

Optimización multi-objetivo de la excentricidad torsional y cantidad de material en edificación  
muro-pórtico

Ricardo Melgarejo Navas y Sergio Fonseca Duitama

Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero Civil

Director

David Sebastián Cotes Prieto

Ingeniero Civil, MSc

Codirector

Oscar Javier Begambre Carrillo

Ingeniero Civil, PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

*Dedicamos este trabajo a la divinidad que vela por nuestros anhelos, al protector supremo de nuestros sueños. A nuestras queridas familias, cuyos corazones nos han guiado en el laberinto del amor, impulsándonos hacia las cimas del triunfo. A los maestros, que con sus sabias enseñanzas han iluminado nuestro sendero, y a cada compañero, pues en su compañía hemos forjado recuerdos que serán pinceladas eternas en el lienzo de nuestras vidas.*

### **Agradecimientos**

Con gratitud sincera, elevamos nuestro reconocimiento a la divinidad por brindarnos salud y permitimos culminar con éxito la realización de uno de nuestros más preciados sueños.

A nuestros amados padres, les expresamos nuestro agradecimiento profundo por el apoyo incondicional que día a día nos brindaron, siendo el faro que iluminó el camino hacia la consecución de la meta tan anhelada.

A los distinguidos educadores de la Escuela de Ingeniería Civil, cuya sabiduría y dedicación han erigido en nosotros los cimientos necesarios para convertirnos en profesionales íntegros. En especial, extendemos nuestro reconocimiento al MSc David Sebastián Cotes Prieto y PhD Oscar Javier Begambre Carrillo, director y Co-director de proyecto, por confiar desde un principio en nuestro potencial y conocimiento.

Finalmente, dirigimos nuestro agradecimiento a todos aquellos compañeros y amigos que de una forma u otra, contribuyeron a enriquecer nuestras vidas durante este significativo proceso. Su apoyo y participación han dejado una huella imborrable en el tejido de nuestras experiencias.

**Tabla de contenido**

Introducción .....	10
1. Objetivos .....	15
1.1. Objetivo General .....	15
1.2. Objetivos Específicos .....	15
2. Metodología .....	16
2.1. Descripción de la estructura .....	16
2.2. Evaluación de cargas y análisis estructural .....	18
2.3. Diseño Estructural .....	19
2.4. Procedimiento de Optimización .....	20
3. Resultados .....	29
3.1. Diseño Convencional .....	29
3.2. Diseños optimizados .....	31
3.3. Discusión de resultados .....	36
4. Conclusiones .....	42
5. Recomendaciones .....	43
Referencias Bibliográficas .....	44
Apéndices .....	48

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> Parámetros función objetivo Caso 1 .....	33
<b>Tabla 2.</b> Parámetros función objetivo Caso 2 .....	34
<b>Tabla 3.</b> Parámetros función objetivo Caso 3 .....	36
<b>Tabla 4.</b> Secciones transversales de columnas y muros .....	38
<b>Tabla 5.</b> Secciones transversales de columnas y muros .....	39

### Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Planta tipo de todos los niveles estructurales. ....	17
<b>Figura 2.</b> Metodología del proceso de optimización. ....	22
<b>Figura 3.</b> Derivas de piso en dirección X-Y.....	29
<b>Figura 4.</b> Función Objetivo ( $\emptyset 1 = 0.5$ ; $\emptyset 2 = 0.5$ ).....	32
<b>Figura 5.</b> Función Objetivo ( $\emptyset 1 = 0.67$ ; $\emptyset 2 = 0.33$ ) .....	33
<b>Figura 6.</b> Función Objetivo ( $\emptyset 1 = 0.33$ ; $\emptyset 2 = 0.67$ ) .....	35

**Lista de Apéndices**

**Apéndice A.** Algoritmo de optimización.....48

## Resumen

**Título:** Optimización multi-objetivo de la excentricidad torsional y cantidad de material en edificación muro-pórtico.\*

**Autores:** Ricardo Melgarejo Navas y Sergio Fonseca Duitama.\*\*

**Palabras Clave:** Optimización, excentricidad torsional, edificio muro-pórtico, concreto reforzado.

**Descripción:** Esta investigación tiene como objetivo la optimización, de tipo minimización, de la excentricidad torsional y las cantidades de concreto y acero de un edificio muro-pórtico real de concreto reforzado integrando la interfaz de programación de aplicaciones (API) de un software de análisis y diseño estructural comercial, y un método de optimización heurístico conocido como optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés), por medio de Matlab<sup>®</sup>. Se realizaron 48 pruebas, variando el número de iteraciones máximas, número de partículas, sus velocidades y posiciones iniciales, obteniendo como resultados para un primer caso, la reducción de la relación entre la deriva máxima y deriva promedio de la edificación de un valor de 1.5 a 1.30, lo que representa el remplazo de irregularidad torsional extrema por irregularidad torsional y para un segundo caso, la minimización de las cantidades de acero y concreto un 7.10% y 10.52% respectivamente. En conclusión, la implementación del método de optimización por enjambre de partículas dentro del análisis y diseño estructural para estructuras con irregularidad torsional permite evaluar alternativas de solución de manera eficiente. Para futuros trabajos se recomienda estudiar la aplicación de este método, variando la ubicación de los elementos estructurales verticales de resistencia sísmica.

---

\* Optimización multi-objetivo de la excentricidad torsional y cantidad de material en edificación muro-pórtico.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Pregrado. Director: David Sebastián Cotes Prieto. Magister en Ingeniería Civil. Codirector: Oscar Javier Begambre Carrillo. Doctor en Ingeniería Civil.

**Abstract**

**Title:** Multi-objective optimization of torsional eccentricity and quantities of material in shear wall-frame building. \*

**Authors:** Ricardo Melgarejo Navas y Sergio Fonseca Duitama.\*\*

**Keywords:** Optimization; torsional eccentricity; shear wall-frame building; reinforced concrete.

**Description:** The objective of this research is to optimize the torsional eccentricity and quantities of concrete and steel of a real reinforced concrete shear wall-frame building by integrating the application programming interface (API) of a commercial structural analysis and design software, and a heuristic optimization method known as Particle swarm optimization (PSO) through Matlab<sup>®</sup>. There were 48 tests performed, varying the number of iterations, number of particles and their velocities and initial positions, resulting in the reduction of the ratio between the maximum drift and average drift of the building from a value of 1.5 to 1.30, which represents the replacement of extreme torsional irregularity with torsional irregularity and the minimization of the quantities of steel and concrete by 7.10% and 10.52% respectively. In conclusion, the implementation of optimization methods in the structural analysis and design for structures with torsional irregularity allows evaluating solution alternatives in an efficient manner. For future work, it is recommended to study the application of these methods varying the location of the vertical structural elements of seismic resistance.

---

\* Multi-objective optimization of torsional eccentricity and quantities of material in shear wall-frame building.

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering Director: David Sebastián Cotes Prieto. Civil Engineering Magister. Codirector: Oscar Javier Begambre Carrillo. Civil Engineering Doctor.

## Introducción

El diseño de estructuras de concreto reforzado es un proceso que consiste en definir el tipo de sistema estructural, dimensionar sus elementos y calcular el acero de refuerzo requerido, con el objetivo de resistir las solicitaciones y limitar los desplazamientos por acciones gravitacionales y acciones laterales como el sismo, con el fin de asegurar un correcto mecanismo de falla (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f).

