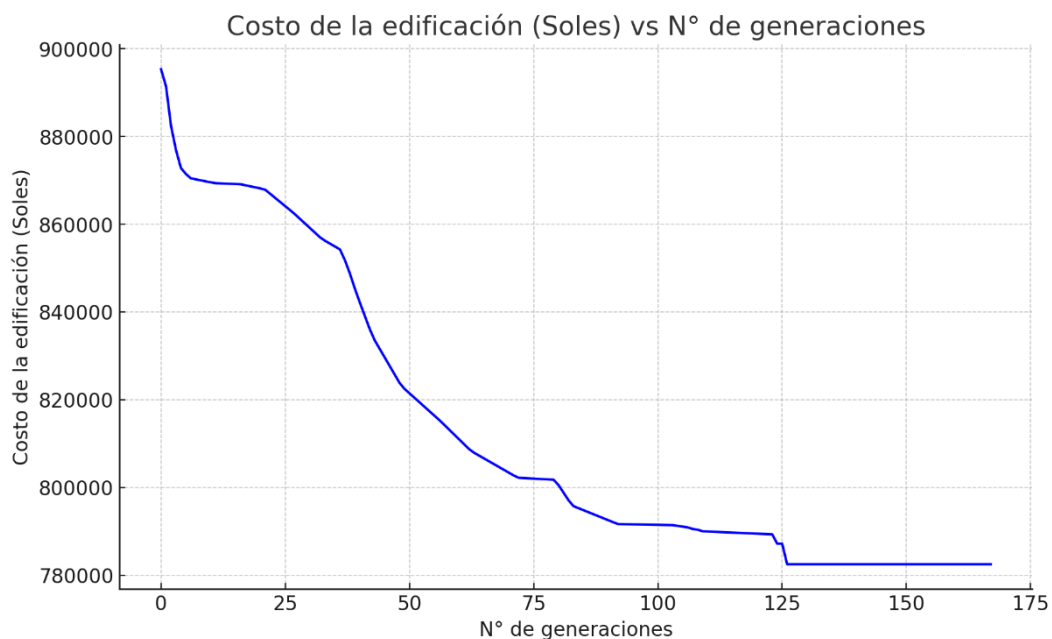


Figura N°5.12: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 4.

Fuente: Elaboración propia.

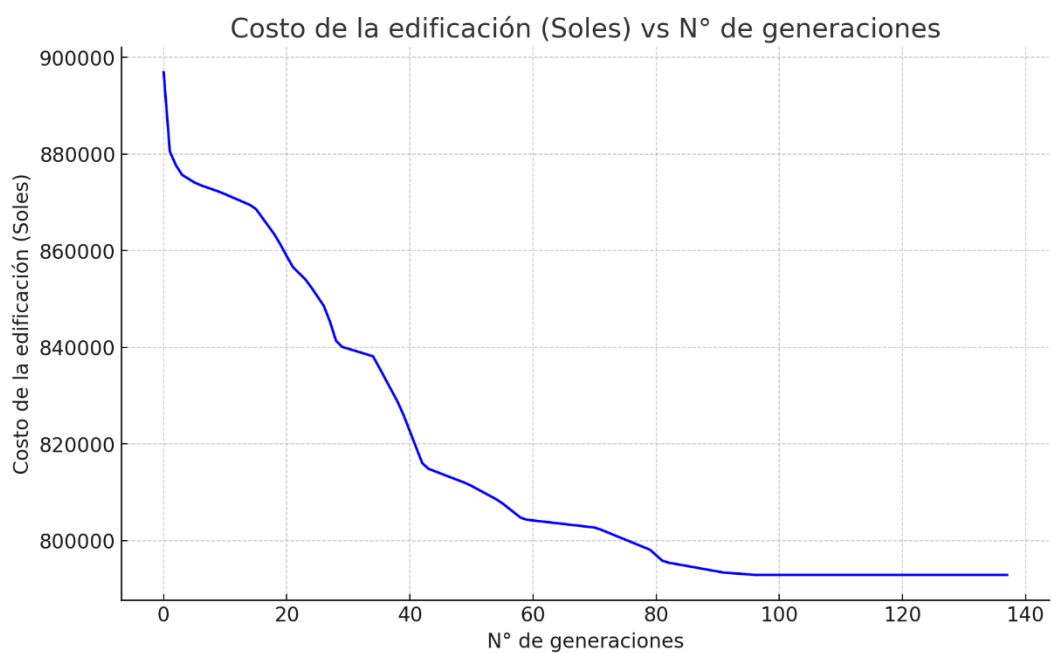


Figura N°5.13: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 5.

Fuente: Elaboración propia.

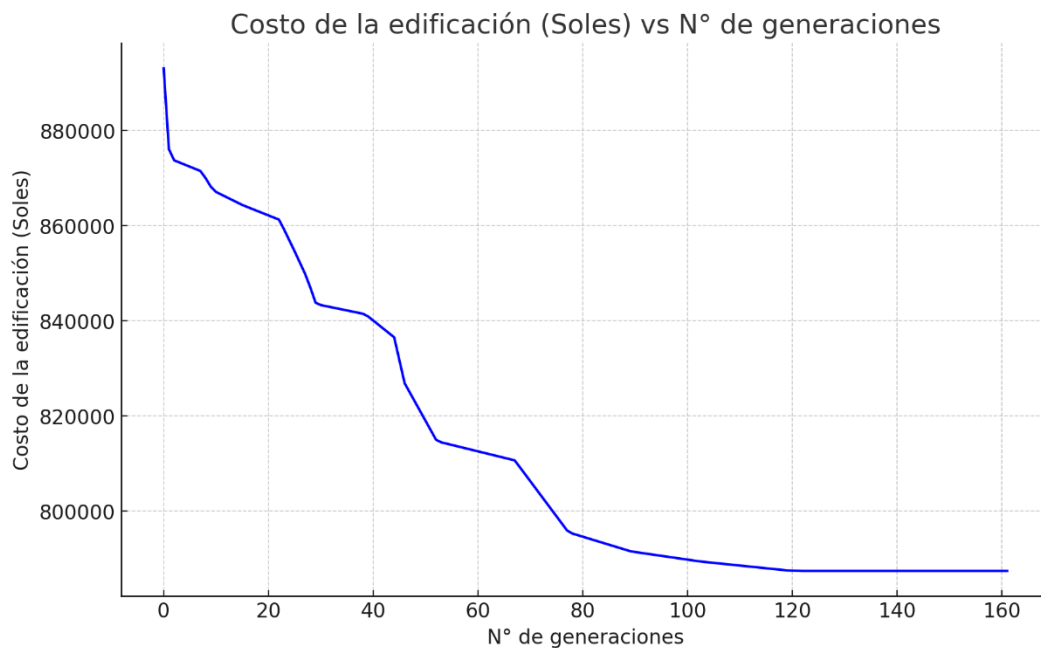


Figura N°5.14: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 6.

Fuente: Elaboración propia.

