



**UNIVERSIDAD MAYOR REAL Y PONTIFICIA DE
SAN FRANCISCO XAVIER
DE CHUQUISACA**

**OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE CERCHAS 2D
DE CUBIERTAS A DOS AGUAS CON PERFILES
CONFORMADOS EN FRÍO MEDIANTE EL
ALGORITMO GENÉTICO “MARVALL” EN SUCRE**

Ing. Luis Ariel Marca Matías

Tutor:

René Alberto Dávila Pórcel
Ph.D. M.Sc. Civ. Engineer

Maestría en Ingeniería Estructural

2026

Declaración de originalidad y derechos de autor

Como autor declaro que el presente trabajo académico es original, excepto donde he reconocido la información generada por otros autores por medio de citaciones en el estilo requerido.

En caso de existir información confidencial (*e.g.*, información proveniente de reportes gubernamentales, institucionales, privados o similares, personas naturales, *etc.*), manifiesto que he obtenido el permiso por escrito para incluir esa información en este trabajo académico.

Autorizo a las instancias competentes de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX) someter este trabajo académico a una evaluación de integridad académica por medio de una herramienta establecida para este propósito.

Autorizo a la USFX hacer de este trabajo académico un documento disponible para su lectura en el repositorio institucional.

Finalmente, manifiesto mi consentimiento para que este trabajo académico pueda ser publicado, total o parcialmente, respetando la propiedad intelectual del autor.

Luis Ariel Marca Matias

Enero de 2026

Dedicatoria

A Dios, fuente de luz, guía espiritual y fortaleza, por ayudarme en mi crecimiento intelectual y moral; dedico este trabajo a Él con profundo agradecimiento en mi vida.

A mis padres, Samuel (+) y Patricia, cuyo amor incondicional, apoyo constante y sacrificios invaluable hicieron posible mi formación académica.

A mi familia, mis hermanos Ruty, Rolando y Jhonny, por su ayuda, cariño y respaldo incondicional, y a mi cuñada María Luisa (+), cuya comprensión, aliento y motivación.

A mis amigos, en especial a la Lic. Mishel Vallejos C., Ing. César G. Molina. Ing Walter Rojas C. y el Ing. Rodrigo Villca A., por su compañía en los momentos de estudio....

Agradecimientos

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por darme la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia necesaria para poder culminar con éxito este proyecto de investigación, en este proceso académico y personal.

A mi tutor, por su orientación oportuna, apoyo constante y disposición para poder resolver mis dudas durante la elaboración de este trabajo de investigación.

A mis profesores, quienes con vocación y compromiso contribuyeron en formación profesional, quienes me enseñaron no solo conocimientos, sino también nuevas ideas y enfoques en la ingeniería.

A mis compañeros, por su ayuda y colaboración, siendo importante para poder superar esta etapa académica y poder concluir este objetivo propuesto.

Finalmente, a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, por él por el apoyo institucional brindado y para la realización de esta investigación.

Sin su colaboración, este trabajo no hubiera sido logrado satisfactoriamente.

*Estas cosas os he hablado para que en
mí tengáis paz. En el mundo tendréis
aflicción; pero confiad, yo he vencido
al mundo. (Juan 16:33)*

Contenido

	Página
Declaración de originalidad y derechos de autor	III
Dedicatoria.....	V
Agradecimientos.....	VII
Contenido.....	IX
Lista de figuras.....	XIV
Lista de tablas.....	XVIII
Lista de abreviaturas y símbolos	XXI
Resumen.....	XXIII
Abstract.....	XXIV
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Problema de investigación	2
1.3. Justificación	2
1.4. Pregunta de investigación	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo general.....	4
1.5.2. Objetivos específicos	4
1.6. Hipótesis o idea a defender	4
1.6.1. Hipótesis de investigación (Hi).....	4
1.6.2. Hipótesis nula (Ho).....	5
1.7. Contribución al estado del conocimiento.....	5
1.8. Organización de la tesis o trabajo de grado	5
2. Marco teórico.....	7

2.1. Marco conceptual.....	7
2.1.1. Optimización estructural.....	7
2.1.2. Perfiles conformados en frío.....	9
2.1.3. Algoritmos genéticos	10
2.1.4. Normativas y códigos de diseño	12
2.2. Marco contextual	13
2.2.1. Ubicación geográfica y condiciones climáticas de Sucre	13
▪ Factores ambientales que afectan el diseño estructural.....	14
2.2.2. Industria de la construcción metálica en Bolivia	17
2.2.3. Relevancia del estudio	18
▪ Optimización estructural en la ciudad de Sucre	18
▪ Impacto económico y ambiental	19
2.3. Marco teórico	20
2.3.1. Optimización estructural: Técnicas y avances.....	20
2.3.2. Bases teóricas de la optimización estructural	23
2.3.3. Algoritmos genéticos en ingeniería estructural.....	25
▪ La inteligencia computacional en ingeniería.....	26
▪ Elitismo	30
2.3.4. Normativas y reglamentos en diseño de cerchas metálicas	30
3. Metodología	33
3.1. Tipo y enfoque de investigación	33
3.1.1. Tipo de investigación	33
3.1.2. Enfoque metodológico.....	34
3.1.3. Alcance y nivel de investigación	34
3.2. Materiales y recursos utilizados.....	35
3.2.1. Materiales de gabinete	35
3.2.2. Recursos computacionales.....	35
3.2.3. Datos estructurales.....	36
3.3. Métodos y técnicas de investigación.....	37
3.3.1. Optimización mediante algoritmos genéticos.....	38
▪ ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS.....	38

▪ Pruebas con casos extremos de Elitismo.....	39
▪ Pruebas con casos extremos de probabilidad de cruce.....	40
▪ Pruebas con casos extremos de probabilidad de mutación	40
3.3.2. Simulación estructural computacional.....	43
3.4. Operacionalización de variables	44
3.4.1. Variables independientes y dependientes.....	44
3.4.2. Definición conceptual y operativa	44
3.4.3. Criterios de evaluación estructural y de optimización.....	45
3.5. Población y muestra.....	46
3.5.1. Población: estructuras metálicas utilizadas en cubiertas	46
3.5.2. Delimitación geográfica: ciudad de Sucre	46
3.5.3. Casos de estudio seleccionados	47
3.6. Muestreo y diseño experimental	49
3.6.1. Tipo de muestreo.....	49
3.6.2. Tamaño y justificación de la muestra.....	50
3.6.3. Diseño del experimento computacional.....	50
3.7. Limitaciones del modelo estructural.....	53
3.8. Diseño de instrumentos de recolección.....	53
3.9. Procedimiento para la recolección y el proceso de datos	54
3.10. Estructura de datos de entrada	55
3.11. Validación de resultados.....	56
3.11.1. Validación mediante comparación de resultado.....	57
4. Análisis de resultados.....	59
4.1. Propuesta de la optimización estructural	59
4.1.1. Justificación técnica y pertinencia del enfoque computacional.....	60
4.1.2. Formulación matemática del modelo y condiciones de contorno.....	61
4.2. Implementación computacional del modelo	62
4.2.1. Caracterización del modelo estructural de referencia.....	62
4.2.2. Desarrollo del algoritmo genético.....	63
4.2.3. Codificación y simulación computacional.....	65
4.3. Análisis de Resultados y Evaluación del Desempeño.....	66

4.3.1. Comparación entre diseño convencional y diseño optimizado.....	66
▪ Análisis de la sensibilidad de la estructura.....	71
4.3.2. Optimización del diseño estructural	72
4.3.3. Cumplimiento de normas integral.....	73
4.3.4. Desarrollo de librería de perfiles comerciales	73
4.3.5. Limitaciones de la metodología desarrollada	74
5. Discusión de resultados.....	75
5.1. Contribución de la investigación	75
5.2. Metodología de optimización: calibración y eficiencia	75
5.3. Resultados de la optimización: reducción de peso y diseño	78
5.4. Verificación de la normativa de las soluciones optimizadas.....	79
5.5. Cumplimiento normativo y consideraciones de diseño	81
5.6. Futuras líneas de investigación	81
Conclusiones y recomendaciones.....	83
Conclusiones.....	83
Recomendaciones	84
Referencias bibliográficas	85
A. Determinación de las propiedades geométricas	1
A.1. Perfil costanero “C”	1
A.2. Perfil costanero “2C” o cajón.....	4
A.3. Perfil costanero “2C+plancha	5
B. Determinación de las cargas.....	1
B.1. Cargas por el peso propio “P _P ”.....	1
B.2. Carga muerta “C _M ”.....	1
B.3. Carga viva de mantenimiento “C _{VM} ”	1
B.4. Carga de nieve “C _N ”.....	2
B.4.1. Carga de nieve en el suelo “P _g ”	2
B.4.2. Carga de nieve en techos planos “P _f ”.....	2
B.4.3. Carga de nieve en techos inclinados “P _s ”	3
B.5. Carga de granizo.....	4
B.6. Carga de viento.....	5

B.6.1. Cálculo de la presión dinámica “ q_z ”	5
B.6.2. Cálculo de presión de diseño del viento “ p ”	7
C. Archivo de datos	1
C.1. Restricciones	1
C.2. Estructura	2
C.3. Librería de perfiles	3
C.4. Cargas	4
C.5. Combinaciones de carga	5
C.6. Combinaciones de carga de servicio	5
C.7. Eje local 2	5
C.8. Eje local 3	6
C.9. Límites de desplazamiento	7
C.10. Datos del algoritmo genético	8
D. Código del programa MATLAB	1
D.1. Módulo de “ANÁLISIS_ESTRUCTURAL.m”	1
D.2. Módulo de “DISEÑO_ESTRUCTURAL.m”	3
D.3. Código principal “ALGEN.m”	7
E. Diagrama de flujo	1
E.1. Diagrama de flujo “ANÁLISIS_ESTRUCTURAL.m”	1
E.2. Diagrama de flujo “DISEÑO_ESTRUCTURAL.m”	2
E.3. Diagrama de flujo “ALGEN.m”	2
F. Propiedades y características de los materiales	1
F.1. Clasificación de perfiles conformados en frío	1
F.2. Propiedades mecánicas de los perfiles conformado en frío	2
F.3. Ventajas y limitaciones de los perfiles CFS	2
F.4. Normas nacionales e internacionales de diseño	3

Lista de figuras

	Página
Figura 2.1. Número de artículos seleccionados publicados en las revistas principales (Mei y Wang 2021).	8
Figura 2.2. Resultados para la flexión, corte y deformación en secciones de perfiles (Gatheeshgar et al. 2020).	10
Figura 2.3. Funcionamiento del algoritmo genético (Sánchez Caballero 2012).	11
Figura 2.4. Diferentes tipos de optimización estructural (Sánchez Caballero 2012).	12
Figura 2.5. Tinglado caído por malos diseños estructurales, Municipio Incahuasi, Chuquisaca 2019; (imagen izquierda) muestra el colapso de la cubierta, (imagen central) colapso de las columnas y (imagen derecha) muestra el fallo de la armadura por el empalme de la armadura de las columnas (Elaboración propia).	12
Figura 2.6. Macrolocalización y microlocalización de la ciudad de Sucre, Bolivia (Elaboración propia).	13
Figura 2.7. Velocidades básicas del viento en las ciudades principales de Bolivia (Acciones sobre las estructuras - Acción del viento – Parte 1: Especificaciones norma NB 1225003-1:2014) 2022).	14
Figura 2.8. Reportes meteorológicos del año 2024 (SENAMHI 2024).	14
Figura 2.9. Mapa Probabilístico de Granizadas (Zambrana Enríquez 2025).	15
Figura 2.10. Imágenes del colapso cubiertas metálicas en la ciudad de Sucre (Correo Del Sur 2021)	16
Figura 2.11. Control y seguimiento de un proyecto usando BIM (Elaboración propia).	17
Figura 2.12. Modelo de una cubierta de un coliseo usando Revit, Municipio de San Lucas, Chuquisaca, Bolivia (Elaboración propia).	18