Dentro de los sistemas estructurales de concreto reforzado para edificaciones de mediana y gran altura se encuentran los sistemas combinados muro-pórtico, en los cuales se utilizan muros a cortante y pórticos resistentes a momento para incrementar la resistencia y rigidez lateral de la estructura (Arvidsson, 1975). La importancia de garantizar suficiente rigidez lateral en estas estructuras se debe a la necesidad de controlar los desplazamientos laterales relativos entre pisos para limitar el daño de los elementos no estructurales. Dichos desplazamientos se obtienen por medio de un análisis de resistencia sísmica, que permite calcular las fuerzas sísmicas actuantes en cada nivel de la edificación.

Una vez calculadas las fuerzas sísmicas actuantes en la edificación, es necesario evaluar la capacidad de disipación de energía de la misma, con el objetivo de simular su comportamiento dentro del rango inelástico. Esta capacidad se cuantifica por medio de un coeficiente de capacidad de disipación de energía ( $R$ ), el cual depende del tipo de sistema estructural, el grado de capacidad de disipación de energía (el cual puede ser mínimo, moderado o especial, dependiendo de la zona

de amenaza sísmica) y las posibles irregularidades que presente la estructura (Chaparro et al., s/f) según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente o también conocido como la Normativa de Sismo Resistencia (NSR-10) (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f). Las fuerzas sísmicas de diseño son el resultado de la relación entre las fuerzas sísmicas actuantes y el coeficiente  $R$ .

Las irregularidades pueden ser clasificadas como irregularidades en planta, irregularidades en altura e irregularidad por ausencia de redundancia (Raju & Ravindra, 2021). Las irregularidades en altura se deben a la geometría asimétrica en el alzado de la edificación, las diferentes distribuciones de masa por nivel y la presencia de desplazamientos en el alineamiento de elementos verticales del sistema de resistencia sísmica (Nady et al., 2022). La irregularidad por ausencia de redundancia está relacionada con la correcta distribución de las cargas a las que se encuentra sometida la estructura, de manera que su resistencia no dependa totalmente de ciertos elementos, los cuales, al fallar, pueden causar el colapso de la edificación. Por último, las irregularidades en planta son aquellas que se originan a causa de geometrías asimétricas en planta, provocando que esta gire sobre su propio plano y genere efectos torsionales en los elementos estructurales (Chopra et al., s/f; Gokdemir et al., 2013; Maharjan et al., 2022; Rawat & Mishra, 2021). Para simular la existencia de dichos efectos y tener en cuenta que la estructura incursionará menos en el rango no-lineal al perder capacidad de disipación de energía, se utilizan los factores de reducción. Estos factores repercuten negativamente en el coeficiente  $R$ , disminuyendo su magnitud, lo cual representa en la estructura un aumento en sus cargas sísmicas de diseño, generando la necesidad

de aumentar las secciones transversales de los elementos estructurales que aportan rigidez al sistema y consecuentemente las cantidades del acero de refuerzo (Lagos et al., 2021).

A causa de lo anterior se han planteado, para modelos que emplean diafragmas rígidos, estrategias para mitigar la aparición de irregularidades torsionales, buscando acercar las coordenadas del centro de masa (CM) y centro de rigidez (CR) de la planta estructural. Una de estas es el redimensionamiento de columnas y muros a cortante. Maharjan y Shrestha (Maharjan et al., 2022) en 2022 evidenciaron como el redimensionamiento de columnas mediante un proceso iterativo, lograba disminuir la excentricidad entre CM y CR, sin embargo, la redimensión de aquellos elementos implicaba un proceso iterativo extenso que no evaluaba todas las posibles alternativas y no aseguraba un resultado óptimo. Por esta razón aplicar métodos de optimización puede ser una alternativa factible para resolver el problema.

La optimización es una selección sistemática de variables de entrada de un problema en el cual se busca obtener la mejor solución para las variables de salida (by Felix S Chan & Kumar Tiwari, s/f). Los métodos de optimización numéricos se clasifican en métodos de optimización clásicos y métodos de optimización heurísticos. En ingeniería estructural, los métodos de optimización heurísticos cuentan con mayor aplicación debido a que brindan solución a funciones no continuas y si estos cuentan con capacidades de exploración y explotación adecuadamente balanceadas, pueden llegar a soluciones globales, contrario a los métodos clásicos (Begambre, s/f).

Adicionalmente, los problemas de optimización pueden clasificarse según la restricción de sus variables, según la dimensionalidad de sus variables de entrada y según la dimensionalidad de sus variables de salida. Según las restricciones de sus variables existen métodos de optimización restringidos y sin restricciones (Moeini & Babaei, 2017), haciendo referencia a las funciones adicionales que deben cumplir las variables de entrada o salida, usualmente en forma de desigualdad. Según la dimensionalidad de las variables de entrada se pueden clasificar en unidimensional y multidimensional, haciendo referencia a el número de las variables que definirán a la función objetivo. Según la dimensionalidad de las variables de salida, se pueden clasificar en problemas de optimización de un objetivo y multiobjetivo, haciendo referencia al tipo de variables que se desean optimizar. La optimización multiobjetivo significa que se requieren compensaciones entre objetivos en conflicto.

Zhang y Mueller en 2017 (Zhang & Mueller, 2017), automatizando los procedimientos de diseño estructural a través de la implementación de un algoritmo de optimización para el diseño de muros a cortante lograron reducir las cuantías de refuerzo y volúmenes de concreto de una edificación. Así mismo Sánchez y Olivares (Sánchez-Olivares & Tomás, 2017) en 2016 demostraron que por medio de un algoritmo de optimización heurístico lograron obtener diseños detallados realistas, con ahorros en el refuerzo longitudinal de la edificación.

La optimización de materiales no solo constituye una práctica eficiente desde el punto de vista económico, sino que también desempeña un papel fundamental en la mitigación del impacto ambiental, por medio de la disminución de la huella de carbono.

Ante esto, surge la propuesta de implementar el método de optimización heurístico multiobjetivo por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés) (Begambre & Laier, 2009; by Felix S Chan & Kumar Tiwari, s/f; Correa et al., 2011), automatizando el diseño estructural de un edificio real con sistema muro-pórtico por medio del software de análisis y diseño estructural ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f) y un código de elaboración propio de Matlab® (*MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink*, s/f). Tomando como variables de entrada las dimensiones de las secciones transversales de las columnas y muros del sistema, y como variables de salida las cantidades de concreto y acero de la edificación y la excentricidad entre CM y CR. Las restricciones del proceso de optimización son la deriva máxima permitida en cada nivel de la edificación, las secciones transversales mínimas, criterios de detallado del refuerzo y resistencia requerida para elementos parte del sistema con un grado de Disipación Especial de Energía (DES) según la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f).

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Optimizar las cantidades de concreto y acero, y la excentricidad torsional de un edificio muro-pórtico real integrando un software de análisis y diseño estructural comercial, y un método heurístico.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Automatizar el diseño estructural del edificio vinculando un software comercial y un lenguaje de programación.

Programar el algoritmo de optimización vinculando los resultados del diseño estructural y un código en un lenguaje de programación.

## 2. Metodología

La metodología del trabajo de investigación se dividió en la descripción de la estructura real, la evaluación de cargas y análisis estructural, el diseño estructural y el procedimiento de optimización.