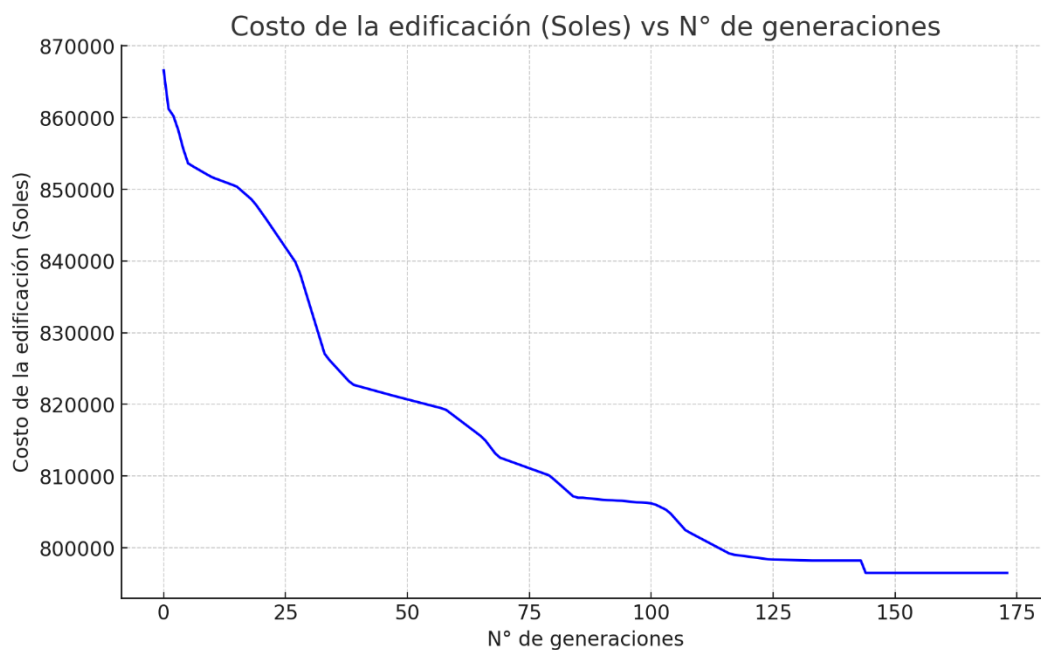


Figura N°5.15: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 7.

Fuente: Elaboración propia.

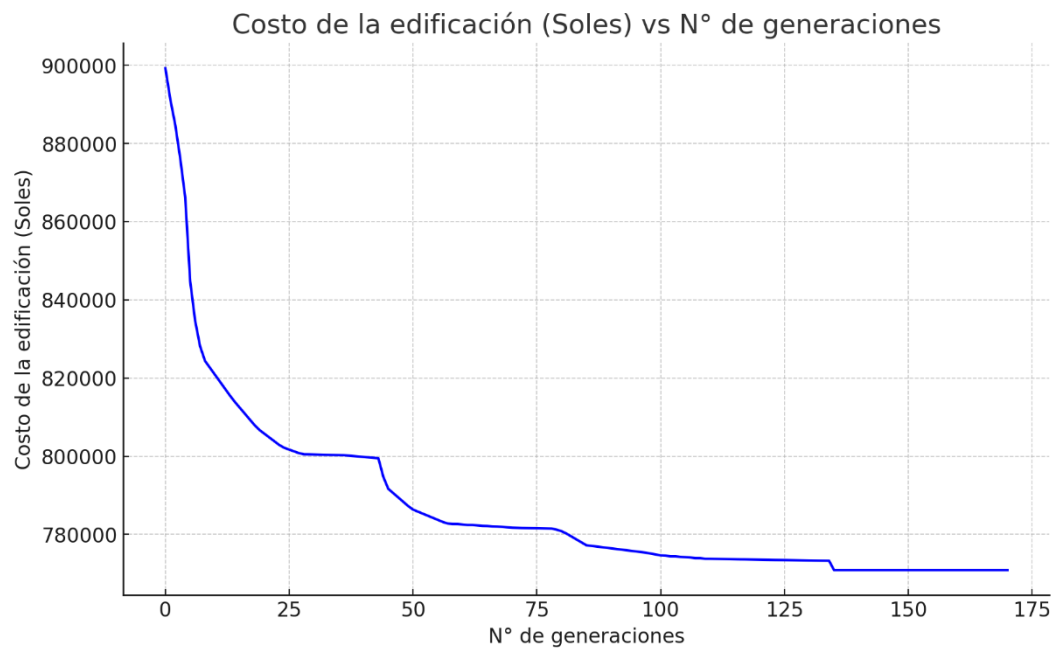


Figura N°5.16: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 8.

Fuente: Elaboración propia.

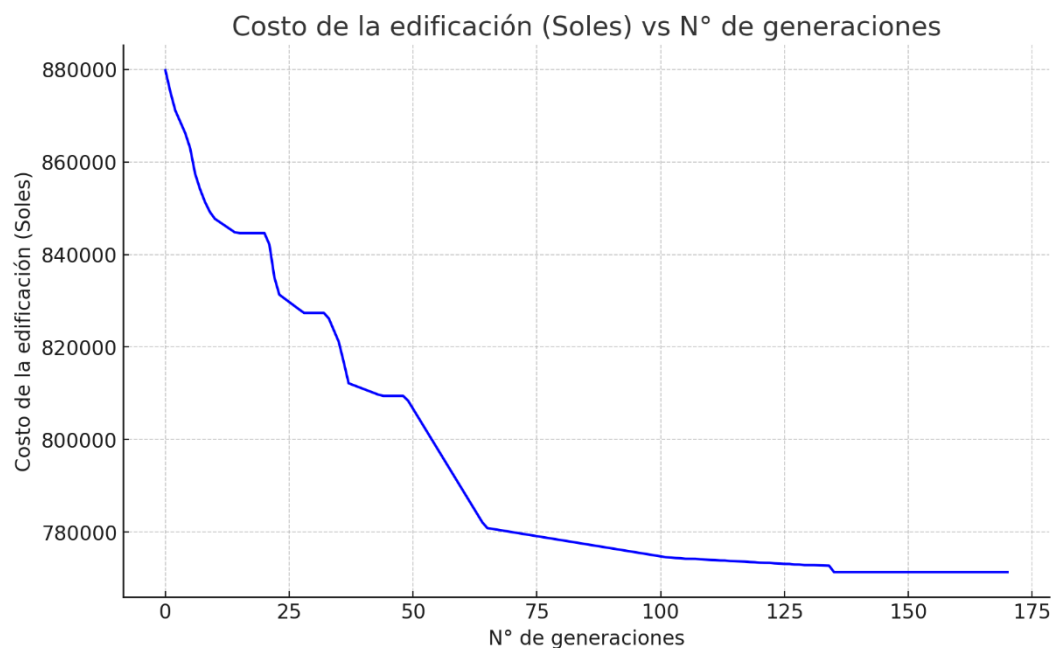


Figura N°5.17: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 9.

Fuente: Elaboración propia.

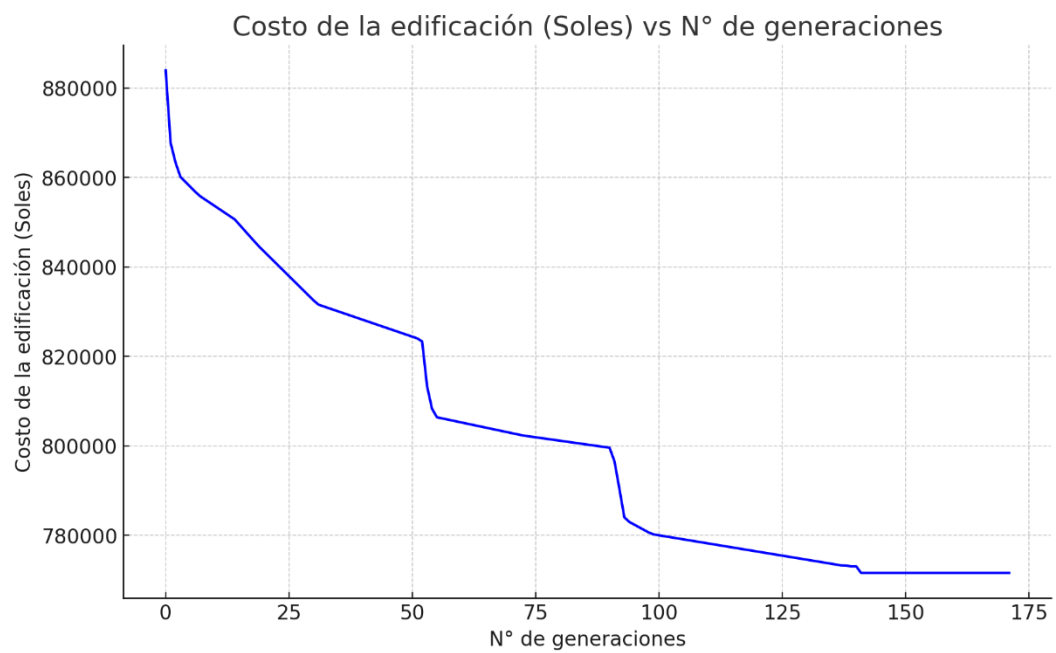


Figura N°5.18: Costo de la edificación vs el número de generaciones de la población 10.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 SALTOS MÚLTIPLES ALEATORIOS