Figura 2.13. Construcciones improvisadas alterando el patrimonio cultural de la ciudad de Sucre (Correo del Sur 2022).	19
Figura 2.14. Disposición óptima para la armadura HOWE (Brütting et al. 2020)...	20
Figura 2.15. La armadura de 20 barras:(a) Estructura común, (b) Optimización topología (Savsani et al. 2024).	20
Figura 2.16. Convergencia de algoritmos para la optimización de armaduras de 10 barras usando diferentes métodos de optimización (Ghaemifard y Ghannadiasl 2024).	22
Figura 2.17. Optimización estructural paramétrica de arcos de celosía sin articulaciones: (a, a') solución óptima para un caso de carga uniformemente distribuida; (b, b') solución óptima para múltiples casos de carga; (c) superposición de las dos soluciones óptimas (Congiu 2020).	22
Figura 2.18. Clasificación de los algoritmos metaheurísticos (Kashani et al. 2022).	23
Figura 2.19. Búsqueda de un valor óptimo de una función usando algoritmos genéticos en MATLAB (Cuevas Jiménez et al. 2016).	25
Figura 2.20. Optimización de una estructura metálica de 18 barras (Peleshko y Yurchenko 2023).	26
Figura 2.21. Aplicaciones de la inteligencia computacional en ingeniería estructural (Málaga-Chuquitaype 2022).	27
Figura 2.22. Empleo de técnicas de optimización en una estructura de 15 barras (Tejani et al. 2018).	28
Figura 2.23. Aplicaciones de los algoritmos en una estructura de 10 barras (Tejani et al. 2018).	29
Figura 2.24. Aplicaciones de algoritmos genéticos en torres de transmisión (Van et al. 2022).	29
Figura 2.25. Estructura optimizada dentro de los parámetros de seguridad (Van et al. 2022).	30
Figura 2.26. Plano constructivo de una cercha tipo sin optimización extraído del SICOES en la ciudad de Sucre, denominado como “CONSTRUCCION TINGLADO CAMPO DEPORTIVO J.V. SAN CRISTOBAL”(SICOES 2025).	32

Figura 3.1. Curvas de convergencia usando diferentes casos de Elitismo (Elaboración propia).....	39
Figura 3.2. Curvas de convergencia usando diferentes casos de la probabilidad de cruce (Elaboración propia).	40
Figura 3.3. Curvas de convergencia cuando la probabilidad de mutación es 0 (Elaboración propia).....	41
Figura 3.4. Comparación de la diferentes graficas de convergencia de acuerdo a las variaciones del elitismo, probabilidad de cruce y mutación (Elaboración propia). .	41
Figura 3.5. Idealización de las tipologías de las celosías de acuerdo a las cargas de diseño (Elaboración propia).....	47
Figura 3.6. Tipologías de las cerchas que serán analizadas, cercha tipo Warren, Home y Pratt (Elaboración propia).....	49
Figura 3.7. Flujo metodológico para la investigación (Elaboración propia).	51
Figura 3.8. Diagrama de flujo del algoritmo genético (Elaboración propia).	52
Figura 3.9. Comparación del diseño optimizado de una cúpula (52 barras) y de una torre de transmisión (272 barras), modelos de una estructura en 3D (Kaveh y Zaerreza 2020).....	53
Figura 3.10. Gráfica de convergencia de la solución óptima (Elaboración propia)..	57
Figura 3.11. Tipos de cercha optimizados (izquierda) tipo Warren, (centro) tipo Home (derecha) tipo Pratt (Elaboración propia).	58
Figura 4.1. Esquema de la cercha de análisis tipo Warren, Home y Pratt (Elaboración propia).....	63
Figura 4.2. Resultados obtenidos usando el programa de AG en el análisis de la cercha tipo (izquierda) WARREN , (centro) HOME y (derecha) PRATT (Elaboración propia).....	66
Figura 4.3. Selección de los perfiles en las tres topologías de la cercha, teniendo mayor sección en el cordón inferior (Elaboración propia).....	70
Figura 4.4. Desarrollo del cumplimiento de las normas de diseño en los procesos de iteración (Elaboración propia).....	73
Figura 4.5. Sección de los perfiles CFS sesión normal, sección cajón y sección cajón con pletinas (Elaboración propia)	74

Figura 5.1. Gráfica de convergencia de la optimización estructural (izquierda) tipo Warren, (centro) tipo Home, (derecha) tipo Pratt (Elaboración propia)	76
Figura 5.2. Cerchas inicial y optimizadas de 10 barras, demostrando la gráfica de convergencia respecto al peso de la estructura (Kaveh et al. 2021).	77
Figura 5.3. Resultados de los desplazamientos de los nodos de análisis para las cerchas Warren, Home y Pratt (Elaboración propia).	79
Figura 5.4. Figura de los resultados de los esfuerzos de tracción del elemento 27, obteniendo 87.2900 kN en relación con el modelo del algoritmo de 87.3972 kN en una cercha tipo Pratt (Elaboración propia).	80
Figura 5.5. Figura de los resultados de los esfuerzos de compresión del elemento 6, obteniendo -170.472 kN en relación con el modelo del algoritmo de 107.1343 kN en una cercha tipo Pratt (Elaboración propia)	80
Figura A.1. Dimensiones y áreas de un perfil costanero “C” (Elaboración propia)..	1
Figura A.2. Dimensiones y áreas de un perfil “2C” (Elaboración propia).	4
Figura A.3. Dimensiones y áreas de un perfil “2C+plancha” (Elaboración propia). .	6
Figura A.4. Memorias de cálculo desarrolladas de las propiedades geométricas de los perfiles “C”, “2C” y “2C+Plancha” (Elaboración propia)	7
Figura B.1. Grafica para poder determinar el factor de la pendiente (ASCE 7-16)...	3
Figura B.2. Factores de corrección según reglamentos internacionales ANSI A58.1-1972 (USA), REGLES NV 65 (FRANCE), CP3 -1967 (GREAT BRITAIN), ONORM B 4000 (AUSTRIA) (Zambrana Enríquez 2025).....	4
Figura B.3. Hoja de cálculo de las cargas de cubiertas (Elaboración propia).....	8
Figura E.1. Diagrama de flujo del módulo de análisis estructural (Elaboración propia).....	1
Figura E.2. Diagrama de flujo del módulo de diseño (Elaboración propia).....	2
Figura E.3. Archivos para el funcionamiento del algoritmo (Elaboración propia). ...	2
Figura E.4. Diagrama de flujo del algoritmo genético (Elaboración propia).....	3
Figura F.1. En la imagen superior se muestran los tipos de miembros estructurales individuales; en la imagen inferior se muestran los Paneles y decks laminados en frío (Yu, LaBoube, y Chen 2019).	1

Lista de tablas

	Página
Tabla 2.1. Registro de eventos históricos de granizadas en Sucre y su impacto.	16
Tabla 2.2. Comparación económica y ambiental de estructuras metálicas y concreto de estructuras.	19
Tabla 2.3. Tabla de las técnicas en inteligencia computacional en la ingeniería estructural.....	26
Tabla 2.4. Aplicaciones de AG en ingeniería estructural.....	27
Tabla 3.1. Pruebas de sensibilidad del parámetro del Elitismo “E”	39
Tabla 3.2. Pruebas de sensibilidad del parámetro de la probabilidad de cruce P_c ..	40
Tabla 3.3. Parámetros del algoritmo y su justificación.....	42
Tabla 3.4. Operacionalización de variables.	44
Tabla 3.5. Tabla de la definición conceptual y operativa.....	44
Tabla 3.6. Criterios de evaluación estructural y de optimización	45
Tabla 3.7. Datos del algoritmo genético	56
Tabla 3.8. Criterios de comparación	57
Tabla 3.8. Resultados de la comparación de esfuerzos de tracción y compresión	58
Tabla 4.1. Objetivos específicos del modelo y su aplicación en el algoritmo.	60
Tabla 4.2. Comparación de esfuerzos para cercha tipo Warren – MATLAB vs SAP2000	67
Tabla 4.3. Comparación de esfuerzos para cercha tipo Home – MATLAB vs SAP2000	68
Tabla 4.4. Comparación de esfuerzos para cercha tipo Pratt – MATLAB vs SAP2000	69
Tabla 4.5. Comparación de resultados	69

Tabla 4.6. Tabla de la sensibilidad de las variables de la estructura	71
Tabla A.1. Parámetros básicos de un perfil costanero simple	2
Tabla A.2. Tabla de resumen de valores calculados para un perfil “C”	3
Tabla A.3. Parámetros básicos de un perfil costanero simple	4
Tabla A.4. Tabla de resumen de valores calculados para un perfil “2C”	5
Tabla A.5. Tabla de la librería de perfiles comerciales	8
Tabla B.1. Tabla de valores de " C_e "	2
Tabla B.2. Tabla de valores de " C_t "	3
Tabla B.3. Tabla de la carga de granizo ajustada	4
Tabla B.4. Valores de (C_s) según el ángulo de inclinación de cubierta	4
Tabla B.5. Velocidades básicas del viento en ciudades	5
Tabla B.6. Factor de direccionalidad " K_d "	6
Tabla B.7. Tabla del factor de importancia " I_v "	6
Tabla B.8. Coeficientes de la presión interna GC_{pi}	7
Tabla B.9. Coeficientes de la presión externa " C_p "	7
Tabla B.10. Coeficientes de presión externa calculados para el caso de estudio, C_p ..	8
Tabla B.11. Cargas de la presión de diseño producidas por el viento.	8
Tabla B.12. Modelo de tabla	9
Tabla C.1. Restricciones de los nodos	1
Tabla C.2. Relaciones de esbeltez máxima y factor de longitud efectiva	2
Tabla C.3. Coordenada de los nodos	2
Tabla C.4. Conectividad de nudos	2
Tabla C.5. Tabla de la librería de perfiles comerciales	4
Tabla C.6. Tabla de las cargas en los nodos de la cercha	4
Tabla C.7. Combinaciones de carga de diseño.	5
Tabla C.8. Combinaciones de carga de servicio	5
Tabla C.9. Longitud no arriostrada en el “eje local 2”	5
Tabla C.10. Longitud no arriostrada en el “eje local 3”	6
Tabla C.11. Modelo de tabla	7
Tabla C.12. Datos del algoritmo	8
Tabla F.1. Propiedades mecánicas de los perfiles conformado en frío	2

Tabla F.2. Ventajas y limitaciones de los perfiles conformados en frío	2
Tabla F.3. Normas nacionales e internacionales que se aplican en el diseño de estructuras metálicas.	3

Lista de abreviaturas y símbolos

ABREVIATURAS.

AG: Algoritmo genético.

AISI: American Iron and Steel Institute.

ASCE: American Society of Civil Engineers.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

FEM: Método de Elementos Finitos (Finite Element Method).

LRFD: Load and Resistance Factor Design.

MATLAB: Matrix Laboratory (software de análisis numérico).

MOPSV: Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda.

NB: Norma Boliviana.

P_G : Presión de granizo.

P_P : Peso propio.

CFS: Perfil conformado en frío.

SÍMBOLOS.

σ : Esfuerzo (MPa).

E : Módulo de elasticidad (MPa).

F_y : Límite elasticidad del acero (MPa).

F_u : Resistencia última a la tracción (MPa).

L : Longitud del miembro estructural (m).

r : Radio de giro (m).

λ : Relación de esbeltez (adimensional).

P : Carga axial (kN).

W : Peso total de la estructura (kg).

ϕ : Factor de reducción de la resistencia.

μ : Coeficiente de Poisson.

q_z : Presión dinámica del viento (kN/m^2).

P_f : Carga de nieve sobre techos planos (kN/m^2).

P_s : Carga de nieve sobre techos inclinados (kN/m^2).

α : Ángulo de inclinación de la cubierta.

Resumen

Este trabajo de investigación desarrolló una metodología de optimización estructural de cerchas bidimensionales (2D), utilizadas en cubiertas a dos aguas, mediante la aplicación del algoritmo genético MARVALL. El estudio se centró en el uso de perfiles conformados en frío (CFS), seleccionados por las ventajas mecánicas y económicas.

El objetivo principal fue minimizar el peso estructural (cuantías), en función de la resistencia, esbeltez y el límite de los desplazamientos, por medio de un desarrollo y validación de un AG denominado “MARVALL”, codificado en MATLAB r2022b, donde se busca optimizar simultáneamente el tamaño y la forma de cerchas 2D, incorporando propiedades de perfiles CFS comerciales y las normativas locales e internacionales (AISI, ASCE 7-16, NB 1225003-1, Norma Granizo) adaptado a las condiciones de carga locales de la ciudad de Sucre.

Durante el desarrollo, se modelaron diferentes tipologías de cerchas Pratt, Howe y Warren con luces de 25 metros; los resultados mostraron una reducción del 3.84%, 1.44% y del 3.13% en el peso estructural, respectivamente y una disminución del tiempo de diseño. La validación con SAP2000 v24 confirmó alta precisión en los esfuerzos (5.975% hasta 13.222% en esfuerzos de tracción, 6.254% hasta 26.059% compresión) y el cumplimiento del 100% de las restricciones normativas (esbeltez, desplazamientos $L/300$). El AG exhibió convergencia estable y rápida (<30 generaciones) y robustez computacional, seleccionando perfiles “2C” y “2C+pletinas” para luces largas, optimizando inercia y rigidez.