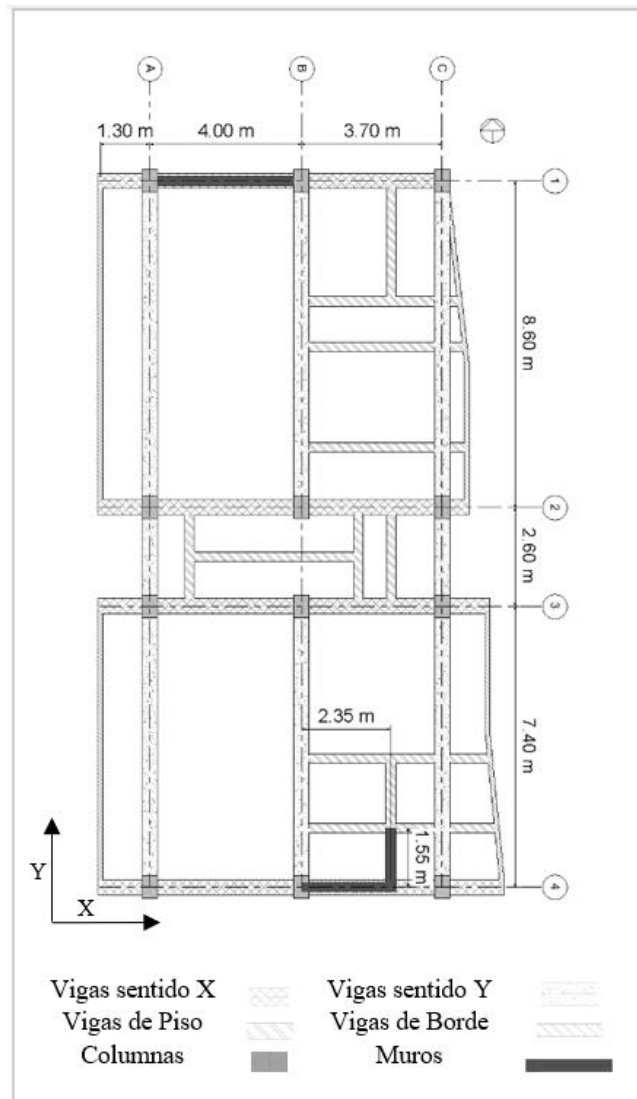
### 2.1. Descripción de la estructura

La estructura por diseñar es un edificio de cinco niveles con una altura de piso de 2.60 m, basado en los planos de un edificio real ubicado en la ciudad de Bucaramanga-Colombia, la cual pertenece a una zona de amenaza sísmica alta. El sistema estructural del edificio es combinado muro-pórtico y está construido sobre suelo de tipo C según la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f). La planta estructural de todos los niveles fue simplificada a una planta tipo, tal como se muestra en la Figura 1.

Las secciones transversales de los elementos de la Figura 1 son vigas principales en sentido X (400x550 mm), vigas principales en sentido Y (400x300 mm), vigas de piso (250x300 mm), vigas de borde (120x300 mm), columnas (400x600 mm), muro AB(4000x250 mm), muro BC'(2350x250 mm) y muro 34'(250x1550 mm).

**Figura 1.**

*Planta tipo de todos los niveles estructurales.*



Los materiales de la estructura son concreto con resistencia a la compresión de 21 MPa y módulo de elasticidad de 21538 MPa para las vigas, losas y columnas, concreto con resistencia a la compresión de 24.4 MPa y módulo de elasticidad de 23216 MPa para los muros estructurales, y acero de refuerzo con un esfuerzo de fluencia de 420 MPa y módulo de elasticidad de 200000 MPa.

## 2.2. Evaluación de cargas y análisis estructural

El análisis de cargas se llevó a cabo por medio del título B de la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, s/f*) para edificaciones de tipo residencial. La carga muerta sobrepuesta de entrepisos fue de  $4.6 \text{ kN/m}^2$ , la carga muerta sobrepuesta de cubierta de  $1.6 \text{ kN/m}^2$  y la carga viva de toda la edificación de  $1.8 \text{ kN/m}^2$ .

Para calcular las masas del acero y concreto se usó la tabla B.3.2-1 de la NSR-10, de la cual se tomaron las densidades de  $7800 \text{ kg/m}^3$  y  $2300 \text{ kg/m}^3$  para el acero y concreto respectivamente. La masa de la edificación se tomó como la carga muerta sobrepuesta más el peso propio de los elementos estructurales.

La edificación se asumió como empotrada en la base en cada uno de sus apoyos. Se asumió un diafragma rígido para todos los nodos de los niveles estructurales y se modelaron las vigas, columnas y muros estructurales como elementos de barra, estos últimos con el fin de disminuir el costo computacional y aprovechar el cálculo automático del refuerzo del programa.

El análisis sísmico se realizó por medio del método de Fuerza Horizontal Equivalente (FHE). La fuerza sísmica de diseño se calculó verificando la existencia de irregularidades según el artículo A.3.3.3 de la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, s/f*), por medio de la ecuación (1).

$$R = \phi_a \phi_p \phi_r R_o \quad (1)$$

Donde  $\phi_a$  corresponde a la irregularidad en altura,  $\phi_p$  a la irregularidad en planta,  $\phi_r$  a la irregularidad por ausencia de redundancia,  $R_o$  a el coeficiente base de capacidad de disipación de energía y  $R$  a el coeficiente de capacidad de disipación de energía. La verificación de irregularidades se realizó por medio de los valores de desplazamiento y fuerzas arrojados por el análisis estructural en ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f).

### 2.3. Diseño Estructural

El diseño estructural de la edificación se llevó a cabo por medio del método de factores de carga y resistencia, implementando las combinaciones del artículo C.9.2.1 de la NSR-10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, s/f).

Los criterios de diseño para las vigas fueron la resistencia a la flexión y la resistencia a cortante, incluyendo el diseño por capacidad para momentos probables, extraído del software ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f). Se verificaron los criterios para el detallado del refuerzo en zonas confinadas y no confinadas de los elementos con grado DES.

El diseño por flexión biaxial y carga axial de las columnas se basó en la relación demanda/capacidad, calculada a través de diagramas de interacción, empleando el software ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f). Se aplicaron cuantías de acero longitudinal entre el 1% y 4%. Se verificaron los criterios para el detallado del refuerzo en los

extremos y zona central de los elementos con grado DES. Además, se consideró el diseño por capacidad, asegurando la formación de mecanismos de deformación plástica controlada, en conformidad con el principio de viga débil-columna fuerte.

Para el diseño de los muros estructurales se consideró un refuerzo uniforme a lo largo de su longitud por medio del software ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f). Se establecieron como restricciones las cuantías mínimas de diseño de 0.25% y se verificaron las separaciones mínimas de acero horizontal para muros estructurales con grado DES de acuerdo con el artículo C.21.9.2.1 de la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f).

#### **2.4. Procedimiento de Optimización**

El proceso de optimización se realizó por medio de la programación manual del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés) (Kennedy et al., s/f) en Matlab® (*MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink*, s/f). La optimización se centró en la minimización de múltiples objetivos de manera simultánea, abordando con atención las restricciones en las variables. El algoritmo se muestra en la

Figura 2.

Las variables de entrada del método de optimización correspondientes a las posiciones son las dimensiones de las secciones transversales de 12 columnas y 3 muros estructurales, para un

total de 30 variables de entrada. Los valores permitidos para las dimensiones de la secciones transversales se restringieron de acuerdo con las secciones mínimas de columnas y muros con grado DES según la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f) y los valores máximos adoptados por criterios arquitectónicos según la Figura 1. Adicionalmente se restringieron los valores mínimos de las secciones de las columnas, de acuerdo con las secciones de las vigas principales.