Los resultados obtenidos muestran una variación en los costos de las edificaciones en cada ejecución del algoritmo genético utilizando el método de saltos múltiples aleatorios. Para interpretar mejor estos resultados, se calcularon las siguientes estadísticas:

Valor medio: S/. 890,772.02

Este valor representa el costo promedio de las edificaciones después de aplicar el algoritmo genético con el método de saltos múltiples aleatorios, indicando que, en promedio, el costo se sitúa en 890,772.02 soles.

Valor mínimo: S/. 866,597.49

Este es el costo más bajo registrado en las ejecuciones, mostrando que la solución más económica obtenida costó 866,597.49 soles.

Desviación típica: S/. 12,166.96

Este valor mide la dispersión de los costos respecto al valor medio, indicando que, en promedio, los costos varían en 12,166.96 soles alrededor del valor medio.

Coefficiente de variación: 1.37%

Este valor, expresado en porcentaje, muestra la relación entre la desviación típica y el valor medio. Un coeficiente de variación de 1.37% es relativamente bajo, lo que sugiere que los costos de las soluciones obtenidas presentan una variabilidad controlada. Esto indica que el método de saltos múltiples aleatorios es eficaz para explorar diversas soluciones, logrando una consistencia razonable en los costos de las edificaciones optimizadas.

6.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los resultados muestran una variación en los costos obtenidos en cada ejecución del algoritmo genético. Para entender mejor estos resultados, se calcularon las siguientes estadísticas:

Valor medio: S/. 780,581.97

Este valor representa el costo promedio de las edificaciones después de aplicar el algoritmo genético, indicando que, en promedio, el costo se sitúa en 780,581.97 soles.

Valor mínimo: S/. 770,868.33

Este es el costo más bajo registrado en las ejecuciones, mostrando que la solución más económica obtenida costó 770,868.33 soles.

Desviación típica: S/. 9,499.66

Este valor mide la dispersión de los costos respecto al valor medio, indicando que, en promedio, los costos varían en 9,499.66 soles alrededor del valor medio.

Coeficiente de variación: 1.22%

Este valor, expresado en porcentaje, muestra la relación entre la desviación típica y el valor medio. Un coeficiente de variación de 1.22% indica que la variabilidad relativa de los costos es baja, sugiriendo que los costos son relativamente consistentes, aunque hay una ligera fluctuación en los resultados.

Estos resultados permiten concluir que el algoritmo genético aplicado genera costos de edificación bastante uniformes, con una variabilidad relativamente baja y un valor medio que se puede utilizar como una referencia confiable para estimaciones futuras. La estabilidad en los costos obtenidos es un indicativo de la eficiencia del algoritmo para encontrar soluciones óptimas dentro de un rango estrecho de costos.

Para la evaluación de la variación de costos, se consideró como solución inicial al problema la solución óptima obtenida mediante el método de Saltos Múltiples Aleatorios. Este enfoque permitió establecer un punto de partida robusto para la comparación con las soluciones optimizadas posteriores. Además, se escogió el valor más óptimo entre las 10 ejecuciones realizadas, garantizando así la representatividad de los resultados obtenidos. Este mismo criterio fue aplicado en la evaluación del peso del concreto y del acero, seleccionando siempre la mejor opción alcanzada en cada caso para asegurar una optimización integral y coherente en todas las métricas evaluadas.

6.2.1 Variación del costo respecto al inicial

Los costos iniciales y los costos optimizados para cada una de las estructuras evaluadas se resumen en la siguiente tabla:

N° de Ejecución	Costo Inicial (S/.)	Costo Optimizado (S/.)	Reducción de Costo (S/.)	Variación Porcentual
1	866,597.49	770,868.33	95,729.16	11.05%
2	866,597.49	781,883.21	84,714.28	9.78%
3	866,597.49	779,950.25	86,647.24	10.00%
4	866,597.49	782,470.85	84,126.64	9.71%
5	866,597.49	792,920.49	73,677.00	8.50%
6	866,597.49	787,424.25	79,173.24	9.14%
7	866,597.49	796,483.77	70,113.72	8.09%
8	866,597.49	770,868.33	95,729.16	11.05%
9	866,597.49	771,351.48	95,246.01	10.99%
10	866,597.49	771,598.77	94,998.72	10.96%

Tabla N°5.4: Resultados de la Optimización del Costo en Diversas Ejecuciones.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis estadístico de las reducciones de costos muestra los siguientes resultados:

	Valor
Reducción Máxima	S/. 95,729.16
Reducción Promedio	S/. 86,015.52
Reducción Mediana	S/. 85,680.76
Desviación Estándar	S/. 9,499.66
Correlación	0.99999
Variación Porcentual Media	9.93%

Tabla N°5.5: Resumen Estadístico de la Optimización del Costo de la Estructura.

Fuente: Elaboración propia.

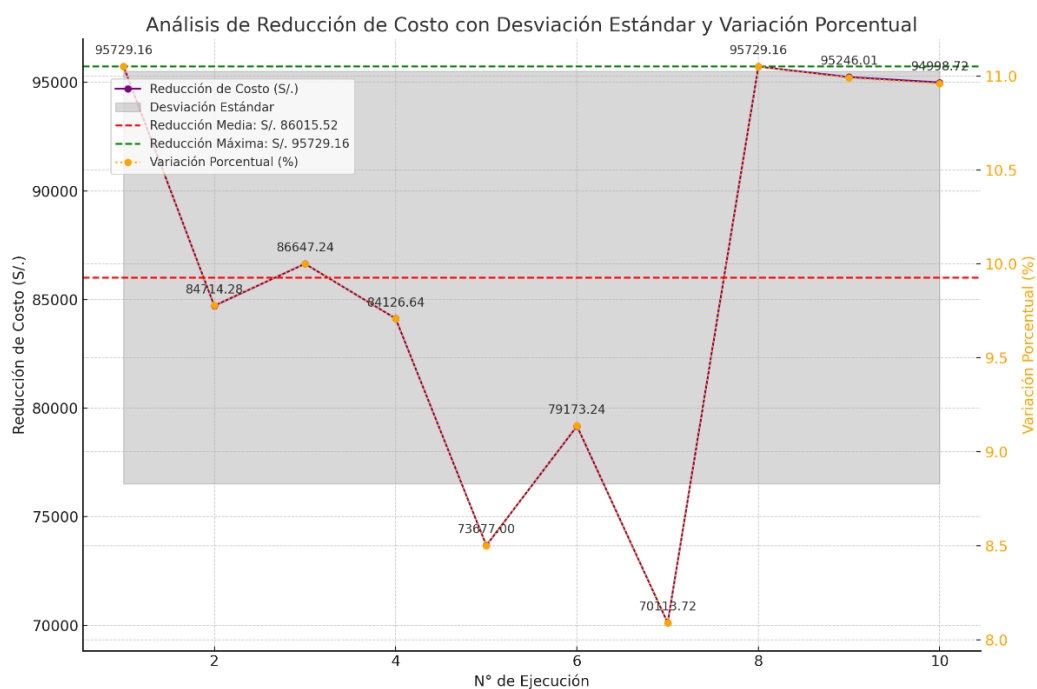


Figura N°5.19: Reducción de Costos y Variabilidad por Ejecución.