Este estudio no solo llena un vacío de conocimiento local, sino que proporciona una herramienta replicable y eficiente (“script MARVALL”) para el diseño optimizado de estructuras metálicas, generando soluciones más seguras, económicas y sostenibles.

Palabras clave: *Optimización estructural; Algoritmos genéticos; Perfiles conformados en frío; Cubiertas metálicas; Simulación numérica.*

Abstract

This research project developed a structural optimization methodology for two-dimensional (2D) trusses used in gable roofs, through the application of the MARVALL genetic algorithm. The study focused on the use of cold-formed steel (CFS) profiles, selected for their mechanical and economic advantages.

The main objective was to minimize structural weight (reinforcement quantities) based on strength, slenderness, and displacement limits, through the development and validation of a genetic algorithm called “MARVALL,” coded in MATLAB r2022b. This algorithm simultaneously optimizes the size and shape of 2D trusses, incorporating properties of commercial (CFS) profiles and local and international standards (AISI, ASCE 7-16, NB 1225003-1, Granizo Standard) adapted to the local loading conditions of the city of Sucre. During the development process, different truss typologies—Pratt, Howe, and Warren—with spans of 25 meters were modeled. The results showed a reduction of 3.84%, 1.44%, and 3.13% in structural weight, respectively, and a decrease in design time. Validation with SAP2000 v24 confirmed high accuracy in stress calculations (5.975% to 13.222% for tensile stresses, 6.254% to 26.059% for compressive stresses) and 100% compliance with regulatory constraints (slenderness, $L/300$ displacements). The AG exhibited stable and rapid convergence (<30 generations) and computational robustness, selecting “2C” and “2C+plates” profiles for long spans, optimizing moment of inertia and stiffness.

This study not only fills a local knowledge gap but also provides a replicable and efficient tool (“MARVALL script”) for the optimized design of steel structures, generating safer, more economical, and more sustainable solutions.

Keywords: *Structural optimization; Genetic algorithms; Cold-formed profiles; Metal decks; Numerical simulation.*

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La *optimización de estructuras metálicas*, especialmente cubiertas de dos aguas hechas con perfiles conformados en frío, se ha vuelto muy importante en la actualidad; debido a los avances de la tecnología y la inteligencia artificial; donde se hace énfasis en maximizar la resistencia de la disposición de las cerchas y sus miembros de arriostre, para poder minimizar el uso de materiales, generando beneficios tanto económicos como ambientales (Charalampakis y Tsiatas 2019; Kashani et al. 2022).

Los *algoritmos genéticos* son una herramienta eficiente para varios procesos en la ingeniería, y más aún en la optimización en estructuras metálicas; permitiendo explorar el diseño, resistencia y las restricciones, para encontrar soluciones que cumplan con las normas y límites de diseño estructural (Kaveh y Zaerreza 2020). Sin embargo, persiste una ausencia de conocimientos relacionados con la aplicación de nuevas metodologías; destacando la optimización estructural de cubiertas en lugares particulares como la ciudad de Sucre, debido a su geografía, siendo un lugar adecuado donde se puede apreciar el comportamiento de la cercha bajo solicitaciones de las cargas de granizo y viento.

En esta investigación trata de resolver los vacíos usando *metodologías analíticas y numéricas* mediante el uso de *algoritmos genéticos*; donde se pretende determinar las mejores respuestas y soluciones a los problemas estructurales, considerando *limitaciones, normativas de diseño, restricciones y los materiales disponibles* para la sostenibilidad y eficiencia de las estructuras (Li et al. 2023). Se espera que las soluciones encontradas sean adecuadas a la práctica y que además mejoren el cálculo y el diseño, usando como base de la investigación herramientas bibliográficas actuales usando Matlab.

1.2. Problema de investigación

En la actualidad existe una creciente demanda por las edificaciones que cumplan con las condiciones de seguridad, eficiencia y sostenibilidad; motivo que ocasiono que el diseño se cada vez más óptimo y más aún si la mayor parte de las cubiertas son estructuras metálicas; como en la ciudad de Sucre, en más común el uso de *perfiles conformados en frío*; por tanto, la optimización estructural es crucial para garantizar *durabilidad y estabilidad*, bajo las solicitaciones de las cargas de viento y granizo.

Los *diseños tradicionales* de las estructuras metálicas no aprovechan en forma adecuada los recursos, debido a que generan *estructuras sobredimensionadas* con relación al peso/material de la estructura (Kashani et al. 2022; Charalampakis y Tsiatas 2019); en las cubiertas a dos aguas se ha observado que los criterios de selección de los perfiles no siempre son los más adecuados con relación a los límites de desplazamiento; lo que dificulta en gran medida que cumplan con las normas de diseño, lo que ocasiona un *uso excesivo de materiales y desperdicios* durante el proceso constructivo.

Las ineficiencias en el *diseño estructural* representan el 3.58% del costo total del proyecto (Li et al. 2023). La metodología de la optimización usando algoritmos genéticos pretende reducir el peso de las estructuras, reduciendo la sección y las longitudes de los perfiles (Kaveh y Zaeerza 2020).

1.3. Justificación

El estudio y análisis de la *optimización del diseño estructural* en cerchas 2D compuestas por perfiles conformados en frío; se fundamenta en la *eficiencia del material*, para poder reducir la cuantía de los perfiles comerciales manteniendo la seguridad y estabilidad estructural (Kashani et al. 2022). Hoy en día, muchas estructuras buscan la *sostenibilidad*, lo que implica que se debe reducir el uso excesivo del material y los desperdicios o pérdidas, lo que está directamente relacionado con el impacto ambiental y el cambio climático; actualmente, con la crisis económica en muchos países en Latinoamérica, esta investigación promueve técnicas de optimización, que pueden resolver este problema ofreciendo herramientas para los desafíos de la ingeniería estructural (Tejani et al. 2019).

Además, que también está la exigencia del control técnico, los AG permiten explorar una gran diversidad de configuraciones de las cerchas, buscando encontrar un equilibrio con las restricciones y las normativas de diseño; por lo que el ingeniero a cargo del diseño debe tener conocimientos del cálculo y diseño. Los AG no solo ayudan a reducir el peso de la estructura y los tiempos de construcción del armado de la estructura, sino que también optimizan el uso de materiales. Existe una gran demanda por usar técnicas modernas para construcciones de calidad, especialmente cuando hay una escasez y subida de precios del material ocasionado por la crisis económica (Mortazavi 2020; Altay et al. 2024).

Los hallazgos de esta investigación tendrán un gran aporte en la parte académica y la práctica profesional, donde se pretende ofrecer *enfoques de optimización*, facilitando el uso de *estructuras metálicas más sostenibles y eficientes* en construcciones pequeñas y de grandes dimensiones (Bodalal y Shuaeib 2023); las empresas y contratistas se beneficiarán con la reducción de tiempos, costos y recursos. Este estudio analiza los algoritmos genéticos y metaheurísticos para la *optimización de cerchas metálicas* en 2D para dos aguas, un área donde existe un mayor uso de este tipo de configuraciones (Renkavieski y Parpinelli 2021). Para ello, se desarrolló el programa **MARVALL**, enfocado en la optimización simultánea de forma, tamaño y topología estructural; donde se pretende mejorar el cálculo y diseño usando el software MATLAB r2022b, usando datos del marco temporal adecuado, extraídos de referencias bibliográficas y normativas.

En esta investigación, la optimización se entiende como la minimización del peso de la cercha, sujeta a las normas de diseño y los estados límites adoptados; por lo que no implica la minimización del costo total (material+ fabricación+ montaje +logística). Por lo tanto, se trata de buscar la eficiencia del uso del material, reduciendo las secciones y longitudes de los perfiles, comprobando las verificaciones estructurales; los aspectos económicos y constructivos no se optimizan, si no que servirán para futuros temas de investigación.

1.4. Pregunta de investigación

¿Cómo se puede optimizar el diseño de cerchas 2D de cubiertas a dos aguas con perfiles conformados en frío mediante la implementación de algoritmos genéticos “MARVALL” en la ciudad de Sucre?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Optimizar el diseño estructural de cerchas 2D de cubiertas a dos aguas con perfiles conformados en frío usando algoritmos genéticos en Sucre, para mejorar la eficiencia y reducir el peso, garantizando resultados cuantificables de acuerdo a normas de diseño.

1.5.2. Objetivos específicos

- Analizar ventajas y desventajas de algoritmos genéticos en optimización de estructuras metálicas, compuestas por perfiles conformados en frío, mediante revisión de literatura.
- Describir el comportamiento estructural y propiedades mecánicas de perfiles conformados en frío en cubiertas, usando estudios comparativos.
- Desarrollar e implementar un modelo de optimización usando algoritmos genéticos codificados en MATLAB r2022b, analizando la forma y tamaño de la cercha en 2D, usando los límites y restricciones de las normas de diseño.
- Validar los resultados obtenidos mediante una comparación con SAP2000 v24, verificando los esfuerzos, desplazamientos, deflexión máxima y comparando el peso de la estructura.

1.6. Hipótesis o idea a defender

Esta investigación es *cuantitativa y experimental*, debido a que los AG pretenden mejorar el diseño estructural, optimizando peso, la resistencia y el costo de cerchas metálicas 2D; a partir del cual se plantean las siguientes hipótesis:

1.6.1. Hipótesis de investigación (Hi)

La aplicación de algoritmos genéticos en la optimización de cerchas 2D de cubiertas a dos aguas compuestas por perfiles conformados en frío mejora la eficiencia estructural al reducir peso (cuantías), sin comprometer resistencia, esbeltez y desplazamientos, en comparación con un modelo de un diseño convencional.

1.6.2. Hipótesis nula (H_0)

El uso de AG en la optimización de cerchas 2D a dos aguas con perfiles conformados en frío, no genera una reducción significativa en el peso (cuantías), ni mejoras en las exigencias de las normas de diseño respecto a un modelo tradicional.

1.7. Contribución al estado del conocimiento

Este documento de investigación aporta al conocimiento técnico-científico, desarrollando y validando un modelo computacional de optimización estructural usando AG en el diseño de cerchas 2D de cubiertas a dos aguas, compuestas por perfiles conformados en frío, considerando las condiciones locales de Sucre. Las contribuciones importantes son:

- Aplicación de tecnologías modernas usando normas AISI LRFD 96 para mejorar los diseños tradicionales.
- Proponer una metodología replicable con el script “**MARVALL**” en MATLAB r2022b, para optimización simultánea de forma y tamaño, mediante una validación en el programa SAP2000 v24.
- Proporcionar diseños optimizados en cerchas de 2 aguas en la ciudad de Sucre, considerando las cargas de viento y granizo, al igual que la predisposición de la sección de perfiles comerciales.
- Ampliar el conocimiento sobre algoritmos genéticos en el diseño de cerchas para no solo reducir peso (cuantías), sino facilitando decisiones y criterios en ingeniería.

1.8. Organización de la tesis o trabajo de grado

El presente trabajo de tesis se estructura en cinco capítulos, que desarrollan el contenido técnico, metodológico y experimental del estudio. A continuación, un resumen:

- **Capítulo I: Introducción.**
Expone antecedentes, problema, justificación, objetivos, hipótesis y contribución.
- **Capítulo II: Marco teórico.**
Revisa conceptos de optimización estructural, perfiles conformados en frío, algoritmos genéticos y normativas aplicables. Incluye análisis geográfico de Sucre y avances en algoritmos evolutivos para estructuras metálicas.

- **Capítulo II: Marco metodológico.**

Describe enfoque, tipo de investigación, herramientas, técnicas de recolección/análisis de datos, métodos de simulación y la optimización, diseño experimental, operacionalización de variables y criterios de validación.

- **Capítulo IV: Análisis de resultados.**

Presenta resultados cuantitativos y explicativos. Detalla procedimientos técnicos y compara resultados de MATLAB r2022b (algoritmo genético) con SAP2000 v24 para validación.

- **Capítulo V: Discusión de resultados.**

Analiza hallazgos, evaluando la metodología de optimización, la reducción de peso, el cumplimiento normativo y su eficiencia, culminando en conclusiones y futuras líneas de investigación

- **Conclusiones y recomendaciones.**

Resume los hallazgos clave del estudio, valida la eficiencia de la optimización y el cumplimiento normativo, y plantea futuras líneas de investigación

- **Sección Anexos.**

Comprende información complementaria: cálculo de propiedades geométricas, cargas de diseño, código MATLAB y diagrama de flujo.