Las Ecuaciones (2), (3), (4) y (5) muestran los límites superiores e inferiores (en mm) permitidos para las secciones transversales de muros y columnas. En estas ecuaciones la letra X y la letra Y hacen referencia a los sentidos cartesianos de los ejes globales ilustrados en la Figura 1.

$$400 \leq X_{\text{columnas}} \leq 850 ; 400 \leq Y_{\text{columnas}} \leq 850 \quad (2)$$

$$2500 \leq X_{\text{muroAB}} \leq 4000 ; 110 \leq Y_{\text{muroAB}} \leq 250 \quad (3)$$

$$2000 \leq X_{\text{muroBC}'} \leq 2350 ; 100 \leq Y_{\text{muroBC}'} \leq 250 \quad (4)$$

$$100 \leq X_{\text{muro34}'} \leq 250 ; 1200 \leq Y_{\text{muro34}'} \leq 1550 \quad (5)$$

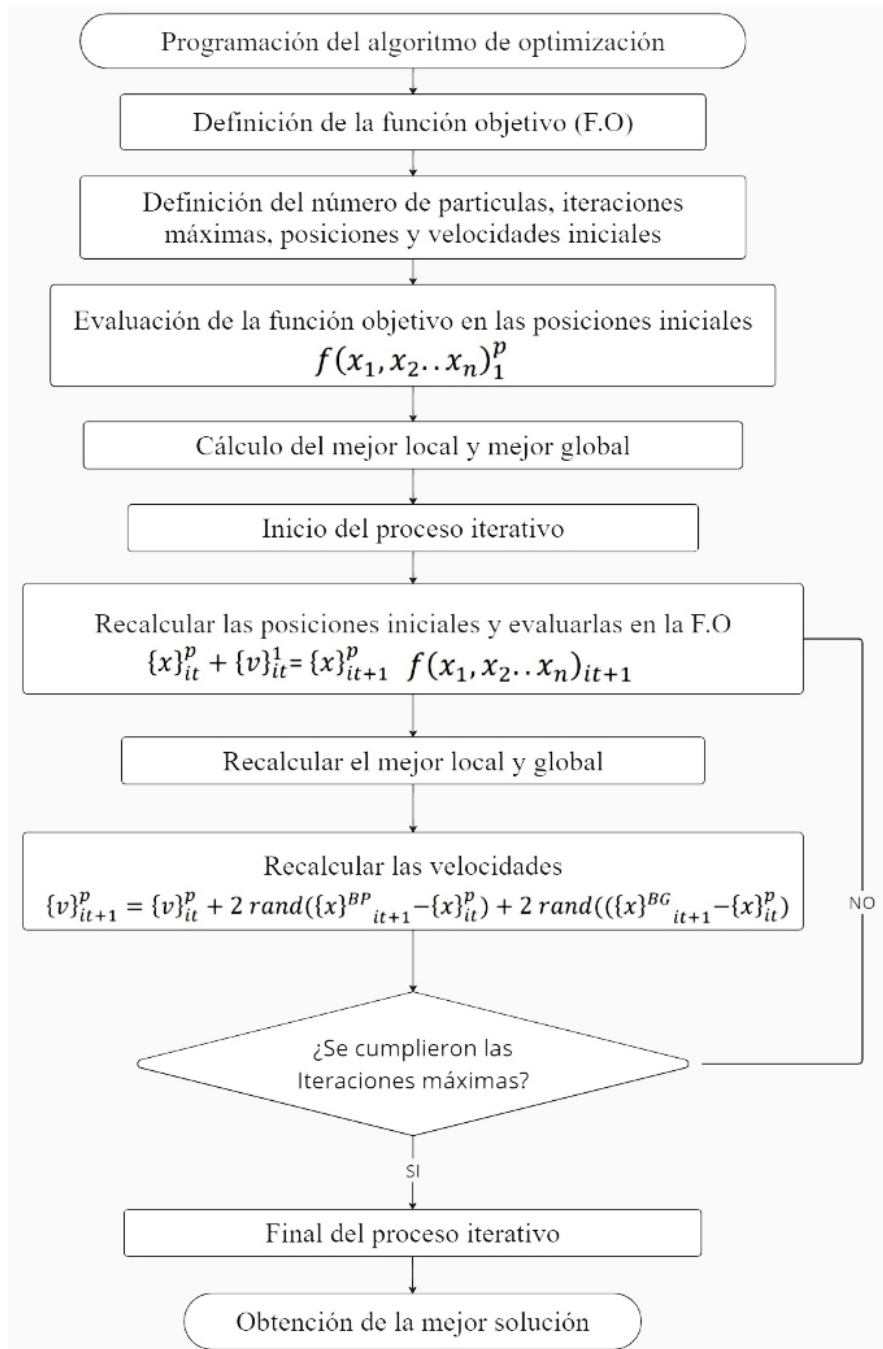
Las ecuaciones implementadas en el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés) (Kennedy et al., s/f) para calcular las posiciones y velocidades de las partículas se muestran en las ecuaciones (6) y (7) respectivamente.

$$\{x\}_{it+1}^p = \{x\}_{it}^p + \{v\}_{it}^1 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \{v\}_{it+1}^p &= \{v\}_{it}^p + 2\text{rand}(\{x\}_{it+1}^{\text{BP}} - \{x\}_{it}^p) \quad (7) \\ &+ 2\text{rand}(\{x\}_{it+1}^{\text{BG}} - \{x\}_{it}^p) \end{aligned}$$

**Figura 2.**

*Metodología del proceso de optimización.*



Donde  $\{x\}$  corresponde a las posiciones, en este caso los valores de las secciones transversales de los muros y columnas,  $\{v\}$  representa las velocidades de las partículas,  $\{x\}^{BP}$  representa las mejores posiciones de cada partícula y  $\{x\}^{BG}$  representa las mejores posiciones entre todas las partículas.

La ecuación (7) es la versión simplificada del algoritmo de optimización para ajustar las velocidades (Kennedy et al., s/f), en la cual el factor estocástico se multiplica por 2 para llegar al objetivo aproximadamente en la mitad del tiempo en que lo haría con un factor tradicional de 1.

La ecuación (8) representa la Función Objetivo (F.O). En esta ecuación, los coeficientes  $\phi$  denotan los factores de ponderación de objetivos, los coeficientes  $\beta$  representan los factores de normalización y los coeficientes  $\gamma$  se refieren a los factor de penalización de las restricciones. El error 1 hace referencia a la restricciones de la deriva y el error 2 representa la restricción del chequeo viga débil-columna fuerte.

$$\begin{aligned} f(x) = & \phi_1 \beta_1 (\text{Irregularidad Torsional}) \\ & + \phi_2 [\beta_2 (\text{Peso del acero}) + \beta_3 (\text{Peso del concreto})] \\ & + \gamma_1 (\text{error 1}) + \gamma_2 (\text{error 2}) \end{aligned} \quad (8)$$

El cálculo de la irregularidad torsional y la cantidad de concreto y refuerzo requerido para cumplir con las restricciones, se realizó vinculando la interfaz de programación de aplicaciones

(API, por sus siglas en inglés) del software ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f) con el lenguaje de programación propio de Matlab® (*MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink*, s/f).

Las ecuaciones de la interfaz de programación de aplicaciones de ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f) permitieron automatizar el proceso de análisis y diseño estructural, logrando extraer del programa los valores de las dimensiones de las secciones transversales de los muros estructurales y columnas, la deriva máxima de la edificación, la excentricidad entre CM y CR, el peso de concreto de la estructura y las cantidades de acero requerido para las vigas, columnas y muros estructurales.

Debido a que en la F.O se operan variables de salida con diferentes dimensiones, tales como la excentricidad entre CM y CR de la edificación y el peso de concreto y acero, fue necesario normalizarlas por medio del método de suma ponderada (Grodzevich & Romanko, s/f), presentado en la ecuación (9).

$$\beta_i = \frac{1}{f_i(x_0)} \quad (9)$$

$\beta_i$  representa el coeficiente de normalización y  $f_i(x_0)$  los valores iniciales de las variables de salida de la función objetivo. La excentricidad entre CM y CR se cuantificó por medio de la relación entre la deriva máxima y la deriva promedio de los dos extremos de la estructura con

respecto al mismo eje de referencia, según la tabla A.3.6 de la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f).