Fuente: Elaboración propia.

Reducción Promedio y Mediana: La reducción promedio de costos obtenida mediante la optimización fue de S/. 86,015.52, mientras que la reducción mediana fue de S/. 85,680.76. Esto indica que, en promedio, la optimización resultó en una disminución considerable de costos para las estructuras evaluadas.

Desviación Estándar: La desviación estándar de S/. 9,499.66 sugiere que las reducciones de costos fueron bastante consistentes a lo largo de los diferentes casos evaluados.

Correlación: El coeficiente de correlación de 0.99999 entre la reducción de costos y la variación porcentual indica una correlación casi perfecta. Esto significa que, en general, las estructuras que experimentaron mayores reducciones de costos también mostraron mayores porcentajes de optimización.

Variación Porcentual Media: La variación porcentual media fue de 9.93%, lo que refleja que las optimizaciones realizadas tienen un impacto significativo y consistente en la reducción de costos en términos porcentuales.

6.2.2 Variación del peso de concreto respecto al inicial

Los pesos de concreto iniciales y los pesos de concreto optimizados para cada una de las estructuras evaluadas se resumen en la siguiente tabla:

N° de Ejecución	Peso Inicial del Concreto (Ton)	Peso Optimizado del Concreto (Ton)	Reducción de Peso (Ton)	Porcentaje de optimización
1	1773.9	1,660.2863	113.6137	6.4 %
2	1773.9	1,660.2863	113.6137	6.4 %
3	1773.9	1,660.2863	113.6137	6.4 %
4	1773.9	1,660.2863	113.6137	6.4 %
5	1773.9	1,660.2863	113.6137	6.4 %
6	1773.9	1,660.2863	113.6137	6.4 %
7	1773.9	1,660.2863	113.6137	6.4 %
8	1773.9	1,660.2863	113.6137	6.4 %
9	1773.9	1,663.8493	110.0507	6.2 %
10	1773.9	1,666.7663	107.1337	6.0 %

Tabla N°5.6: Resultados de la Optimización del Peso del Concreto en Diversas Ejecuciones.

Fuente: Elaboración propia.

	Valor
Reducción Máxima	113.61 Ton
Reducción Promedio	112.61 Ton
Reducción Mediana	113.61 Ton
Desviación Estándar	2.23 Ton
Correlación	0.999
Variación Porcentual Media	6.34%

Tabla N°5.7: Resumen Estadístico de la Optimización del Peso del Concreto.

Fuente: Elaboración propia.

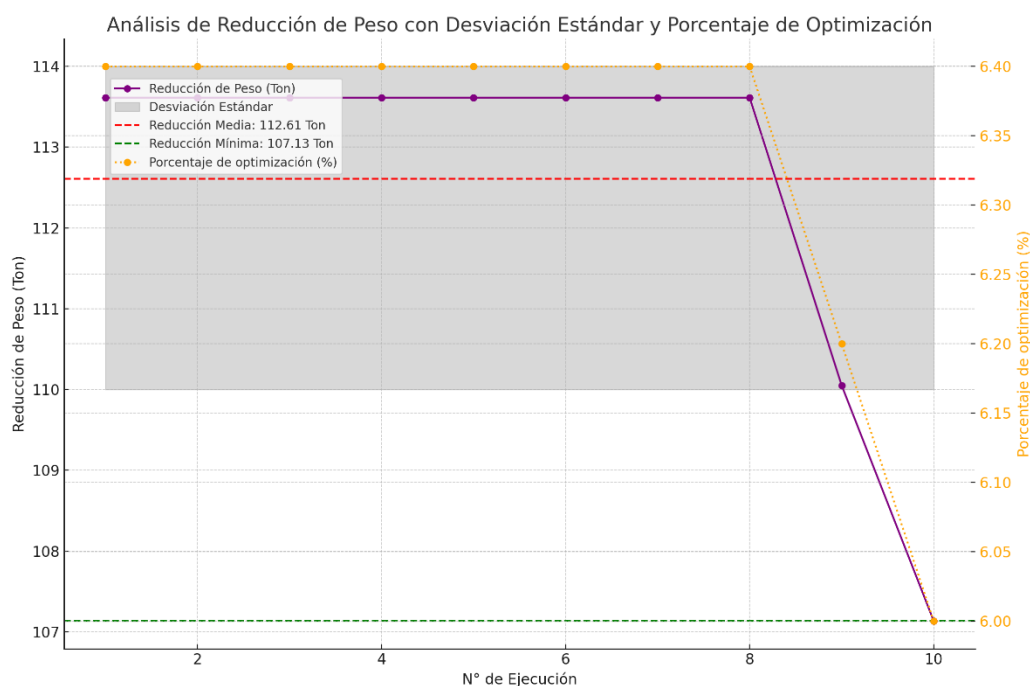


Figura N°5.20: Análisis de Reducción de Peso y Optimización por Ejecución.

Fuente: Elaboración propia.

Reducción Promedio y Mediana: La reducción promedio de peso obtenida mediante la optimización fue de 112.61 toneladas, mientras que la reducción mediana fue de 113.61 toneladas. Esto indica que, en promedio, la optimización resultó en una disminución considerable del peso para las estructuras evaluadas.

Desviación Estándar: La desviación estándar de 2.23 toneladas sugiere que las reducciones de peso fueron bastante consistentes a lo largo de los diferentes casos evaluados.

Correlación: El coeficiente de correlación de 0.999 entre la reducción de peso y el porcentaje de optimización indica una correlación casi perfecta. Esto significa que, en general, las estructuras que experimentaron mayores reducciones de peso también mostraron mayores porcentajes de optimización.

Variación Porcentual Media: La variación porcentual media fue de 6.34%, lo que refleja que las optimizaciones realizadas tienen un impacto significativo y consistente en la reducción del peso en términos porcentuales.

Correlación: El coeficiente de correlación de 0.999 entre la reducción de peso y el porcentaje de optimización indica una muy fuerte correlación positiva. Esto significa que, en general, las estructuras que experimentaron mayores reducciones de peso también mostraron mayores porcentajes de optimización tras el proceso.

6.2.3 Variación del peso del acero respecto al inicial

Los pesos de aceros iniciales y los pesos de aceros optimizados para cada una de las estructuras evaluadas se resumen en la siguiente tabla:

N° de Ejecución	Peso Inicial del Acero (kg)	Peso Optimizado del Acero (kg)	Reducción de Peso (kg)	Porcentaje de optimización
1	136,363.267	119,584.369	16,778.898	12.30 %
2	136,363.267	121,787.344	14,575.923	10.69 %
3	136,363.267	121,400.752	14,962.515	10.97 %
4	136,363.267	121,904.871	14,458.396	10.60 %
5	136,363.267	123,994.801	12,368.466	9.07 %
6	136,363.267	122,895.553	13,467.714	9.88 %
7	136,363.267	124,707.457	11,655.810	8.55 %
8	136,363.267	119,584.369	16,778.898	12.30 %
9	136,363.267	119,606.769	16,756.498	12.29 %
10	136,363.267	119,595.459	16,767.808	12.30 %

Tabla N°5.8: Resultados de la Optimización del Peso del Acero en Diversas Ejecuciones.

Fuente: Elaboración propia.

	Valor
Reducción Máxima	16,778.90 kg
Reducción Promedio	14,857.09 kg
Reducción Mediana	14,769.22 kg
Desviación Estándar	1,922.56 kg
Correlación	0.99999
Variación Porcentual Media	10.90%

Tabla N°5.9: Resumen Estadístico de la Optimización del Peso del Concreto.