2. Marco teórico

En este capítulo establecen los fundamentos teóricos, conceptuales y contextuales para la optimización de cerchas 2D de cubiertas a dos aguas, con perfiles conformados en frío que fundamenta la presente investigación, proporcionando una visión completa del problema del estudio propuesto, donde se organiza la estructura con las siguientes partes:

- El marco conceptual, define los términos y conceptos técnicos y científicos esenciales para el estudio, incluyendo optimización estructural, perfiles conformados en frío, algoritmos genéticos y normas de diseño. Esto permite establecer un lenguaje técnico y práctico para el modelo de optimización propuesto.
- El marco contextual, nos define el lugar de estudio, nos describe las condiciones específicas de la ciudad de Sucre, como las características geográficas, meteorológicas (viento y granizo), y los procesos constructivos, donde se justifica la necesidad de modelos de optimización que pueden ser aplicables en ámbito local.
- El marco teórico, realiza una revisión crítica del estado del arte en la optimización de estructuras metálicas, con un énfasis en cerchas en 2D, y en las técnicas heurísticas y metaheurísticas, particularmente en los algoritmos genéticos que sustentan la metodología adoptada.

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Optimización estructural

La optimización estructural es un proceso sistemático que busca mejorar una estructura mediante configuraciones que satisfagan criterios de las normas de diseño, minimizando el peso (cuantías), desperdicios del material, tiempo de construcción; y de igual manera maximizando la rigidez, la resistencia, la estabilidad global o la sostenibilidad del diseño.

Por lo que no se limita solo a reducir el peso de estructura (cuantía), sino a encontrar un equilibrio entre la estabilidad estructural y la sostenibilidad. Para los procesos de optimización, se utilizan métodos matemáticos y los algoritmos computacionales, para conseguir diseños que satisfagan los requisitos que exigen las normas vigentes (Kaveh y Zaerreza 2020).

La optimización estructural busca las mejores configuraciones de diseño que cumplan con las restricciones y solicitaciones de las cargas de diseño, por medio de una exploración exhaustiva dentro de un espacio de soluciones ideales (Charalampakis y Tsiatas 2019). Existe una amplia variedad de metodologías de optimización, donde se pueden clasificar las más comunes:

- **Métodos clásicos o deterministas:** Utilizan las fórmulas explícitas del problema en la programación lineal y no lineal, para definir relaciones entre variables de forma precisa (Weldeyesus et al. 2024).
- **Métodos numéricos:** Aplica una simulación y el análisis numérico para problemas complejos, como el Método de Elementos Finitos (FEM) (Delyová et al. 2021).
- **Métodos metaheurísticos:** Son muy útiles cuando el comportamiento de la estructura es influenciado por las variables aleatorias, destacando los “*algoritmos evolutivos*” y los “*algoritmos genéticos*”; permiten explorar el espacio de soluciones para problemas demasiado complejos, donde además la búsqueda exhaustiva es inviable por el tiempo de cálculo (Jafari et al. 2021; Renkavieski y Parpinelli 2021).
- **Métodos híbridos:** Es la combinación de los métodos deterministas y estocásticos para explorar y refinar la búsqueda de soluciones (Nguyen-Van et al. 2021).

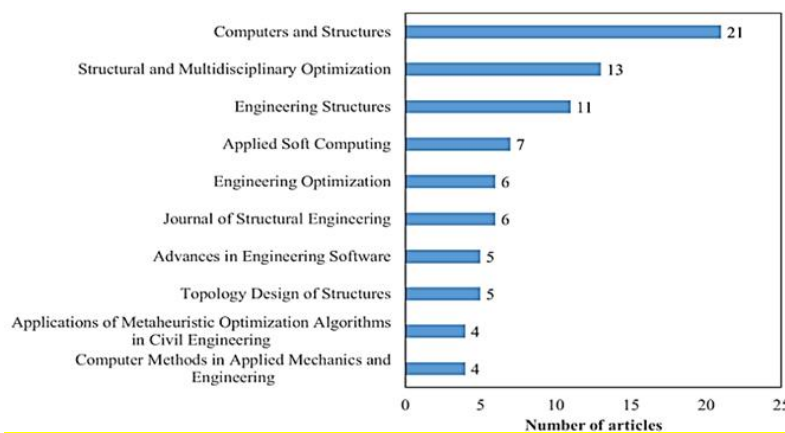


Figura 2.1. Número de artículos seleccionados publicados en las revistas principales (Mei y Wang 2021).

En la ingeniería, la optimización estructural se aplica al diseño de cerchas, vigas y, especialmente, estructuras metálicas, etc.; donde no solo se busca reducir el peso de los elementos de la cercha, sino mejorar su desempeño global, resistencia y rigidez en función de normas de diseño (Thar 2021).

2.1.2. Perfiles conformados en frío

Los perfiles conformados en frío son elementos estructurales fabricados a partir de chapas de acero dobladas a través de procesos de rodaje o plegado a una temperatura ambiente; esta técnica produce perfiles de alta resistencia y rigidez, con espesores generalmente entre 0.40 mm y 6.40 mm, ampliamente utilizados en cubiertas metálicas por su eficiencia, versatilidad, economía y disponibilidad en Bolivia.

Los perfiles CFS se clasifican en dos grupos de acuerdo al uso, denominados “*miembros estructurales individuales*” como vigas, columnas, travesaños en formas como “C”, “Z”, “I” y tubulares, que soportan cargas y contribuyen a la estabilidad, y los “*paneles decks*”; con formas corrugadas o planas, usados en sistemas de pisos y cubiertas, que ofrecen rigidez, bajo peso y funcionan como refuerzo primario en sistemas de concreto, donde se destaca la capacidad de soportar cargas específicas, debido a su forma y resistencia, son mucho mejor que las planchas de acero plana (Kaveh et al. 2021). Las características principales son:

- **Geometría:** Disponibles en formas “C”, “Z”, “L”, los perfiles “Sombrero”, “I”, “T” y tubulares; adaptables a las necesidades de diseño (Renkavieski y Parpinelli 2021).
- **Acabado:** El proceso automatizado garantiza la alta precisión y minimiza los costos.
- **Ligereza:** Son más livianos que los perfiles laminados en caliente, facilitando su transporte, manejo y montaje en obra, lo que reduce costos y el uso de equipos.
- **Facilidad de montaje:** Vienen preperforados en casos particulares; al igual pueden tener longitudes y cortes industriales para un ensamblaje en obra.

Las *propiedades mecánicas* relevantes para estos perfiles incluyen resistencia a la tracción (250-300 MPa), esfuerzo de fluencia (≥ 248.211 MPa), resistencia última (≥ 400 MPa), ductilidad (Elongación $> 20\%$), módulo de elasticidad (200-210 GPa) y resistencia a la fatiga (≈ 0.50 de la resistencia última).

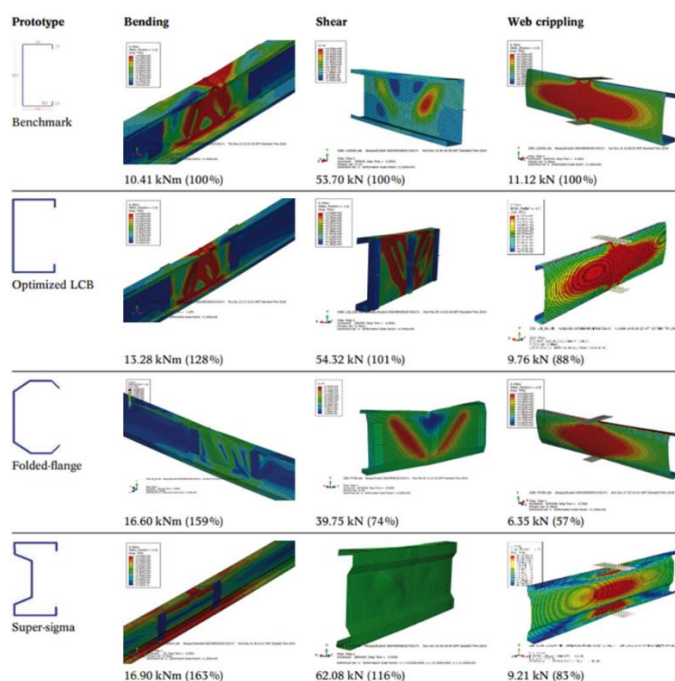


Figura 2.2. Resultados para la flexión, corte y deformación en secciones de perfiles (Gatheeshgar et al. 2020).

Si bien los perfiles CFS ofrecen una alta relación resistencia, peso liviano y son económicos en producción, transporte y montaje, presentan limitaciones como una menor resistencia a cargas de impacto y riesgo de fatiga bajo cargas cíclicas. Además, su costo inicial puede ser elevado y requiere recubrimientos para resistir la corrosión y mitigar su conductividad térmica. A pesar de ello, es un material que puede ser reciclable al 90.00%, que contribuye con la sostenibilidad y el impacto ambiental.

2.1.3. Algoritmos genéticos

Los *algoritmos genéticos (AG)* son un método de búsqueda y optimización computacional que se fundamenta en los principios de la *selección natural* y la *Teoría de la Evolución de Charles Darwin*; desarrollados por *John Henry Holland* a mediados de 1970, su función principal es resolver problemas complejos y encontrar soluciones óptimas dentro de un vasto espacio de soluciones en diversos campos, incluyendo la ingeniería estructural. Los AG utilizan tres operadores principales: *selección*, *cruce* y *mutación*. Estos operadores permiten que los “individuos” más aptos se “reproduzcan” y evolucionen a lo largo de una serie de generaciones para encontrar las soluciones ideales partiendo de un grupo inicial; los *componentes* principales de un AG incluyen:

- **Codificación:** Extensas series de código donde se busca programar datos de inicio, el proceso de cálculo y el cálculo de las soluciones como “*cromosomas*” o “*genes*” (Kaveh et al. 2021).
- **Población:** Un conjunto de posibles soluciones (Sánchez Caballero 2012).
- **Evaluación (función de Aptitud):** Cuantifica el rendimiento de cada solución para determinar su adecuación o cambio (Bodalal y Shuaeib 2023).
- **Selección:** Proceso para elegir a los mejores individuos que se reproducirán (Tejani et al. 2019).
- **Cruce:** Combina dos o más “*padres*” para crear una nueva “*descendencia*” (solución) (Mortazavi 2020).
- **Mutación:** Introduce pequeñas variaciones aleatorias para mantener la diversidad y evitar la convergencia prematura a óptimos locales (Mortazavi 2020).
- **Reemplazo:** La nueva población generada sustituye a la anterior, total o parcialmente (Sánchez Caballero 2012).
- **Iteración:** El proceso se repite por varias generaciones, realizando el cálculo.

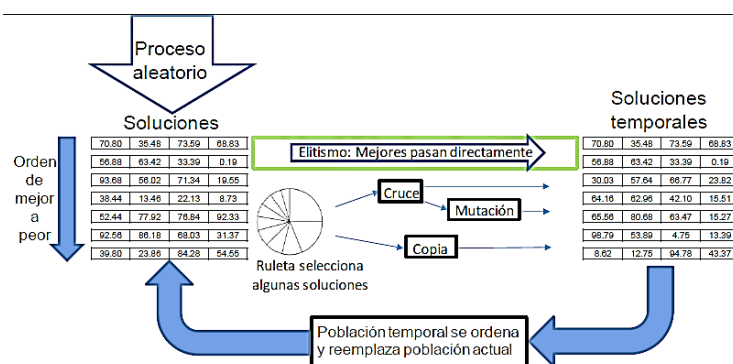


Figura 2.3. Funcionamiento del algoritmo genético (Sánchez Caballero 2012)

Los AG son una herramienta poderosa para el diseño de estructuras metálicas, haciendo énfasis en cerchas en 2D; donde se *optimizan los criterios como peso y resistencia*, de acuerdo con las normas y solicitaciones de las cargas de diseño, especificaciones técnicas, condiciones locales (Bekdaş et al. 2021). Según (Sánchez Caballero 2012), nos describe que las principales aplicaciones de los algoritmos genéticos, en las cerchas bidimensionales están en la *optimización de tamaño* (selección de secciones), *optimización de forma* (modificación geométrica) y *optimización de topología* (distribución del material mediante la variación de la configuración de nodos).