Debido a que el problema de optimización es multiobjetivo al haber dos variables de salida (peso de acero y concreto, e irregularidad torsional), fue necesario aplicar una técnica de ponderación de los múltiples objetivos, con el fin de convertir el problema de varios objetivos en un problema de un solo objetivo.

La ponderación de objetivos se realizó a través de métodos de escalarización (Gunantara, 2018), específicamente el método de ponderación de suma de rangos cuando  $\alpha = 0$  y el método de pesos de igual valor cuando  $\alpha = 1$ , en base a la ecuación (10). Ambos métodos se probaron, para comparar sus eficiencia en la obtención de resultados.

$$\phi_i = \frac{(1 - \alpha)2(n + 1 - i)}{n(n + 1)} + \frac{\alpha}{n} \quad (10)$$

Donde  $n$  representa el número de variables de salida y el factor  $i$  representa la  $i$ -ésima variable de salida.

Las restricciones en las dimensiones de las secciones transversales de los muros y columnas se vincularon de manera directa por medio de un condicional al recalcular las posiciones iniciales y evaluarlas en las función objetivo. Del mismo modo las restricciones de diseño, tales como las

cuantías máximas y mínimas de los elementos estructurales, se vincularon de manera directa al calcular las cantidades de acero.

La restricción de la deriva máxima ( $Der_{max}$ ) calculada por el análisis estructural, y el chequeo viga débil-columna fuerte, se realizó por medio del método de factores de penalización en la función objetivo. Para evitar sobredimensionamiento de los elementos se estableció un límite inferior de deriva permitido de 0.7%. Por otra parte, la máxima deriva permitida fue de 1% según la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f). En el chequeo viga débil-columna fuerte, se calcularon los momentos resistentes de las vigas y columnas de cada nudo de la edificación, excluyendo los nudos interiores del último nivel.

Las ecuaciones (11) y (12) muestran el cálculo del error 1.

$$Der_{max} > 1.0 \rightarrow error\ 1 = (Der_{max} - 1.0) \quad (11)$$

$$Der_{max} < 0.7 \rightarrow error\ 1 = (0.7 - Der_{max}) \quad (12)$$

Las ecuaciones (13) y (14) muestran el cálculo del error 2.

$$Cap_{Mom} = \text{momentos columnas} / \text{momentos vigas} \quad (13)$$

$$Cap_{Mom} < 1.2 \rightarrow error\ 2 = (1.2 - Cap_{Mom}) \quad (14)$$

El factor de penalización  $\gamma$  para el error 1 y error 2 se tomó como 10.0 para lograr que el resultado de la función objetivo aumentara significativamente en caso de incumplir la restricción. El valor de este factor fue determinado mediante un proceso iterativo utilizando valores aleatorios (Sepúlveda et al., s/f), y se optó por el valor de 10.0 debido a que este resultó en los menos valores de error.

Para calcular el peso de acero longitudinal de las vigas se usaron las áreas de acero requerido para momento positivo y negativo arrojadas en el proceso de diseño estructural en ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f). Estos resultados varían a lo largo de cada tramo de viga en diferentes puntos, por lo cual se implementó una metodología que divide cada tramo de la viga en tres partes iguales y calcula el máximo valor de área de acero para momento positivo y negativo de cada tramo. Se verificó que el resultado estuviera entre los límites de acero mínimo y máximo permitido por la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f). Para el cálculo de su acero transversal, se usaron las relaciones de acero y separación arrojadas por el programa y se compararon con las separaciones mínimas para zona confinada y no confinada de elementos a flexión con grado DES.

En el cálculo del peso de refuerzo de las columnas, se asumió una cantidad constante de acero longitudinal en toda su altura, verificando que el resultado arrojado por ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f) estuviera entre los límites de acero mínimo y máximo permitido por la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f).

Para el cálculo de su acero transversal, se aplicó la misma lógica utilizada en el diseño de las vigas, se usaron las relaciones de acero y separación arrojadas por el software y se compararon con las separaciones mínimas para zonas extremas y zona central de elementos sometidos a flexión y carga axial con grado DES.

En la implementación del API de ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f) enlazado con Matlab<sup>®</sup>, surgió la necesidad de modelar los muros como elementos de barra, pero con dimensiones propias de muros. Esto condujo a que los resultados proporcionados por ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f) para el cálculo del acero longitudinal reflejaran una cuantía mínima, establecida por el reglamento, del 1%. Por esta razón, se optó por asignar progresivamente refuerzo al muro, comenzando desde el mínimo establecido por el reglamento, del 0.25%, a través de la evaluación del índice demanda/capacidad de ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f) y evaluar si esta cantidad de acero era suficiente para resistir las fuerzas actuantes en los muros. Se realizó un proceso iterativo de ajuste, aumentando gradualmente la cuantía de acero, hasta encontrar una solución satisfactoria que asegurara la resistencia estructural de los muros. En cuanto al refuerzo longitudinal horizontal, se compararon los datos proporcionados por ETABS (*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*, s/f) con las separaciones mínimas para muros estructurales con grado DES.

Debido a la gran cantidad de líneas de código del algoritmo de optimización se organizaron las ecuaciones en el Apéndice A.

### 3. Resultados

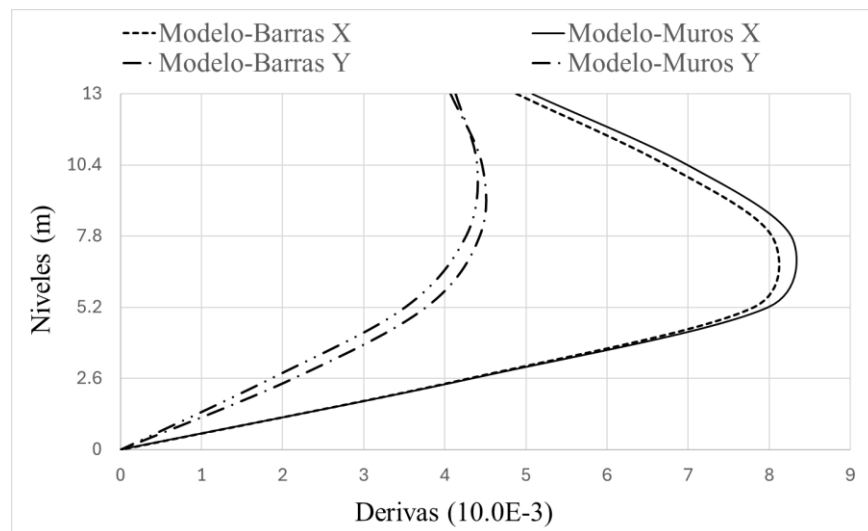
#### 3.1. Diseño Convencional

Con el fin de validar el modelo de la estructura usando barras en lugar de elementos de área para los muros, se compararon los resultados de las derivas de piso de cada modelo. En la Figura 3 se muestran las derivas de los dos modelos en dirección X y dirección Y.

La deriva máxima de la edificación fue 0.8% en la dirección X, lo cual cumple con el límite máximo permitido de 1% según la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, s/f*).

**Figura 3.**

Derivas de piso en dirección X-Y



La diferencia en los mayores desplazamientos relativos de piso entre ambos modelos fue de 2.8% en la dirección X y un 1.3% en la dirección Y, dando así validez al modelo que utiliza elementos de barra. Adicionalmente se encontró que el tiempo de cómputo empleado para el modelo de barras fue 50% más rápido que el modelo en el cual los muros fueron modelados con elementos de área.