Fuente: Elaboración propia.

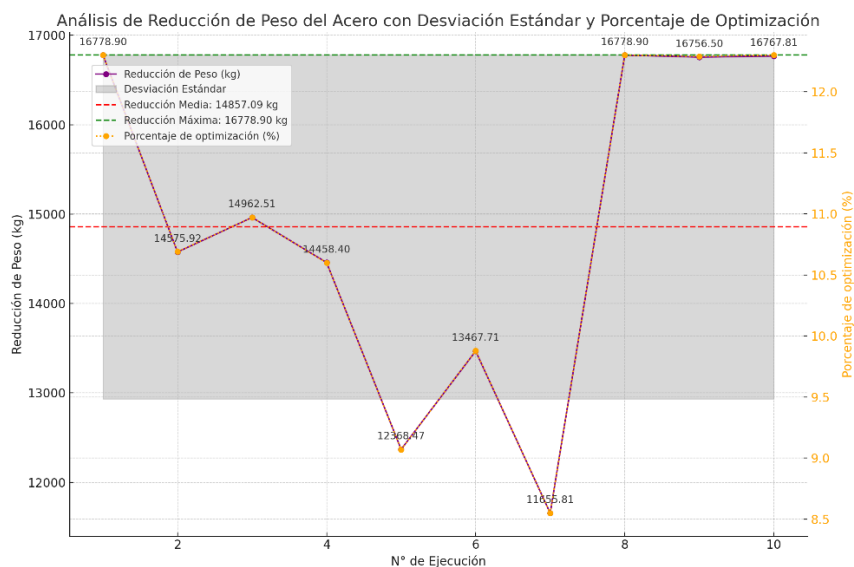


Figura N°5.21: Análisis de Reducción de Peso del Acero y Optimización por Ejecución.

Fuente: Elaboración propia.

Reducción Promedio y Mediana: La reducción promedio de peso obtenida mediante la optimización fue de 14,857.09 kg, mientras que la reducción mediana fue de 14,769.22 kg. Esto indica que, en promedio, la optimización resultó en una disminución considerable del peso para las estructuras evaluadas.

Desviación Estándar: La desviación estándar de 1,922.56 kg sugiere que las reducciones de peso fueron bastante consistentes a lo largo de los diferentes casos evaluados.

Correlación: El coeficiente de correlación de 0.99999 entre la reducción de peso y el porcentaje de optimización indica una correlación casi perfecta. Esto significa que, en general, las estructuras que experimentaron mayores reducciones de peso también mostraron mayores porcentajes de optimización.

Variación Porcentual Media: La variación porcentual media fue de 10.90%, lo que refleja que las optimizaciones realizadas tienen un impacto significativo y consistente en la reducción del peso en términos porcentuales.

Reducción Máxima: La reducción máxima alcanzada fue de 16,778.90 kg, destacando la eficacia del proceso de optimización en ciertos casos específicos.

CONCLUSIONES

1. La definición del problema de optimización fue realizada de manera adecuada, permitiendo identificar las variables de diseño, restricciones y la función objetivo. Esto facilitó la aplicación efectiva de algoritmos genéticos y el método de saltos múltiples aleatorios, logrando una optimización eficiente de las dimensiones y costos con un coeficiente de variación de 1.22%, lo que indica una baja variabilidad relativa en los costos optimizados.
2. La aplicación de algoritmos genéticos en la optimización estructural resultó en un valor medio de costo optimizado de S/. 777,735.87, con reducciones de costo que varían desde S/. 70,113.72 (8.09%) hasta S/. 95,729.16 (11.05%). Estos resultados confirman la alta eficacia del método heurístico para disminuir los costos en edificaciones de concreto armado, especialmente en estructuras de mediana altura en Lima.
3. La optimización estructural resultó en una reducción promedio del peso del concreto en un 6.4% (equivalente a 112.61 toneladas), del peso del acero en un 12.3% (equivalente a 14,857.09 kg), y del costo total en un 9.78% (equivalente a S/. 84,775.47). Estos resultados demuestran una significativa optimización en las dimensiones y costos de los elementos estructurales, alineándose directamente con el objetivo de estimar el porcentaje de optimización de las dimensiones, cantidad de acero y costo de los elementos estructurales.
4. La variabilidad en los resultados obtenidos mediante el método de saltos múltiples aleatorios muestra un coeficiente de variación de 1.22%, lo cual sugiere que, aunque el método es efectivo para explorar una amplia gama de soluciones, los resultados presentan una dispersión controlada en comparación con el promedio. Esto indica que el método es eficaz y genera soluciones con un rango consistente de costos.

5. La estabilidad en los costos obtenidos, con un valor medio de S/. 777,735.87 y una desviación estándar de S/. 9,499.66, evidencia la eficacia del algoritmo en encontrar soluciones óptimas dentro de un rango estrecho de costos. Esto es indicativo de la capacidad del algoritmo genético para generar costos de edificación bastante uniformes, con una variabilidad relativamente baja que se puede utilizar como referencia confiable para estimaciones futuras.
6. La reducción promedio del peso del acero fue de 14,857.09 kg, lo que representa un 12.3% de optimización respecto al peso inicial. Este resultado destaca la eficacia del proceso de optimización en mejorar la eficiencia estructural, logrando una significativa reducción en el uso de materiales sin comprometer la seguridad de la estructura.
7. La implementación del cruzamiento en los algoritmos genéticos diversificó efectivamente la población de soluciones, evitando la convergencia prematura a soluciones subóptimas. Esto permitió explorar nuevas áreas del espacio de soluciones y mejorar la calidad de las soluciones finales, contribuyendo a un proceso de optimización más robusto.
8. La integración del método de búsqueda por entornos dentro del proceso de algoritmos genéticos permitió realizar ajustes finos y específicos en las soluciones, asegurando una optimización real de las configuraciones estructurales en términos de costos y cumplimiento normativo. Esta combinación mejoró significativamente la capacidad del algoritmo para converger hacia soluciones óptimas.
9. La decisión de realizar 10 ejecuciones del proceso de optimización fue adecuada para equilibrar la precisión de los resultados con la eficiencia en el uso de recursos. Este enfoque redujo significativamente el tiempo de cómputo necesario sin sacrificar la calidad de las soluciones obtenidas, asegurando que los recursos computacionales se utilicen de manera efectiva.

RECOMENDACIONES

1. Dado que la precisión de los resultados depende significativamente de los intervalos de variación de las variables, se recomienda realizar un análisis de sensibilidad para determinar los intervalos óptimos. Ajustar estos intervalos puede mejorar la eficiencia del algoritmo y reducir el número de soluciones no factibles generadas, optimizando así el proceso.
2. Considerar la implementación de técnicas de paralelización y uso de computación en la nube para reducir los tiempos de cómputo. La optimización de los recursos computacionales permitirá manejar un mayor número de iteraciones y mejorar la exploración del espacio de soluciones.
3. Para asegurar que las soluciones obtenidas sean viables y aplicables en el mundo real, se recomienda validar los resultados del modelo con proyectos reales de construcción. Esto no solo fortalecerá la credibilidad de los métodos utilizados, sino que también proporcionará datos empíricos para ajustar y mejorar los algoritmos.
4. Asegurar un balance adecuado entre elitismo y diversidad genética es crucial. Se recomienda ajustar las tasas de cruzamiento y mutación para evitar la convergencia prematura y mantener una población de soluciones diversa, lo cual es esencial para explorar completamente el espacio de soluciones.
5. Utilizar métodos de selección más sofisticados, como la selección por torneo o la selección basada en ranking, puede mejorar la calidad de las soluciones y acelerar la convergencia del algoritmo hacia óptimos globales.
6. Ampliar el modelo para incluir otros factores relevantes, como el impacto ambiental y la sostenibilidad, puede proporcionar una perspectiva más holística y fomentar el desarrollo de soluciones que no solo sean económicamente viables, sino también ambientalmente responsables.