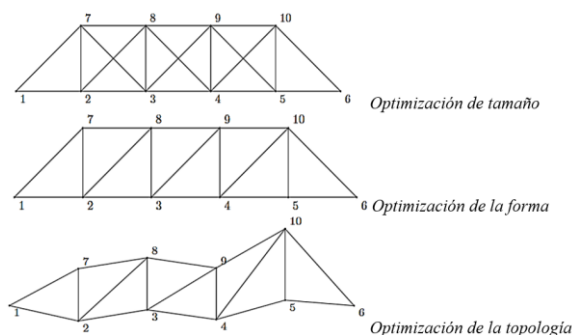


Figura 2.4. Diferentes tipos de optimización estructural (Sánchez Caballero 2012).

2.1.4. Normativas y códigos de diseño

Los *códigos, normas y reglamentos de diseño estructural*, son documentos fundamentales que establecen los criterios que se deben seguir durante la fase de cálculo, diseño y ejecución de proyectos; la preponderancia en el diseño de estructuras metálicas se debe a varias razones clave, dentro de las cuales se detallan:

- **Seguridad estructural:** Donde se debe garantizar que las estructuras puedan soportar cargas y combinaciones de diseño, reduciendo fallas (Kaveh y Zaerreza 2020).
- **Sostenibilidad y eficiencia:** Promueven la reducción de residuos de materiales de pérdidas y desperdicios de los perfiles (Bodalal y Shuaeib 2023).
- **Cumplimiento legal y normativo:** Aseguran el cumplimiento de las leyes y reglamentos, evitando sanciones y colapsos que pueden traer consecuencias como la pérdida de vida (Mortazavi 2020).
- **La práctica profesional:** Direcciones para las decisiones elevando la ética profesional; un ejemplo de las consecuencias de malos diseños estructurales, tanto en el diseño y ejecución, como es el colapso del tinglado del coliseo en Incahuasi (Chuquisaca, 2019).



Figura 2.5. Tinglado caído por malos diseños estructurales, Municipio Incahuasi, Chuquisaca 2019; (imagen izquierda) muestra el colapso de la cubierta, (imagen central) colapso de las columnas y (imagen derecha) muestra el fallo de la armadura por el empalme de la armadura de las columnas (Elaboración propia).

En Bolivia, el Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda (MOPSV) ha aprobado y difundido una serie de normas las cuales son de uso y aplicación a nivel nacional como la **Guía Boliviana de Construcción de Edificaciones**, la **Guía Boliviana de Diseño Sísmico (GBDS-2020)**, la **Norma Boliviana de Hormigón Estructural NB-1225001-1 (2020)**, la **norma de Acciones sobre estructuras-acción del viento parte 1 NB 1225003-1 (2022)**, y la **Norma Boliviana de Acción del Granizo sobre las Construcciones (2025)** (esta última en revisión). A nivel internacional, normas como la **AISC (American Institute of Steel Construction)** y el **AISI (American Iron and Steel Institute)** para perfiles conformados en frío (ej. AISI S100) son ampliamente aplicadas. La **ASCE 7-16 (Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings)** especifica las cargas mínimas de diseño, y la **ASTM A653** define especificaciones de calidad para el acero conformado en frío.

2.2. Marco contextual

2.2.1. Ubicación geográfica y condiciones climáticas de Sucre

La ciudad de Sucre, es la capital constitucional de Bolivia, se sitúa en el departamento de Chuquisaca a aproximadamente 2,800.00 m.s.n.m.; su clima es templado, experimenta cambios de temperatura que levemente afectan la durabilidad del acero, además de ser expuesta a efectos climatológicos (viento y granizo).

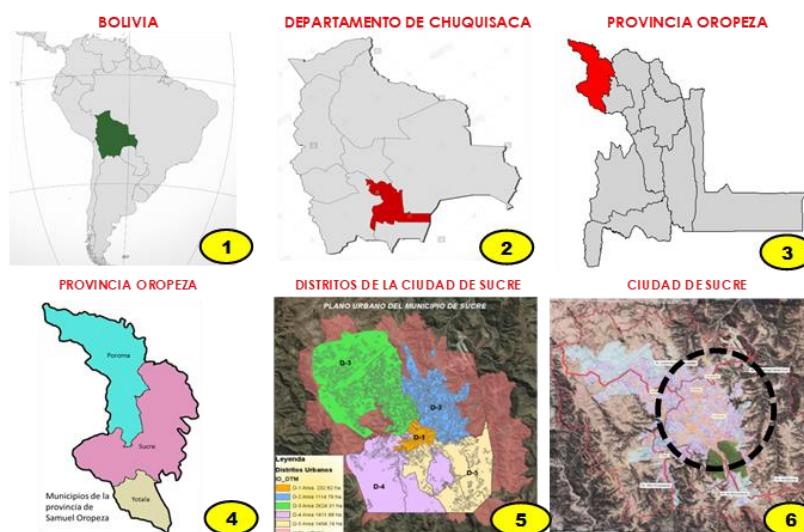


Figura 2.6. Macrolocalización y microlocalización de la ciudad de Sucre, Bolivia (Elaboración propia).

■ Factores ambientales que afectan el diseño estructural

Los factores ambientales que inciden en el diseño de cerchas en la ciudad de Sucre son:

- **Viento:** La magnitud de las cargas de vientos varía según la topografía, ubicación y altura; la norma ASCE 7-16 y la norma boliviana NB1225003-1, son documentos muy importantes para calcular dichas cargas. La velocidad máxima del viento en Sucre puede variar entre 28.18 y 32.40 m/s, con posibilidad de aumentar en eventos extremos; las alertas meteorológicas, son emitidas por SENAMHI, las cuales indican vientos de 30 a 60 km/h en Chuquisaca.

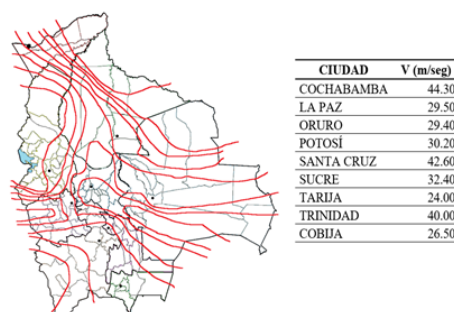


Figura 2.7. Velocidades básicas del viento en las ciudades principales de Bolivia (Acciones sobre las estructuras - Acción del viento – Parte 1: Especificaciones norma NB 1225003-1:2014) 2022)

La norma ASCE 7-16 establece parámetros para la determinación de las cargas en las edificaciones, al igual que la configuración estructural y las características del terreno, para calcular la presión del viento. Dentro de la norma NB1225003-1, está un análisis para definir parámetros específicos por regiones. Para el caso particular de la ciudad de Sucre, la velocidad máxima del viento se determina de registros históricos; mediante un *simposio científico* en la ciudad Potosí (Bolivia), estos valores fueron validados.

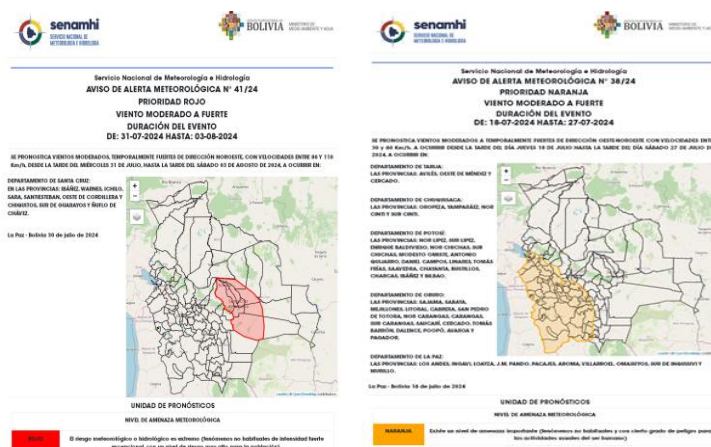


Figura 2.8. Reportes meteorológicos del año 2024 (SENAMHI 2024).

En la *figura 2.8* en la *imagen de la derecha*, se muestran los avisos de las alertas meteorológicas emitidos por el SENAMHI; se muestra la alerta meteorológica N°38/24 con *prioridad naranja*, tiene una duración del 18 al 27 de julio de 2024, donde se pronostica vientos con velocidades entre 30 y 60 km/h en los departamentos de Tarija, Chuquisaca, Potosí, Oruro y La Paz.

Por otro lado, en la *imagen de la izquierda*, se muestra la *alerta roja*, emitida en el aviso N°41/24, desde el 31 de julio hasta el 3 de agosto de 2024; donde se prevé vientos con velocidades entre 80 y 110 km/h en Santa Cruz; si bien la alerta roja no tiene incidencia directa, pero la alerta naranja sí incluye al departamento de Chuquisaca, lo que implica la posibilidad de experimentar vientos moderados a fuertes durante el período señalado; durante el diseño estructural se debe considerar estos efectos para garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras de las cubiertas y edificaciones, sin comprometer su integridad (Swabarna y Chinmay Kumar 2020).

- **Granizo:** Es otro de los fenómenos importantes en Sucre, que generalmente aparece en los meses de diciembre hasta abril; dentro de los registros históricos, hay una preponderancia del colapso de tinglados ocasionados por la acumulación de granizo hasta 1.00 metro de altura, el cual debe ser considerado como principal factor de diseño. Actualmente, se está realizando la socialización de la “*Norma Boliviana de Acción del Granizo sobre las Construcciones*”, que incluye criterios técnicos y una zonificación de cargas, asignando a Sucre una carga de granizo ajustada de 110 kg/m², cuyo valor se corrige por la pendiente de la cubierta (factor C_s) para reflejar la reducción de acumulación, como se muestra a continuación:

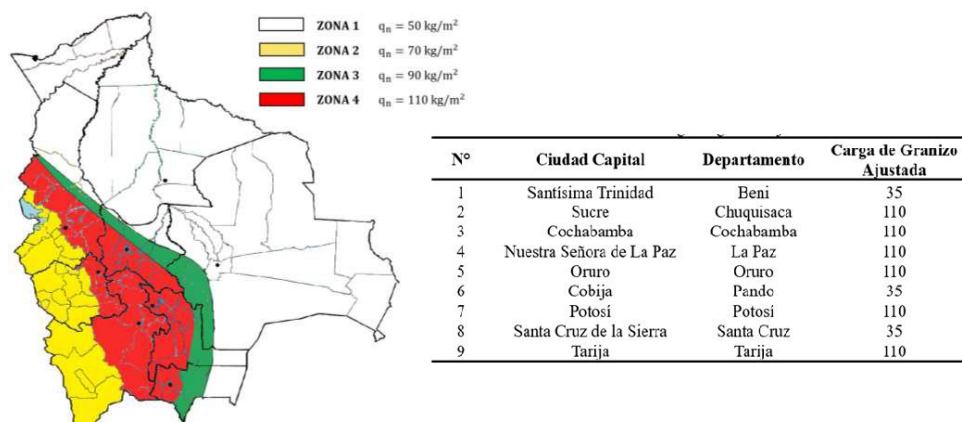


Figura 2.9. Mapa Probabilístico de Granizadas (Zambrana Enríquez 2025).

En función de dicha normativa se pudo realizar la extracción de datos, los cuales, después de ser multiplicados por el *factor de amenaza* (F_a) se clasifican en *Alto* y *Medio* igual a 1.00; *Bajo* igual a 0.85 y *Sin Amenaza* 0.70 respectivamente; se obtiene la “*carga de granizo ajustada*” q_a (kg/m^2). Del mismo modo, existen varios estudios que realizan la comparación de las cargas de hielo (nieve) y granizo, usando normas internacionales, donde se obtuvo que existe una relación entre la carga y el ángulo de inclinación de la cubierta; además, a través de una recopilación de fuentes periodísticas, como “*Correo del Sur*” en la ciudad de Sucre, Bolivia nos describe:

Tabla 2.1. Registro de eventos históricos de granizadas en Sucre y su impacto.

Fecha	Evento	Altura de granizo	Precipitación (mm)	Impacto
07/01/2021	Granizada intensa	5 - 7 cm	26.5 mm	Acumulación en superficies planas en diversas zonas de la ciudad.
22/11/2018	Tormenta eléctrica con granizo	2 - 5 cm	21.2 mm	Acumulación rápida en 20 minutos.
12/10/2017	Intensa granizada y colapso de tinglado	50 cm - 1 m	46 mm	Colapso del tinglado de la U.E. Aniceto Arce.
30/09/2008	Tormenta de granizo	5 - 7 cm	30 mm	Caída de tinglados debido al peso del granizo.

Nota: Esta información fue sacada de los reportes del periódico (Correo Del Sur 2021).