La excentricidad entre CM y CR evaluada mediante la relación entre la deriva máxima y promedio de la estructura fue de 1.5, indicando la existencia de irregularidad torsional extrema ( $\phi_p = 0.8$ ). Se asignó un valor de  $R_0 = 7$  para edificaciones de concreto reforzado con sistemas estructurales combinados compuestos por muros y pórticos resistentes a momentos con grado DES. No se presentaron irregularidades en altura ( $\phi_a = 1$ ) ni por ausencia de redundancia ( $\phi_r = 1$ ). Reemplazando en la ecuación (1),  $R = 5.6$ .

El peso del concreto de la edificación aportado por las columnas y muros fue de 1424.1 kN , por otro lado, el peso del acero de refuerzo de los mismos elementos fue de 79.1 kN. Respecto al chequeo viga débil-columna fuerte se obtuvieron resultados favorables para todos los nudos, siendo el valor más cercano al límite de 1.26. Este valor corresponde al nudo A3 del tercer nivel en sentido X , tomando como referencia la Figura 1. En vista de que todos los nudos cumplen con el límite inferior de 1.20 establecido en el artículo C.21.6.2.2 de la NSR-10 (*Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, s/f), se asegura un correcto mecanismo de falla en el cual se permite la plastificación de las vigas y se evita en las columnas.

### 3.2. Diseños optimizados

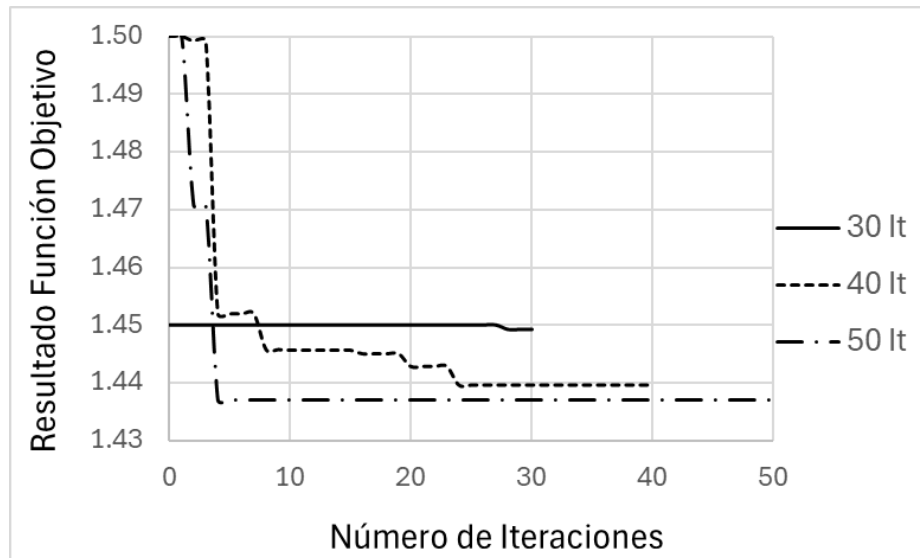
Inicialmente se realizaron 30 ejecuciones del algoritmo de minimización. Se evaluó la función objetivo para tres casos diferentes en la ponderación de objetivos, por medio de la Ecuación (10). En un primer caso se implementó el método de pesos de igual valor con  $\alpha = 1$  asignando el mismo valor en ambos objetivos ( $\phi_1 = 0.5; \phi_2 = 0.5$ ), para el segundo y tercer caso se implementó el método de ponderación de suma de rangos con  $\alpha = 0$ , asignando mayor importancia a la irregularidad torsional ( $\phi_1 = 0.67; \phi_2 = 0.33$ ), y asignando mayor importancia a la cantidad de material ( $\phi_1 = 0.33; \phi_2 = 0.67$ ).

Se cambió aleatoriamente el valor de las iteraciones máximas y número de partículas, con lo cual se logró determinar que para obtener una eficiencia entre el tiempo de ejecución y resultados obtenidos, el número de iteraciones debía ser mayor que el número de partículas.

La Figura 4 muestra los resultados de la función objetivo para tres casos diferentes respecto a número de iteraciones y partículas, en donde se le asigna la misma importancia a la irregularidad torsional y cantidad de material.

**Figura 4.**

Función Objetivo ( $\phi_1 = 0.5; \phi_2 = 0.5$ )



Los resultados de la función objetivo para el caso en que se asigna la misma importancia a la irregularidad torsional y cantidad de material evidencian una reducción en ambos objetivos. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos, junto con sus tiempos de ejecución, de irregularidad torsional, cantidades de acero y concreto de las columnas y muros en comparación a las cantidades iniciales de los mismos, en donde los valores negativos en los porcentajes representan una reducción y los positivos un aumento.

**Tabla 1.**

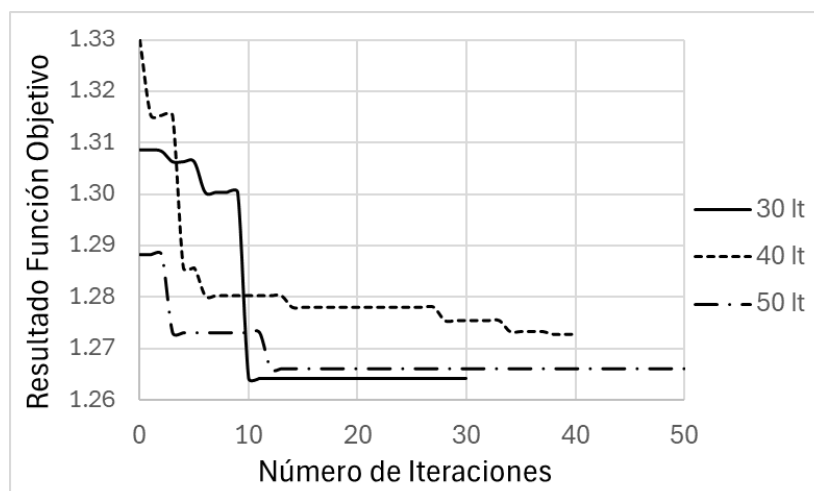
Parámetros función objetivo Caso 1

	<b>Irregularidad torsional</b>	<b>Cantidad acero [%]</b>	<b>Cantidad concreto [%]</b>
30 It - 10 part (2.8 h)	1.371	-3.46	-5.72
40 It -15 part (5.2 h)	1.373	-6.65	-9.31
50 It -20 part (10.3 h)	1.372	-6.78	-9.96

La Figura 5 muestra los resultados de la función objetivo para tres casos diferentes respecto a número de iteraciones y partículas, en donde se le asigna mayor importancia a la irregularidad torsional.

**Figura 5.**

Función Objetivo ( $\phi_1 = 0.67; \phi_2 = 0.33$ )



Los resultados de la función objetivo para el caso en que se asigna mayor importancia a la irregularidad torsional permitieron obtener menores valores de irregularidad torsional en comparación a los reportados en la Figura 4. Sin embargo las cantidades de acero y concreto de las columnas y los muros se vieron perjudicadas en algunos casos, aumentando su valor con respecto al inicial. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos, junto con sus tiempos de ejecución, de irregularidad torsional, cantidades de acero y concreto de las columnas y muros en comparación a las cantidades iniciales de los mismos, en donde los valores negativos en los porcentajes representan una reducción y los positivos un aumento.