7. Fomentar la colaboración entre ingenieros estructurales, arquitectos y especialistas en algoritmos genéticos para intercambiar conocimientos y mejorar continuamente el enfoque de optimización. Esta sinergia puede llevar a soluciones más innovadoras y eficientes.
8. Implementar un sistema de evaluación post-construcción para monitorear el desempeño de las estructuras optimizadas y recolectar datos valiosos que puedan ser utilizados para ajustar y mejorar los algoritmos en futuros proyectos.

Referencias Bibliográficas

- Aarts, E., & Korst, J. (1989). *Simulated Annealing and Boltzmann Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing*. John Wiley & Sons.
- Afshari, H., Hare, W., & Tesfamariam, S. (2019). *Constrained multi-objective optimization algorithms: Review and comparison with application in reinforced concrete structures*. *Applied Soft Computing*, 81, 105741. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105741>
- Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., & Shetty, C. M. (2010). *Nonlinear programming: Theory and algorithms* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., & Shetty, C. M. (2010). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. John Wiley & Sons.
- Bertsimas, D., & Tsitsiklis, J. N. (1997). *Introduction to linear optimization*. Athena Scientific.
- Birge, J. R., & Louveaux, F. (2011). *Introduction to stochastic programming* (2nd ed.). Springer Science & Business Media.
- Borda Galindo, E. A. (2020). *Programa para optimización en peso de armaduras de acero mediante algoritmos genéticos* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/17617>
- Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804441>
- Chong, E. K. P., & Zak, S. H. (2013). *An introduction to optimization* (4th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118515150>
- Coello, C. (2004). *Introducción a la computación evolutiva* [Notas del curso]. <http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/compevol/apuntes.pdf>
- Dunn, G., & Everitt, B. (1995). *An introduction to mathematical taxonomy*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511569869>
- Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2003). *Introduction to evolutionary computing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05094-1>
- Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to evolutionary computing* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44874-8>

- Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (Eds.). (2010). *Handbook of metaheuristics* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5>
- Glover, F. (1989). *Tabu search—Part I*. *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190–206. <https://doi.org/10.1287/ijoc.1.3.190>
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley.
- Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). *Genetic algorithms and machine learning*. *Machine Learning*, 3(2), 95–99. <https://doi.org/10.1023/A:1022602019183>
- Haupt, R. L., & Haupt, S. E. (2004). *Practical genetic algorithms* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471671746>
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence* (2nd ed.). MIT Press.
- La Torre Esquivel, J. E. (2018). *Optimización del diseño estructural, enfocado en el costo de edificaciones educativas de concreto armado* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/12149>
- McCormac, J., & Nelson, E. (2006). *Análisis de estructuras: Métodos clásico y matricial*. Alfaomega.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Norma Técnica E.060: Concreto armado*. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/181044-2009-vivienda>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2016). *Norma Técnica E.030: Diseño sismorresistente*. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/69885-2016-vivienda>
- Morales, R. (2006). *Diseño en Concreto Armado*. Instituto de la Construcción y Gerencia. Lima, Perú.
- Muestra, J. K., & Referencia, L. M. (2021). *Avances y desafíos en algoritmos genéticos*. *Revista de Optimización y Computación Evolutiva*, 27(3), 120–135. <https://doi.org/10.1234/revoca.2021.27.3.120>
- Nocedal, J., & Wright, S. J. (2006). *Numerical optimization* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>

- Payá Zaforteza, I. (2007). *Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. Repositorio Institucional RiuNet. <https://riunet.upv.es/bitstream/10251/4161/1/tesisUPV2659.pdf>
- Queizan, A., & Sonzogni, V. (2006). *Algoritmos de Punto Interior Para Optimización Estructural Frente a Acciones Sísmicas*. Ed. Asociación Argentina de Mecánica Computacional.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Sánchez Maguiña, M. M., & Vidal Feliz, P. R. (2021). *Optimización de dimensiones de elementos estructurales mediante el uso de redes neuronales para la reducción de sobrecostos en edificios multifamiliares de 6 pisos ubicado en el distrito de Miraflores* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/655741>
- Sawyer, S. (2012). *Discrete mathematics and its applications* (7th ed.). Cengage Learning.
- Smith, A. E., & Hinchey, M. G. (2016). *Artificial intelligence: A systems approach*. Jones & Bartlett Learning.
- Srinivas, M., & Patnaik, L. M. (1994). *Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 24(4), 656–667. <https://doi.org/10.1109/21.286385>
- Ulusoy, S., Kayabekir, A., Bekdaş, G., & Nigdeli, S. (2018). *Optimum design of reinforced concrete multi-story multi-span frame structures under static loads*. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(5), 447–450. <https://doi.org/10.21817/ijet/2018/v10i5/181005078>
- Urgessa, G., Sheikholarefin, S., & Dehghan, S. (2018). *Optimization of reinforced concrete frames subjected to historical time-history loadings using DMPSO algorithm*. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(5), 2071–2084. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2036-9>
- Wang, H., & Wu, Z. (2017). *A modified random jumps optimization algorithm and its application in robot path planning*. In *Proceedings of the 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 1467–1472). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COASE.2017.8256274>

- Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (1997). *No free lunch theorems for optimization*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 67–82.
<https://doi.org/10.1109/4235.585893>
- Wu, H., & Bai, Z. (2010). *Random jumps optimization: A new metaheuristic algorithm for global optimization*. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 235(8), 2532–2542.
<https://doi.org/10.1016/j.cam.2010.01.034>
- Yepes Piqueras, V. (2002). *Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional RiuNet.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2664/tesisUPV1497.pdf>

Anexos

Anexo 1: Dimensiones de vigas y columnas optimizadas.....	116
---	-----

Anexo 1: Dimensiones de vigas y columnas optimizadas

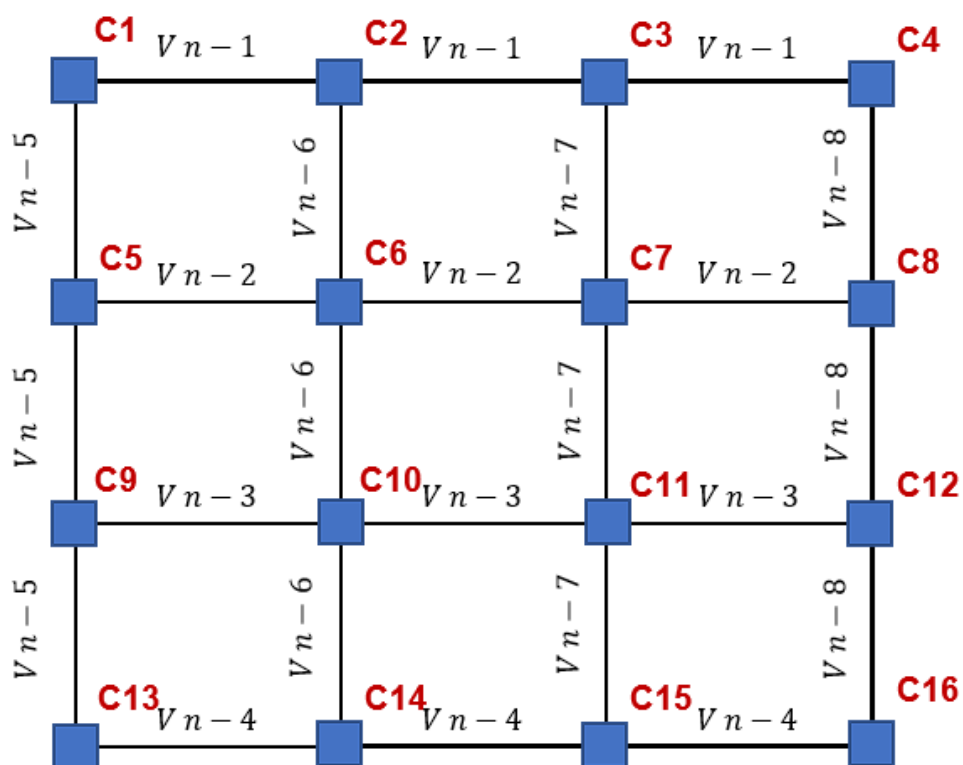


Figura N°1. 1: Vista en planta con las denominaciones de vigas y columnas.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 1: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 1.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 2: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 1.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 3: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 1.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 4: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 1.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 5: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 6: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 7: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 8: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 9: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6