No obstante, en la actualidad, muchas de las estructuras fueron diseñadas sin incluir la carga de granizo o en su defecto, fueron reducidas, lo que ocasionó varios colapsos de la estructura, como se muestran las imágenes las cuales fueron obtenidas en Sucre.



Figura 2.10. Imágenes del colapso cubiertas metálicas en la ciudad de Sucre (Correo Del Sur 2021)

- **Temperatura:** Las variaciones térmicas causan expansión y contracción de los perfiles CFS, y estos a la vez, generando esfuerzos internos, los cuales presentan esfuerzos muy pequeños, los cuales no serán tomados en cuenta en esta investigación.

- **Humedad y precipitaciones:** En la ciudad de Sucre no presenta elevados niveles de humedad y agua, siendo este tipo de factores los que pueden provocar la corrosión y oxidación en las estructuras metálicas; siendo necesario el uso de los recubrimientos (pinturas anticorrosivas) y los trabajos de mantenimiento.
- **Condición del suelo:** La capacidad portante del suelo es vital, para el cálculo y diseño de las fundaciones, debido a que todo el peso propio de la estructura y el peso de las cargas de diseño, realizan la transferencia a las fundaciones, en las que podrían incrementar o decrementar sus dimensiones.
- **Radiación solar:** La radiación ultravioleta puede degradar los materiales; no obstante, este tipo de efectos puede ser contrarrestado con trabajos de mantenimiento.

2.2.2. Industria de la construcción metálica en Bolivia

El uso de las estructuras metálicas en Bolivia, y particularmente en Sucre, ha crecido en la aplicación de coliseos, tinglados, centros de salud, viviendas sociales, etc.: debido a su versatilidad de diseño y la eficiencia de los perfiles CFS. En la actualidad, con los avances de la tecnología, en el área de la construcción, surge el *Modelado de Información de Construcción (BIM)*, siendo una herramienta que mejora el control, seguimiento y la planificación, reduciendo errores y aumentando la precisión de los detalles constructivos, al igual que hay una creciente tendencia por diseños sostenibles y ecológicos (Kaveh et al. 2021).

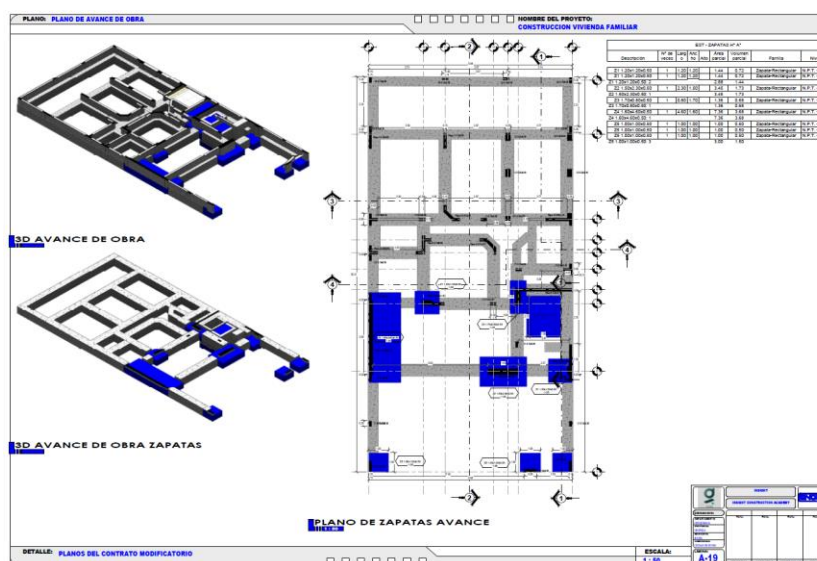


Figura 2.11. Control y seguimiento de un proyecto usando BIM (Elaboración propia).

Entre los desafíos en el sector de la construcción en Sucre, se encuentran la escasez de mano de obra calificada (*soldadores especialistas*), los bajos salarios y la falta de programas de capacitación. Además, persiste la *ausencia de reglamentos nacionales específicos* para perfiles CFS y el cálculo de cargas (como ASCE 7-16), debido a que obligan a los ingenieros a mantenerse actualizados (Kaveh et al. 2020).

Las variaciones en el costo de los materiales de construcción como el acero, en plena crisis económica, también representan un reto. A pesar de esto, existen oportunidades en que la tecnología puede mejorar la estabilidad, precisión y la reducción de costos, por lo que este tipo de tecnologías recién va iniciando (Avcı et al. 2024; Bodalal y Shuaieib 2023).

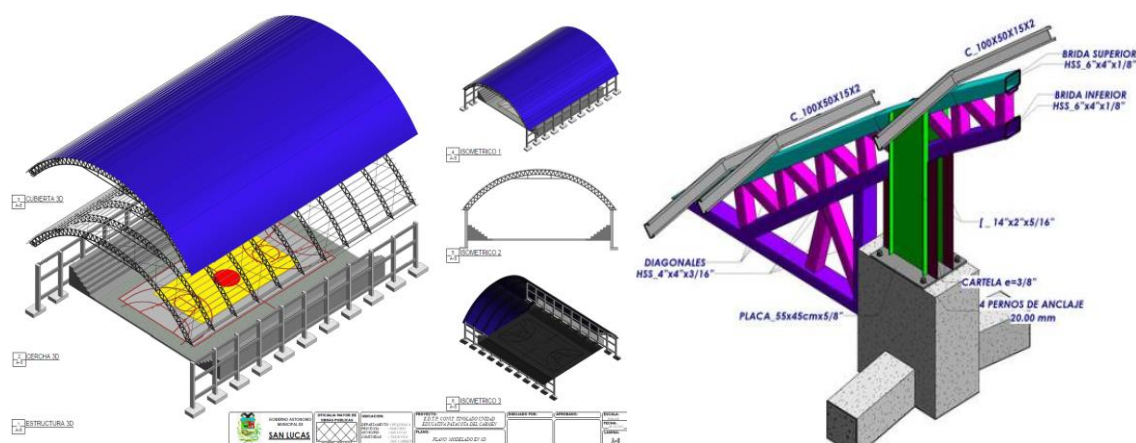


Figura 2.12. Modelo de una cubierta de un coliseo usando Revit, Municipio de San Lucas, Chuquisaca, Bolivia (Elaboración propia).

2.2.3. Relevancia del estudio

▪ Optimización estructural en la ciudad de Sucre

La *optimización estructural en Sucre*, es crucial para la sostenibilidad y la eficiencia, tanto en arquitectura como en ingeniería, especialmente en los centros urbanos y ciudades en desarrollo, donde los recursos económicos son limitados. El uso de AG puede reducir los costos de los materiales (cuantías), al optimizar la disposición, la sección y longitud de los perfiles. La *optimización topológica*, permite una redistribución adecuada del material, donde se crean nuevas estructuras, que resisten las cargas de diseño y que además cumplen con las normas de diseño; cabe mencionar que muchas de las estructuras y edificaciones en el centro no respetan el patrimonio arquitectónico (Mei y Wang 2021).



Figura 2.13. Construcciones improvisadas alterando el patrimonio cultural de la ciudad de Sucre (Correo del Sur 2022).

■ Impacto económico y ambiental

Los impactos dentro de la optimización estructural son directos, reduciendo costos de materiales (cuantías), reduciendo las pérdidas y desperdicios, contribuyendo al medio ambiente (Li et al. 2023). La aplicación de metodologías como el *Análisis del Ciclo de Vida (ACV)*, compara las soluciones que generan menores impactos ambientales y costos. Por ejemplo, las estructuras metálicas optimizadas pueden lograr ahorros sustanciales en acero, mejoran los tiempos y costos operativos, siendo viables para el medio ambiente en comparación con otros materiales, como lo exponen (Botejara-Antúnez et al. 2022); en la **Tabla 2.2**, como muestra a continuación:

Tabla 2.2. Comparación económica y ambiental de estructuras metálicas y concreto de estructuras.

CIMENTACIÓN	Estructura de concreto (CS)			Estructura Metálica (MS)		
	Economía		Ambiental	Economía		Ambiental
	ACCD (España)	Promedio	CF	ACCD (España)	Promedio	CF
	(€/m ²)	(€/m ²)	(kgCO ₂ /m ²)	(€/m ²)	(€/m ²)	(kgCO ₂ /m)
Zapatas aisladas	647.64	861.22	0.571	777.11	1033.39	0.740
Losa de cimentación	639.05	849.80	0.556	754.80	1003.72	0.720
Pilotes	697.42	927.42	0.588	821.44	1092.34	0.753

ACCD (España): Costos según la Asociación de Construcción y Diseño en España; CF (kgCO₂/m²): Impacto ambiental medido en emisiones de CO₂ por m² (González-Vallejo et al. 2020).

La optimización estructural de las cubiertas metálicas en cerchas en 2D, permite reducir costos de los materiales (cuantías), disminuyendo la cantidad de acero, lo que significa

ahorros en el presupuesto; por este motivo, las cubiertas metálicas en secciones más largas y delgadas disminuyen el número de uniones, reduciendo los tiempos y mejorando el proceso constructivo (Grandon Alborno 2011), como se muestra en la **Figura 2.16**.

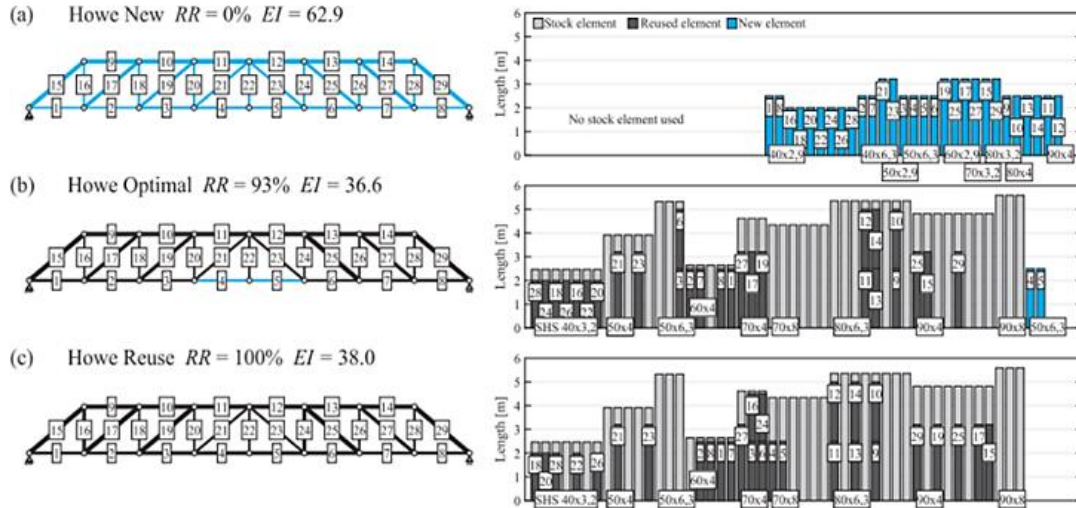


Figura 2.14. Disposición óptima para la armadura HOWE (Brütting et al. 2020).

2.3. Marco teórico

2.3.1. Optimización estructural: Técnicas y avances

La optimización estructural por medio de una secuencia de proceso busca el diseño más adecuado, minimizando o maximizando la *función objetivo*. (Swabarna y Chinmay Kumar 2020; Kashani et al. 2022); actualmente existen muchas técnicas de optimización debido a los avances de la ciencia y tecnología (Bodalal y Shuaeib 2023).

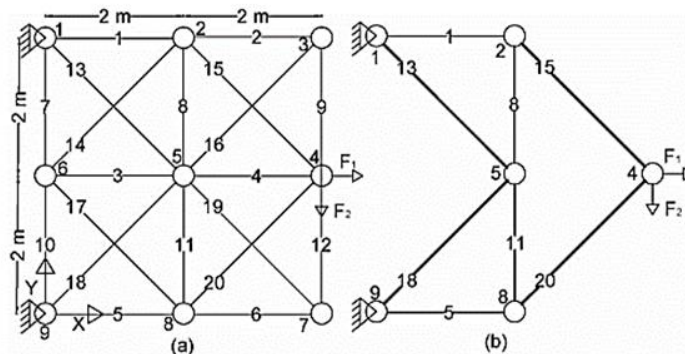


Figura 2.15. La armadura de 20 barras: (a) Estructura común, (b) Optimización topología (Savsani et al. 2024).