**Tabla 2.**

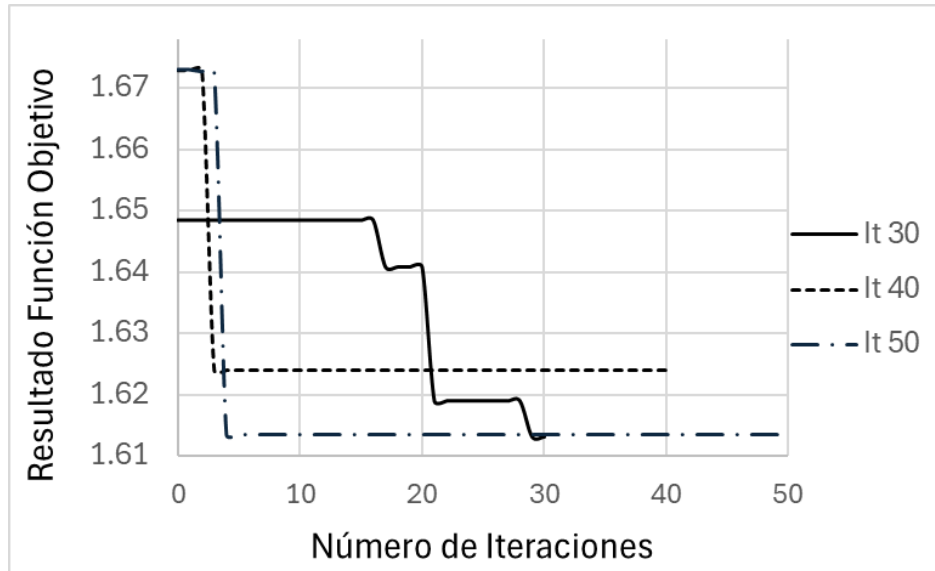
Parámetros función objetivo Caso 2

	<b>Irregularidad torsional</b>	<b>Cantidad acero [%]</b>	<b>Cantidad concreto [%]</b>
30 It - 10 part (2.5 h)	1.336	7.26	7.94
40 It -15 part (5.9 h)	1.358	-0.74	-2.44
50 It -20 part (9.0 h)	1.302	7.09	8.33

La Figura 6 muestra los resultados de la función objetivo para tres casos diferentes respecto a número de iteraciones y partículas, en donde se le asigna mayor importancia a la cantidad de material.

**Figura 6.**

Función Objetivo ( $\phi_1 = 0.33; \phi_2 = 0.67$ )



Los resultados de la función objetivo para el caso en que se asigna mayor importancia a la cantidad de material mostraron una mejoría en la disminución de las cantidades de acero y concreto de las columnas y los muros. Sin embargo la irregularidad torsional en algunos casos siguió siendo de tipo irregularidad torsional extrema. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos, junto con sus tiempos de ejecución, de irregularidad torsional, cantidades de acero y concreto de las columnas y muros en comparación a las cantidades iniciales de los mismos, en donde los valores negativos en los porcentajes representan una reducción y los positivos un aumento.

**Tabla 3.**

Parámetros función objetivo Caso 3

	Irregularidad	Cantidad	Cantidad
	torsional	acero [%]	concreto [%]
30 It - 10 part (4.0 h)	<b>1.374</b>	<b>-7.10</b>	<b>-10.52</b>
40 It -15 part (6.1 h)	<b>1.380</b>	<b>-5.10</b>	<b>-6.77</b>
50 It -20 part (8.1 h)	<b>1.374</b>	<b>-6.97</b>	<b>-10.39</b>

### 3.3. Discusión de resultados

Una vez obtenidos los resultados de todas las ejecuciones, para cada uno de los tres casos de función objetivo, se analizaron las magnitudes de los objetivos en estudio. Se encontró que los valores de la relación entre la deriva máxima y promedio de la estructura fueron similares en todas las ejecuciones, obteniendo una relación promedio de 1.37. Por otro lado, las cantidades de material (acero y concreto) de las columnas y los muros variaron significativamente en cada uno de los casos.

La mejor solución respecto a la disminución de material se encontró en las ejecuciones de la función objetivo mostradas en la Tabla 3 , con una configuración inicial de 30 iteraciones y 10 partículas, logrando reducir la relación entre deriva máxima y deriva promedio respecto al modelo inicial, de 1.5 a 1.374. Debido a los cambios en las secciones transversales de las columnas y los muros, como se muestra en la

Tabla 4, las cantidades de acero y concreto de las columnas aumentaron en 3.99% y 1.36% respectivamente, mientras que las cantidades de acero y concreto de muros disminuyeron en 23.54 % y 27.85%. En términos globales (columnas y muros) se presentó una reducción en las cantidades de acero y concreto en un 7.10% y 10.52% respectivamente, con base a los valores iniciales de columnas y muros.

A continuación, se presentan los resultados de las variables de entrada, en este caso las secciones transversales de las columnas y muros, correspondientes a la mejor solución, respecto a la disminución de material, y su respectiva comparación con las secciones del modelo convencional.

**Tabla 4.**

Secciones transversales de columnas y muros

<b>Elemento</b>	<b>Secciones</b>	
	<b>Iniciales [mm]</b>	<b>Optimizadas[mm]</b>
<b>Col A1</b>	400 x 600	400x610
<b>Col A2</b>	400 x 600	400x601
<b>Col A3</b>	400 x 600	400x606
<b>Col A4</b>	400 x 600	400x610
<b>Col B1</b>	400 x 600	400x606
<b>Col B2</b>	400 x 600	406x610
<b>Col B3</b>	400 x 600	400x601
<b>Col B4</b>	400 x 600	400x610
<b>Col C1</b>	400 x 600	400x597
<b>Col C2</b>	400 x 600	400x604
<b>Col C3</b>	400 x 600	400x607
<b>Col C4</b>	400 x 600	400x610
<b>Muro AB</b>	4000 x 250	2500x250
<b>Muro BC</b>	2350 x 250	2000x250
<b>Muro 34</b>	250 x 1550	250x1200

Los resultados obtenidos para la mejor solución respecto a la disminución de material coinciden con la investigación realizada por Sánchez y Olivares (Sánchez-Olivares & Tomás, 2017) en 2016, en donde por medio del algoritmo de optimización metaheurístico luciérnaga (firefly algorithm en inglés) lograron obtener las secciones transversales óptimas de los elementos estructurales que permitieron ahorros en las cantidades de concreto y acero de refuerzo.

Por otro lado, el mejor resultado respecto a la disminución en la irregularidad torsional se encontró en las ejecuciones de la función objetivo mostradas en la Tabla 2, con una configuración inicial de 50 iteraciones y 20 partículas, logrando reducir la relación entre deriva máxima y deriva promedio respecto al modelo inicial, de 1.50 a 1.30. Debido a los cambios en las secciones transversales de las columnas y los muros, como se muestra en la .

**Tabla 5**, las cantidades de acero y concreto de las columnas aumentaron en 28.46% y 33.13% respectivamente, mientras que las cantidades de acero y concreto de muros disminuyeron en 24.59 % y 27.85%. En términos globales (columnas y muros) se presentó un aumento en las cantidades de acero y concreto en un 7.09% y 8.33% respectivamente, con base a los valores iniciales de columnas y muros. A continuación, se presentan los resultados de las variables de entrada, en este caso las secciones transversales de las columnas y muros, correspondientes a la mejor solución, respecto a la disminución en la irregularidad torsional, y su respectiva comparación con las secciones del modelo convencional.