C2 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 10: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C3 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 11: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C4 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 12: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55

C5 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 13: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 14: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 15: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 2	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 3	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C8 – 5	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 6	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 7	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 8	0.5	0.65	0.5	0.5

C8 – 9	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 10	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 11	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 12	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 14	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 15	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 16: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 17: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5

V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 18: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 19: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 20: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 21: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 22: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5

V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 23: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 24: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6

"OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN FUNCIÓN AL COSTO DE EDIFICACIONES REGULARES DE CONCRETO ARMADO DE MEDIANA ALTURA EN LA CIUDAD DE LIMA"

C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 25: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 3	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 26: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 3	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C3 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 27: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C4 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 3	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55

C4 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 28: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 3	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 29: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 3	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 30: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 3	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55

C7 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 31: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 2	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 3	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C8 – 5	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 6	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 7	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 8	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 9	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 10	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 11	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 12	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 14	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 15	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 32: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 2.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 33: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 34: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55

V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 35: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 36: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 37: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 38: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 39: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35

V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 40: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 41: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 42: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C3 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6

C3 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 43: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C4 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 44: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 45: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55

C6 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 46: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 47: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 2	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 3	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C8 – 5	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 6	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 7	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 8	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 9	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 10	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 11	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 12	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 14	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 15	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 48: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 3.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5

V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 49: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 50: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 51: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 52: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 53: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 54: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 55: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35

V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 56: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 57: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6

C2 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 58: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C3 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6

"OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN FUNCIÓN AL COSTO DE EDIFICACIONES REGULARES DE CONCRETO ARMADO DE MEDIANA ALTURA EN LA CIUDAD DE LIMA"

C3 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 59: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C4 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 60: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 61: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55

C6 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 62: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 63: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 2	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 3	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C8 – 5	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 6	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 7	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 8	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 9	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 10	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 11	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 12	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 14	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 15	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 64: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 4.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5

V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 65: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 66: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 67: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 68: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 5.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 69: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 5.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5

V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 70: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 71: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 72: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 73: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6

C2 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 74: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C3 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 75: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C4 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 76: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 5.
Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55

C5 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 77: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 78: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 79: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 2	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 3	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C8 – 5	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 6	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 7	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 8	0.5	0.65	0.5	0.5

C8 – 9	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 10	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 11	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 12	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 14	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 15	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 80: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 5.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 81: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5

V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 82: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 83: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 84: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 85: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 86: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5

V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 87: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 88: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL	COLUMNA FINAL
--	-----------------	---------------

	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 89: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6

C2 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 90: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C3 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 91: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)

"OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN FUNCIÓN AL COSTO DE EDIFICACIONES REGULARES DE CONCRETO ARMADO DE MEDIANA ALTURA EN LA CIUDAD DE LIMA"

C4 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 92: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55

"OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN FUNCIÓN AL COSTO DE EDIFICACIONES REGULARES DE CONCRETO ARMADO DE MEDIANA ALTURA EN LA CIUDAD DE LIMA"

C5 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 93: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 94: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 95: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 2	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 3	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C8 – 5	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 6	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 7	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 8	0.5	0.65	0.5	0.5

C8 – 9	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 10	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 11	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 12	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 14	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 15	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 96: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 6.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 97: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5

V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 98: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 99: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 100: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 101: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 7.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 102: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 7.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5

"OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN FUNCIÓN AL COSTO DE EDIFICACIONES REGULARES DE CONCRETO ARMADO DE MEDIANA ALTURA EN LA CIUDAD DE LIMA"

V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 103: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 104: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6

"OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN FUNCIÓN AL COSTO DE EDIFICACIONES REGULARES DE CONCRETO ARMADO DE MEDIANA ALTURA EN LA CIUDAD DE LIMA"

C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 105: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 106: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C3 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 107: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C4 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55

C4 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 108: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 7.
Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 109: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 7.
Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 110: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 7.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55

C7 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 111: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 7.
Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 2	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 3	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C8 – 5	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 6	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 7	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 8	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 9	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 10	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 11	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 12	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 14	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 15	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 112: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 7.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 113: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 1.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 114: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55

"OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN FUNCIÓN AL COSTO DE EDIFICACIONES REGULARES DE CONCRETO ARMADO DE MEDIANA ALTURA EN LA CIUDAD DE LIMA"

V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 115: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 116: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45

V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45
---------	-----	------	-----	------

Tabla N°1. 117: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 118: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 119: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)

V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 120: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 121: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C2 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C2 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C2 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C2 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C2 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 122: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C3 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6

C3 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C3 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C3 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C3 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C3 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C3 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C3 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 123: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 8.
Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C4 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C4 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C4 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C4 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C4 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C4 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 124: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 8.
Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C5 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C5 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C5 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C5 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C5 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 125: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55

C6 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C6 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C6 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C6 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C6 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C6 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 126: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 8.
Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 5	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 6	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 7	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 8	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 9	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 10	0.6	0.5	0.55	0.55
C7 – 11	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 12	0.5	0.65	0.55	0.55
C7 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C7 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C7 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C7 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 127: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 1.
Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 2	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 3	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 4	0.5	0.65	0.55	0.55
C8 – 5	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 6	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 7	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 8	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 9	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 10	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 11	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 12	0.5	0.65	0.5	0.5
C8 – 13	0.6	0.55	0.55	0.55
C8 – 14	0.6	0.5	0.5	0.5
C8 – 15	0.6	0.55	0.5	0.5
C8 – 16	0.5	0.65	0.55	0.55

Tabla N°1. 128: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 8.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5

V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5
---------	-----	------	-----	-----

Tabla N°1. 129: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 130: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.55
V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 131: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 132: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 9.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 133: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 9.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5

V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 134: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 135: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 136: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 137: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C2 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C2 – 4	0.65	0.5	0.6	0.6
C2 – 5	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 6	0.5	0.6	0.6	0.6
C2 – 7	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 8	0.65	0.5	0.6	0.6

C2 – 9	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 10	0.5	0.6	0.6	0.6
C2 – 11	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 12	0.65	0.5	0.6	0.6
C2 – 13	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C2 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C2 – 16	0.65	0.5	0.6	0.6

Tabla N°1. 138: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C3 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C3 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C3 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C3 – 5	0.55	0.6	0.6	0.6
C3 – 6	0.5	0.6	0.6	0.6
C3 – 7	0.55	0.6	0.6	0.6
C3 – 8	0.65	0.5	0.6	0.6
C3 – 9	0.55	0.6	0.6	0.6
C3 – 10	0.5	0.6	0.6	0.6
C3 – 11	0.55	0.6	0.6	0.6
C3 – 12	0.65	0.5	0.6	0.6
C3 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C3 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C3 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C3 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 139: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C4 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C4 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C4 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C4 – 5	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 6	0.5	0.6	0.55	0.55
C4 – 7	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 8	0.65	0.5	0.55	0.55
C4 – 9	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 10	0.5	0.6	0.55	0.55
C4 – 11	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 12	0.65	0.5	0.55	0.55
C4 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C4 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C4 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 140: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 9.
Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C5 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C5 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C5 – 5	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 6	0.5	0.6	0.55	0.55
C5 – 7	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 8	0.65	0.5	0.55	0.55
C5 – 9	0.55	0.6	0.55	0.55