Las técnicas más destacadas dentro de la optimización estructural, según las fuentes bibliográficas revisadas, pueden clasificarse en:

- **Programación Matemática (PM):** Son métodos analíticos que buscan soluciones óptimas, limitados por geometrías complejas (Savsani et al. 2024).
- **Métodos Metaheurísticos:** Abordan problemas complejos con múltiples soluciones locales; dentro de este tipo de métodos se destacan:
 - **Algoritmos Genéticos (AG):** Se basan en la evolución biológica, efectivos para optimizar simultáneamente topología, forma y tamaño de cerchas, manejando restricciones y condiciones de carga (Cazacu y Grama 2014).
 - **Recocido simulado (RS):** Busca una configuración óptima minimizando el esfuerzo y el procesamiento de datos, aunque su convergencia puede ser más lenta, sus resultados son muy satisfactorios (Savsani et al. 2024).
 - **Optimización por Enjambre de Partículas (OEP/PSO):** Utiliza el comportamiento de un grupo colectivo de partículas para encontrar soluciones ideales dentro de un grupo de soluciones (Li et al. 2023).
 - **Optimización por Colonia de Hormigas (OCH/ACO):** Basado en el comportamiento de búsqueda de alimento de las hormigas, es muy útil para optimizar estructuras de problemas lineales (Charan et al. 2021).
 - Existen algunos algoritmos híbridos que combinan técnicas para mejorar la eficiencia y robustez (Van et al. 2022), como el ECLPSO, Algoritmo de la Explosión de Minas (MBA), Algoritmo de Búsqueda Armónica (HS), Algoritmo Big Bang-Big Crunch (BB-BC), Algoritmo de la Luciérnaga (FA), Optimizador Basado en la Enseñanza-Aprendizaje (TLBO), Optimizador de Cuerpos en Colisión (CBO), Algoritmo de Polinización de Flores (FPA), Optimizador de Evaporación de Agua (WEO) y Sistemas de Circulación Coronaria Artificial (ACCS).

Dentro de los *avances de la optimización de estructuras metálicas*, se busca reducir el tiempo de diseño y crear modelos que cumplan con las condiciones de estabilidad y rigidez, minimizando cuantías y reduciendo el costo por medio de desperdicios del material (Savsani et al. 2024). Esto implica ajustar parámetros de diseño (secciones, formas, disposición de elementos) para cumplir con la resistencia y estabilidad, siendo vital en estructuras livianas y de grandes luces, sobresaliendo más los algoritmos híbridos combinando la convergencia y la precisión (Altay et al. 2024; Kaveh y Zaerreza 2020).

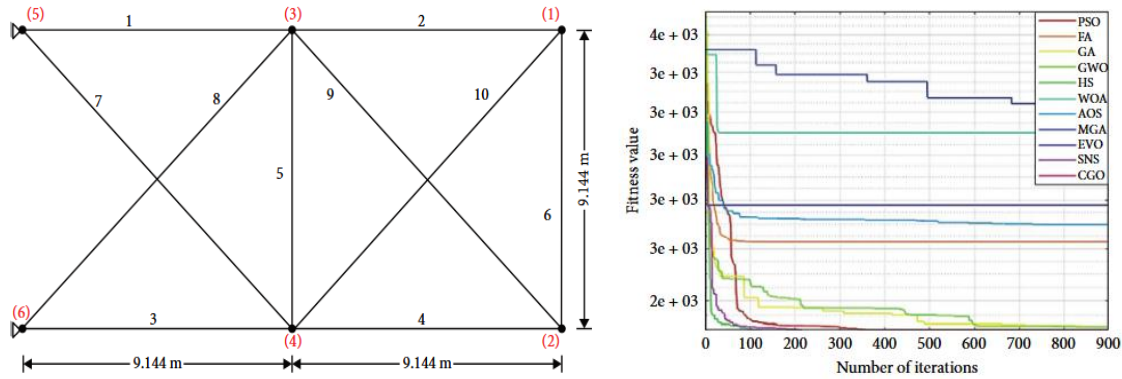


Figura 2.16. Convergencia de algoritmos para la optimización de armaduras de 10 barras usando diferentes métodos de optimización (Ghaemifard y Ghannadiasl 2024).

Dentro de las nuevas tecnologías surge también el *modelado paramétrico*, donde los algoritmos metaheurísticos y la Inteligencia Artificial (IA), son la clave en este tipo de procesos. Además, son muy usadas en la rehabilitación de estructuras antiguas, mejorando la vida útil sin la necesidad de una modelación completa de toda la estructura (Savsani et al. 2024).

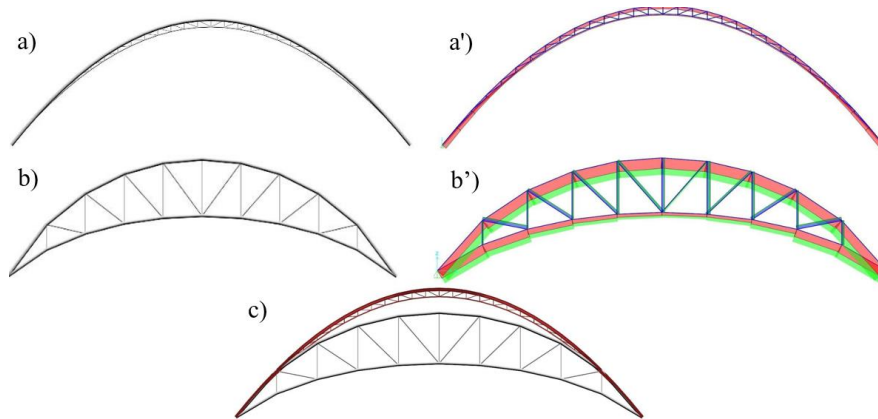


Figura 2.17. Optimización estructural paramétrica de arcos de celosía sin articulaciones: (a, a') solución óptima para un caso de carga uniformemente distribuida; (b, b') solución óptima para múltiples casos de carga; (c) superposición de las dos soluciones óptimas (Congiu 2020).

Mediante una *comparación* entre métodos *heurísticos* y *metaheurísticos*, los primeros se destacan por ser directos y específicos para problemas definidos, pero pueden quedar atrapados en soluciones locales. Los metaheurísticos (como los AG) son más robustos, exploran el espacio de soluciones de manera más amplia y pueden encontrar soluciones cercanas al óptimo global en problemas complejos, con múltiples restricciones y no lineales (Delyová et al. 2021; Kaveh y Zaeerreza 2020). Aunque requieren más tiempo en el proceso

de cálculo y desarrollo del proceso de la información, la capacidad para manejar la complejidad y no linealidad resaltan en la optimización de estructuras metálicas.

Dentro de las limitaciones de este método, requieren una revisión cuidadosa del ajuste de parámetros de cálculo, debido a que datos incorrectos o valores no calibrados, influyen en un mayor tiempo para encontrar soluciones ideales (Sánchez Caballero 2012).

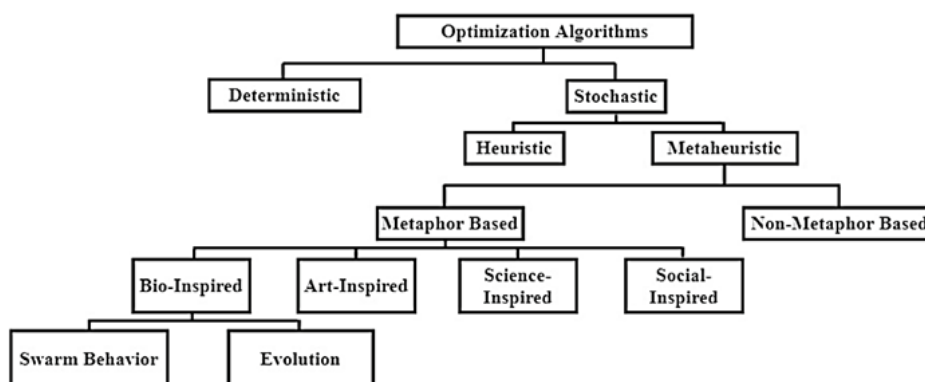


Figura 2.18. Clasificación de los algoritmos metaheurísticos (Kashani et al. 2022).

2.3.2. Bases teóricas de la optimización estructural

Las bases teóricas de la optimización estructural, buscan encontrar una solución ideal para reducir el peso de la estructura por medio de una reconfiguración de nodos y las barras, para poder bajar la cuantía de las cerchas, bajo restricciones de las cargas y normas de diseño. Los tipos de optimización más comunes en cerchas son: *tamaño*, *forma* y *topológica*, cada uno con principios específicos según las necesidades del proyecto (Savsani et al. 2024). Los *Métodos tradicionales de diseño estructural*, se basan en la experiencia del proyectista usando procesos analíticos, estados límites, métodos de cargas y factores de seguridad, así como el Análisis de Elementos Finitos (FEA o FEM); y de igual manera están los métodos empíricos que se apoyan en principios estáticos y dinámicos (Awad 2021; Mortazavi 2019).

El modelado matemático y la formulación del problema son muy importantes para la optimización, evaluando la estructura y su comportamiento bajo diversas condiciones de carga (Li et al. 2023; Falcon et al. 2023). Las principales partes del algoritmo son:

- **Definición de variables.**

Identificar y definir las variables de diseño como la sección de los perfiles, longitudes, posiciones nodales, (Savsani et al. 2024).

- **Definición de la función o ecuación objetivo.**

La función o ecuación objetivo es el parámetro que se busca optimizar, como minimizar o maximizar; es una función que representa el parámetro crítico de diseño; para el tema de investigación, se busca minimizar el peso de la estructura “ w ” por medio de una ecuación, que puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } f_{(x)} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot A_i \cdot L_i \quad (2.1)$$

Donde, “ w ” representa el peso específico del material (kg), “ γ_i ” representa el peso específico del material (kg/m^3), “ A_i ” representa el área de la sección transversal (cm^2), “ L_i ” son las longitudes de las barras (m).

- **Definición de las restricciones.**

Son las condiciones que se deben considerar en el diseño; estas pueden ser las limitaciones de resistencia “*deformación*”, estabilidad “*pandeo*”, y las funcionalidades “*desplazamientos*”; pueden formularse de la siguiente manera:

$$\Delta \leq L/300, \quad L = \text{Luz entre los apoyos} \quad (2.1)$$

$$g_{j(x)} \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.2)$$

Donde, “ $g_{j(x)}$ ” representan las restricciones para cada problema de optimización. Entre las principales restricciones se incluyen:

- Límites de las tensiones en los elementos estructurales para evitar fallas por cedencia o fractura.
- Restricciones de desplazamientos nodales, asegurando que los desplazamientos no superen valores admisibles.
- Condiciones de frecuencias naturales, evitando problemas de resonancia en las estructuras.

- **Definición del método de análisis.**

Para resolver el problema, se deben analizar los métodos descritos anteriormente, para calcular los parámetros necesarios (*esfuerzos, desplazamientos, reacciones*) para poder evaluar la *función objetivo* y las *restricciones*, para lo cual se usará el FEM, siendo muy útil en geometrías muy complejas y para diversas condiciones de carga; puede ser expresado en la **Ecuación (2.1)**, usando las siguientes condiciones.

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{adimisible} \quad (2.3)$$

$$\delta_{max} \leq \delta_{adimisible} \quad (2.4)$$

$$A_i \geq A_{min} \quad (2.5)$$

Donde, " σ_{max} " representa los esfuerzos máximos, " δ_{max} " representa los desplazamientos máximos; y " A_{min} " representa el área mínima de la sección transversal permitida. Una formulación matemática debe ser adecuada, para conseguir resultados ideales en el diseño.

2.3.3. Algoritmos genéticos en ingeniería estructural

Los *Algoritmos Genéticos* (AGs), como parte de la *Inteligencia Computacional (IC)*, son cruciales en la ingeniería estructural, para resolver problemas complejos que requieren cálculos intensivos; para optimizar el tamaño, forma y topología, reduciendo el peso bajo restricciones de resistencia y rigidez, reflejando "*soluciones óptimas*" dentro de un grupo de soluciones, como lo muestra en la figura 2.19 (Tejani et al. 2019; Jafari et al. 2021).