**Tabla 5.**

Secciones transversales de columnas y muros

<b>Elemento</b>	<b>Secciones</b>	
	<b>Iniciales [mm]</b>	<b>Optimizadas[mm]</b>
<b>Col A1</b>	400 x 600	477x400
<b>Col A2</b>	400 x 600	651x554
<b>Col A3</b>	400 x 600	555x560
<b>Col A4</b>	400 x 600	587x641
<b>Col B1</b>	400 x 600	603x484
<b>Col B2</b>	400 x 600	412x549
<b>Col B3</b>	400 x 600	602x624
<b>Col B4</b>	400 x 600	721x680
<b>Col C1</b>	400 x 600	603x543
<b>Col C2</b>	400 x 600	492x562
<b>Col C3</b>	400 x 600	618x553
<b>Col C4</b>	400 x 600	476x546
<b>Muro AB</b>	4000 x 250	2500x250
<b>Muro BC</b>	2350 x 250	2000x250
<b>Muro 34</b>	250 x 1550	250x1200

Los resultados obtenidos para la mejor solución respecto a la disminución en la irregularidad torsional coinciden con los reportados por Maharjan y Shrestha (Maharjan et al., 2022) en 2022. Validando la efectividad del redimensionamiento de columnas y muros a cortante en edificaciones con irregularidad torsional para disminuir las excentricidad entre el CM y CR.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se minimizó, por medio del algoritmo de optimización por enjambre de partículas, la excentricidad torsional y las cantidades de material de una edificación con sistema muro-pórtico de concreto reforzado en zona de amenaza sísmica alta, automatizando el diseño estructural del edificio vinculando el software de análisis y diseño estructural, ETABS, y un código de programación en Matlab®. A partir de los resultados se concluye que:

En vista de que el mejor resultado del algoritmo de optimización respecto a la irregularidad torsional obtuvo una relación entre deriva máxima y deriva promedio de 1.30, logrando disminuir la irregularidad torsional extrema ( $\phi_p = 0.8$ ) a irregularidad torsional ( $\phi_p = 0.9$ ), más no eliminándola por completo ( $\phi_p = 1$ ), redimensionando las secciones transversales de columnas y muros, sin cambiar su ubicación en planta. Se logra determinar que dicho fenómeno se encuentra condicionado en gran medida con la distribución en planta de los elementos verticales de resistencia sísmica.

La minimización de la excentricidad entre el centro de masa y centro de rigidez en una estructura es un objetivo clave en el diseño estructural. Sin embargo, ajustar las dimensiones de los elementos para lograr esto no siempre conlleva una disminución directa del material utilizado. El resultado que arrojó la menor excentricidad torsional representó un aumento de 7.09% en las cantidades de acero y 8.33% en las cantidades de concreto de las columnas y muros con respecto a las cantidades iniciales de los mismos elementos.

## **5. Recomendaciones**

Para futuros trabajos se recomienda estudiar la aplicación de este método, variando la ubicación de los elementos estructurales verticales de resistencia sísmica.

### Referencias Bibliográficas

- Arvidsson, K. (1975). Non-uniform shear wall-frame systems with elastic foundations. En *Proc. Insrn Civ. Engrs, Part (Vol. 2)*.
- Begambre, O. (s/f). *Performance Assessment Of Modern Heuristic Algorithms Used In Structural Optimization*. [www.proceedings.blucher.com.br/evento/10wccm](http://www.proceedings.blucher.com.br/evento/10wccm)
- Begambre, O., & Laier, J. E. (2009). A hybrid Particle Swarm Optimization - Simplex algorithm (PSOS) for structural damage identification. *Advances in Engineering Software*, 40(9), 883–891. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.01.004>
- by Felix S Chan, E. T., & Kumar Tiwari, M. (s/f). *Swarm Intelligence, Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*.
- Chaparro, A. C., Suárez, A., Benjumea, J., Villalba-Morales, J. D., Chaparro, A. C. ;, Suárez, A. ;, Benjumea, J. ;, & Villalba-Morales, J. D. (s/f). Desempeño Sísmico y Cantidades de Obra de Edificaciones Aporticadas de Concreto Reforzado Diseñadas para Diferentes Capacidades de Disipación de Energía. *Revista EIA*, 18(35), 1–16. <https://doi.org/10.24050/reia>
- Chopra, A. K., Goel, R. K., & Member, A. (s/f). *Evaluation Of Torsional Provisions In Seismic Codes*.
- Correa, R., Begambre, O., & Carrillo, J. C. (2011). Validación De Un Algoritmo Híbrido Del Pso Con El Método Simplex Y De Topología De Evolución Paramétrica Validation Of A Pso-Simplex Hybrid Algorithm Of Parametric Evolution Topology. En *Año (Vol. 78)*.

*ETABS | BUILDING ANALYSIS AND DESIGN*. (s/f). Recuperado el 29 de febrero de 2024, de

<https://www.csiamerica.com/products/etabs>

Gokdemir, H., Ozbasaran, H., Dogan, M., Unluoglu, E., & Albayrak, U. (2013). Effects of torsional irregularity to structures during earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, 35, 713–717. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.06.028>

Grodzevich, O., & Romanko, O. (s/f). *Normalization and Other Topics in MultiObjective Optimization*. Fabien.

Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1502242>

Kennedy, J., Eberhart, R., & gov, bls. (s/f). *Particle Swarm Optimization*.

Lagos, W. A., Blas, O. E., & Orihuela, J. (2021). Analysis of Soft Story and Torsional Irregularity Factors in the Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings by Nonlinear Static Analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 814(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/814/1/012011>

Maharjan, R., Shrestha, R., Gurung, S., & Bhochhibhoya, S. (2022). Resizing columns in typical eccentric and torsionally irregular multi-storied buildings. *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(6), 943–959. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00468-2>

*MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink*. (s/f). Recuperado el 10 de diciembre de 2022, de <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

- Moeini, R., & Babaei, M. (2017). Constrained improved particle swarm optimization algorithm for optimal operation of large scale reservoir: proposing three approaches. *Evolving Systems*, 8(4), 287–301. <https://doi.org/10.1007/s12530-017-9192-x>
- Nady, O., Mahfouz, S. Y., & Taher, S. E. D. F. (2022). Quantification of Vertical Irregularities for Earthquake Resistant Reinforced Concrete Buildings. *Buildings*, 12(8).  
<https://doi.org/10.3390/buildings12081160>
- Raju, P. K., & Ravindra, V. (2021). Verification of irregularities in a reinforced concrete tall structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1025(1).  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1025/1/012028>
- Rawat, D., & Mishra, N. B. (2021). Seismic Torsion Behaviour and Rigidity Analysis of Multistory Plan Asymmetric RC Building. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 143 LNCE, 501–518. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6\\_43](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6_43)
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. (s/f). Recuperado el 21 de enero de 2023, de <https://es.slideshare.net/alarconbermudez/nsr-10-15535587>
- Sánchez-Olivares, G., & Tomás, A. (2017). Improvements in meta-heuristic algorithms for minimum cost design of reinforced concrete rectangular sections under compression and biaxial bending. En *Engineering Structures* (Vol. 130, pp. 162–179). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.010>
- Sepúlveda, L. N., Carvajal Oyaga, L., Prieto, D. C., Cotes Prieto, C., & Begambre, O. (s/f). Automated Seismic Design of Planar Frames Blending Structural Reliability and Heuristic Optimization. En *Jordan Journal of Civil Engineering* (Vol. 16, Número 4).

Zhang, Y., & Mueller, C. (2017). Shear wall layout optimization for conceptual design of tall buildings. *Engineering Structures*, *140*, 225–240.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.059>

## Apéndices

### Apéndice A. Algoritmo de optimización.

<https://drive.google.com/file/d/1hM7oMhf567MZ2YfptXrBM5PBNf0a0KnE/view?usp=sharing>