C5 – 10	0.5	0.6	0.55	0.55
C5 – 11	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 12	0.65	0.5	0.55	0.55
C5 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C5 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C5 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 141: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C6 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C6 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C6 – 5	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 6	0.5	0.6	0.55	0.55
C6 – 7	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 8	0.65	0.5	0.55	0.55
C6 – 9	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 10	0.5	0.6	0.55	0.55
C6 – 11	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 12	0.65	0.5	0.55	0.55
C6 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C6 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C6 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 142: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C7 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C7 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C7 – 5	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 6	0.5	0.6	0.55	0.55
C7 – 7	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 8	0.65	0.5	0.55	0.55
C7 – 9	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 10	0.5	0.6	0.55	0.55
C7 – 11	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 12	0.65	0.5	0.55	0.55
C7 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C7 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C7 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 143: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 9.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C8 – 2	0.5	0.6	0.5	0.5
C8 – 3	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C8 – 5	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 6	0.5	0.6	0.5	0.5
C8 – 7	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 8	0.65	0.5	0.5	0.5

C8 – 9	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 10	0.5	0.6	0.5	0.5
C8 – 11	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 12	0.65	0.5	0.5	0.5
C8 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C8 – 14	0.5	0.6	0.5	0.5
C8 – 15	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 144: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 9.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 1 – 1	0.4	0.5	0.3	0.6
V 1 – 2	0.3	0.55	0.3	0.6
V 1 – 3	0.3	0.55	0.3	0.6
V 1 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 1 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 1 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 1 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 145: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 10.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 2 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 2	0.3	0.55	0.3	0.6
V 2 – 3	0.3	0.55	0.3	0.6
V 2 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 2 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 2 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5

V 2 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 2 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 146: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 3 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 2	0.3	0.55	0.3	0.6
V 3 – 3	0.3	0.55	0.3	0.6
V 3 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 3 – 5	0.4	0.45	0.3	0.5
V 3 – 6	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 7	0.3	0.6	0.3	0.5
V 3 – 8	0.4	0.45	0.3	0.5

Tabla N°1. 147: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 4 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 4 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 4 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 4 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 4 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 148: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 5 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 5 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 5 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 5 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 5 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 149: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 10.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 6 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 6 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5
V 6 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 6 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 6 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 150: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 10.
Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 7 – 1	0.4	0.5	0.3	0.5
V 7 – 2	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 3	0.3	0.55	0.3	0.5
V 7 – 4	0.4	0.5	0.3	0.5

"OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN FUNCIÓN AL COSTO DE EDIFICACIONES REGULARES DE CONCRETO ARMADO DE MEDIANA ALTURA EN LA CIUDAD DE LIMA"

V 7 – 5	0.4	0.45	0.3	0.45
V 7 – 6	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 7	0.3	0.6	0.3	0.45
V 7 – 8	0.4	0.45	0.3	0.45

Tabla N°1. 151: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	VIGA INICIAL		VIGA OPTIMIZADA	
	Base (m)	Peralte (m)	Base (m)	Peralte (m)
V 8 – 1	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 2	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 3	0.3	0.55	0.3	0.35
V 8 – 4	0.4	0.5	0.3	0.35
V 8 – 5	0.4	0.45	0.3	0.35
V 8 – 6	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 7	0.3	0.6	0.3	0.35
V 8 – 8	0.4	0.45	0.3	0.35

Tabla N°1. 152: Dimensiones de las vigas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C1 – 1	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 2	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 3	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 4	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 5	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 6	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 7	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 8	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 9	0.6	0.55	0.6	0.6

C1 – 10	0.6	0.5	0.6	0.6
C1 – 11	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 12	0.5	0.65	0.6	0.6
C1 – 13	0.6	0.55	0.6	0.6
C1 – 14	0.6	0.5	0.55	0.5
C1 – 15	0.6	0.55	0.55	0.5
C1 – 16	0.5	0.65	0.6	0.6

Tabla N°1. 153: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 1- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C2 – 1	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C2 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C2 – 4	0.65	0.5	0.6	0.6
C2 – 5	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 6	0.5	0.6	0.6	0.6
C2 – 7	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 8	0.65	0.5	0.6	0.6
C2 – 9	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 10	0.5	0.6	0.6	0.6
C2 – 11	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 12	0.65	0.5	0.6	0.6
C2 – 13	0.55	0.6	0.6	0.6
C2 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C2 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C2 – 16	0.65	0.5	0.6	0.6

Tabla N°1. 154: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 2- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C3 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C3 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C3 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C3 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C3 – 5	0.55	0.6	0.6	0.6
C3 – 6	0.5	0.6	0.6	0.6
C3 – 7	0.55	0.6	0.6	0.6
C3 – 8	0.65	0.5	0.6	0.6
C3 – 9	0.55	0.6	0.6	0.6
C3 – 10	0.5	0.6	0.6	0.6
C3 – 11	0.55	0.6	0.6	0.6
C3 – 12	0.65	0.5	0.6	0.6
C3 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C3 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C3 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C3 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 155: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 3- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C4 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C4 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C4 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C4 – 5	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 6	0.5	0.6	0.55	0.55
C4 – 7	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 8	0.65	0.5	0.55	0.55

C4 – 9	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 10	0.5	0.6	0.55	0.55
C4 – 11	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 12	0.65	0.5	0.55	0.55
C4 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C4 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C4 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C4 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 156: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 4- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C5 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C5 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C5 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C5 – 5	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 6	0.5	0.6	0.55	0.55
C5 – 7	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 8	0.65	0.5	0.55	0.55
C5 – 9	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 10	0.5	0.6	0.55	0.55
C5 – 11	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 12	0.65	0.5	0.55	0.55
C5 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C5 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C5 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C5 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 157: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 5- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C6 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C6 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C6 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C6 – 5	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 6	0.5	0.6	0.55	0.55
C6 – 7	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 8	0.65	0.5	0.55	0.55
C6 – 9	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 10	0.5	0.6	0.55	0.55
C6 – 11	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 12	0.65	0.5	0.55	0.55
C6 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C6 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C6 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C6 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 158: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 6- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C7 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 2	0.5	0.6	0.55	0.5
C7 – 3	0.55	0.6	0.55	0.5
C7 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C7 – 5	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 6	0.5	0.6	0.55	0.55
C7 – 7	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 8	0.65	0.5	0.55	0.55

C7 – 9	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 10	0.5	0.6	0.55	0.55
C7 – 11	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 12	0.65	0.5	0.55	0.55
C7 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C7 – 14	0.5	0.6	0.55	0.5
C7 – 15	0.55	0.6	0.55	0.5
C7 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 159: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 7- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.

	COLUMNA INICIAL		COLUMNA FINAL	
	Lado A (m)	Lado B (m)	Lado A (m)	Lado B (m)
C8 – 1	0.55	0.6	0.55	0.55
C8 – 2	0.5	0.6	0.5	0.5
C8 – 3	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 4	0.65	0.5	0.55	0.55
C8 – 5	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 6	0.5	0.6	0.5	0.5
C8 – 7	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 8	0.65	0.5	0.5	0.5
C8 – 9	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 10	0.5	0.6	0.5	0.5
C8 – 11	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 12	0.65	0.5	0.5	0.5
C8 – 13	0.55	0.6	0.55	0.55
C8 – 14	0.5	0.6	0.5	0.5
C8 – 15	0.55	0.6	0.5	0.5
C8 – 16	0.65	0.5	0.55	0.55

Tabla N°1. 160: Dimensiones de las columnas iniciales y las optimizadas- Piso 8- Ejecución 10.

Fuente: Elaboración propia.