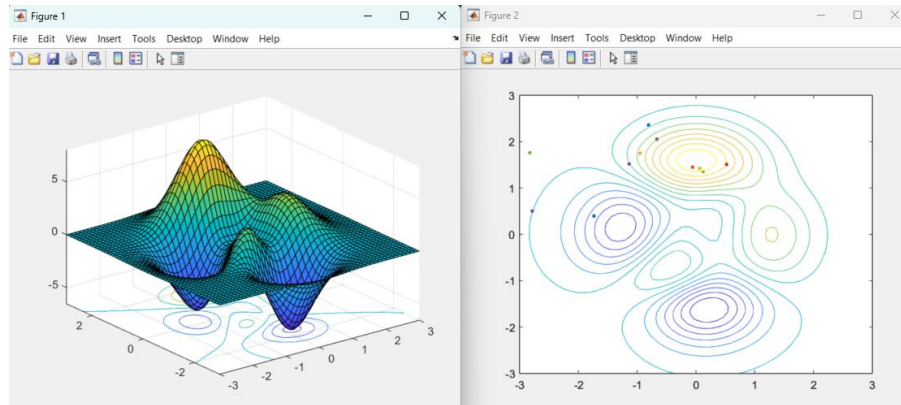


Figura 2.19. Búsqueda de un valor óptimo de una función usando algoritmos genéticos en MATLAB (Cuevas Jiménez et al. 2016).

Las *aplicaciones de los AGs* es la optimización de estructuras de acero y hormigón, así como la optimización de trabajos de mantenimiento y rehabilitación. Sus *ventajas* radican en su flexibilidad para adaptarse a problemas con múltiples objetivos y restricciones, su capacidad para manejar grandes espacios de soluciones no lineales, sin quedar atrapados en óptimos locales, y su habilidad para realizar cálculos en paralelo, reduciendo el tiempo de procesamiento. Sin embargo, sus *desventajas* incluyen la necesidad de un gran número de evaluaciones de la función objetivo, lo que puede implicar mayor tiempo computacional, y la dependencia de un control constante de los parámetros de mutación y cruce (Savsani et al. 2024).

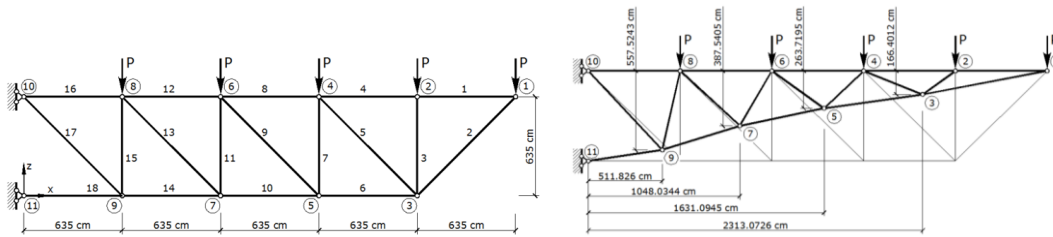


Figura 2.20. Optimización de una estructura metálica de 18 barras (Peleshko y Yurchenko 2023).

▪ La inteligencia computacional en ingeniería

La inteligencia computacional (IC) busca replicar la inteligencia humana para resolver problemas complejos; por medio de técnicas de los AGs, las redes neuronales artificiales (RNA) y los sistemas de lógica difusa, las que transforman y mejoran el análisis y diseño estructural, sobresaliendo por su capacidad de manejar datos imprecisos y resolver problemas no lineales y discontinuos, difíciles de resolver usando los métodos tradicionales, según (Nguyen-Van et al. 2021; Kaveh et al. 2021), se destacan:

Tabla 2.3. Tabla de las técnicas en inteligencia computacional en la ingeniería estructural.

TÉCNICA	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES
Algoritmos Genéticos (AGs)	Basados en la evolución biológica, emplean operadores de selección, cruce y mutación para mejorar soluciones por medio de iteraciones.	Optimización de topología, tamaño y forma de estructuras, reducción del peso de acuerdo a las restricciones y cargas de diseño.
Optimización por Colonias de Hormigas (ACO)	Inspirada en el comportamiento de las hormigas en la búsqueda de rutas óptimas, simula búsquedas virtuales para guiar la exploración de soluciones.	Optimización de las estructuras por medio de las configuraciones óptimas en diseños complejos.
Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)	Simulan el comportamiento colectivo de un enjambre de partículas, donde cada una ajusta su trayectoria en función objetivo y del grupo.	Optimización de la distribución de materiales, disposición de elementos estructurales y reducción de costos en el diseño estructural.
Recocido Simulado (SA)	Basado en el proceso de enfriamiento de metales, permite calcular la velocidad del movimiento, para evitar quedar atrapado en óptimos locales.	Optimización global de diseños estructurales, asegurando mayor exploración del espacio de búsqueda.
Redes Neuronales Artificiales (RNA)	Modelos computacionales inspirados en el cerebro humano, capaces de aprender patrones y realizar predicciones.	Predicción de comportamiento estructural, detección de fallos y evaluación de cargas dinámicas.
Hibridación de Algoritmos (AG + PSO, SA + ACO, etc.)	Combinación de técnicas de IC para mejorar la eficiencia y robustez de la optimización.	Mejor desempeño en problemas complejos de optimización estructural, maximizando eficiencia y precisión.

Nota: La información de la tabla fue sacada del libro (Cuevas Jiménez et al. 2016).

Las aplicaciones y beneficios de la IC dentro de la ingeniería estructural incluyen la optimización de diseños, el monitoreo y diagnóstico estructural (mediante RNA), y la evaluación del comportamiento de los materiales; además, permite generar múltiples soluciones de forma automatizada, acelerando el proceso de diseño dependiendo de la *función objetivo*. Las *tendencias futuras* se centran en los algoritmos híbridos entre los AG y los PSO; debido a que tienen una mayor capacidad de manejar datos, ajustan de forma automática parámetros de cálculo y con la integración del FEM, se busca garantizar soluciones precisas, sin intervención manual (Delyová et al. 2021; Falcon et al. 2023).

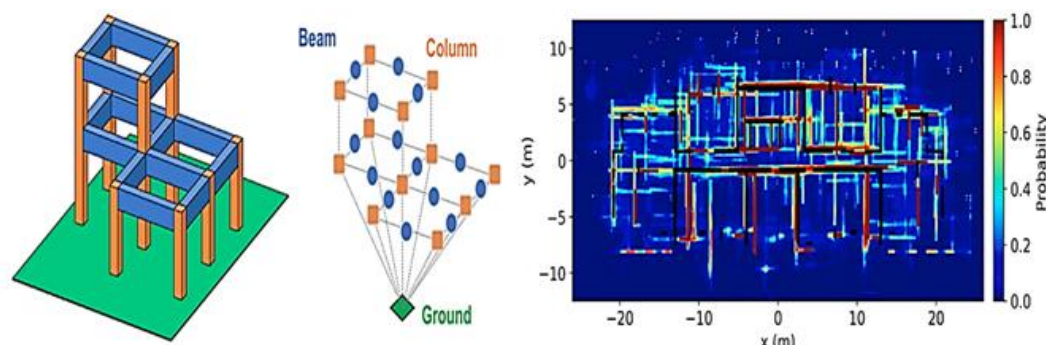


Figura 2.21. Aplicaciones de la inteligencia computacional en ingeniería estructural (Málaga-Chuquitaype 2022).

Las aplicaciones de los AGs y de la IC en las estructuras metálicas resaltan por ser muy usadas en cerchas metálicas de cubiertas, pasarelas, puentes, torres de transmisión, etc.; a partir de un análisis del cálculo y diseño de estructuras en 2D y en 3D, permitiendo optimizar estructuras sencillas hasta sistemas complejos, asegurando la eficiencia y estabilidad de la estructura (Sánchez Caballero 2012).

Tabla 2.4. Aplicaciones de AG en ingeniería estructural.

APLICACIÓN	DESCRIPCIÓN	BENEFICIOS
Optimización de Estructuras de Cerchas (Trusses)	Los AGs optimizan el tamaño de los elementos seleccionando las áreas de sección transversal adecuadas para minimizar el peso total, cumpliendo restricciones de tensión, compresión y desplazamiento; optimizando la topología en función la disposición de los elementos y la conectividad entre nodos.	Mayor eficiencia estructural, reducción de peso y minimización del consumo de material.
Optimización de Marcos de Acero	Los AGs optimizan las dimensiones de los perfiles estructurales y la ubicación de los nodos en marcos de acero, buscando minimizar costos y mejorar el desempeño estructural. Se consideran restricciones como resistencia del material, estabilidad y normativas sísmicas.	Optimización de cuantías de las estructuras más resistentes y cumplimiento de normas de diseño.

Nota: La información de la tabla fue sacada de la bibliografía (Elaboración propia).

La aplicación de algoritmos genéticos en estructuras metálicas, marcos de acero y elementos con cambios de forma y tamaño, como las cerchas, permite seleccionar áreas de sección transversal, reconfiguración de los nodos, que buscan reducir el peso de la cercha sin comprometer la resistencia, ni los desplazamientos admisibles. En la optimización topológica, los AG buscan la mejor disposición y conectividad de elementos para mejorar la configuración y reducir el peso (cuantías); además, la integración con FEM asegura la evaluación precisa de los esfuerzos y las deformaciones, garantizando el cumplimiento de las normas de diseño. La validación de los AGs en problemas clásicos como las estructuras de diez (10) barras, ha demostrado reducciones de peso significativas (hasta 20.00%) comparado con métodos tradicionales (Cazacu y Grama 2014; Kashani et al. 2022), como se muestra en la **figura 2.23**.

En cuanto a las implementaciones previas y los casos de estudio, los AG metaheurísticos han demostrado un aumento de la resistencia y reducir peso (cuantías). Las investigaciones previas, han validado los AGs para explorar espacios de diseño, donde el *elitismo*, se destaca como una técnica, que preserva las mejores soluciones de una generación (*iteración*), evitando su pérdida y asegurando la mejora continua de la aptitud (*función objetivo*) de la población dentro de las barras que componen una estructura de una cercha (Bodalal y Shuaeib 2023; Thar 2021), como se puede apreciar en la **figura 2.23**

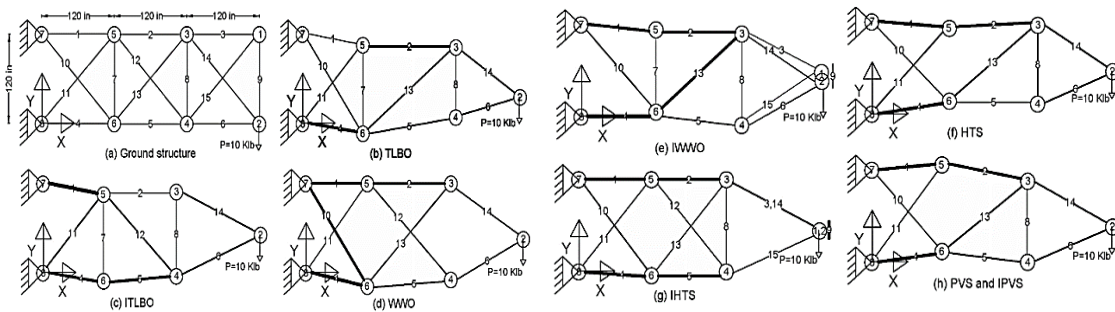


Figura 2.22. Empleo de técnicas de optimización en una estructura de 15 barras (Tejani et al. 2018).

- **Casos clásicos de optimización estructural.**

El problema de las diez (10) barras y seis (6) nodos: Este problema clásico, utilizado en muchas pruebas de diseño, se usa para validar diferentes algoritmos, permitiendo comparar el rendimiento de diferentes enfoques, además de validar la eficacia de los AG en la optimización de topología y tamaño de estructuras.

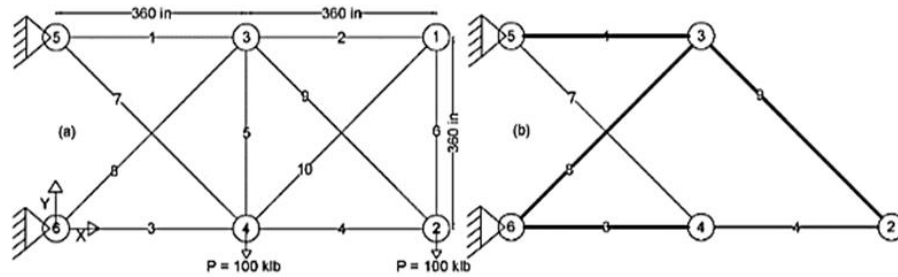


Figura 2.23. Aplicaciones de los algoritmos en una estructura de 10 barras (Tejani et al. 2018).

Diseño de torres de transmisión: Los AG han sido aplicados con éxito en la optimización de topología y tamaño de torres de transmisión, siendo estructuras muy complejas tanto en la configuración, cálculo y diseño; donde se pretende reducir el peso y costos, sin comprometer la estabilidad estructural de acuerdo con normas de diseño.

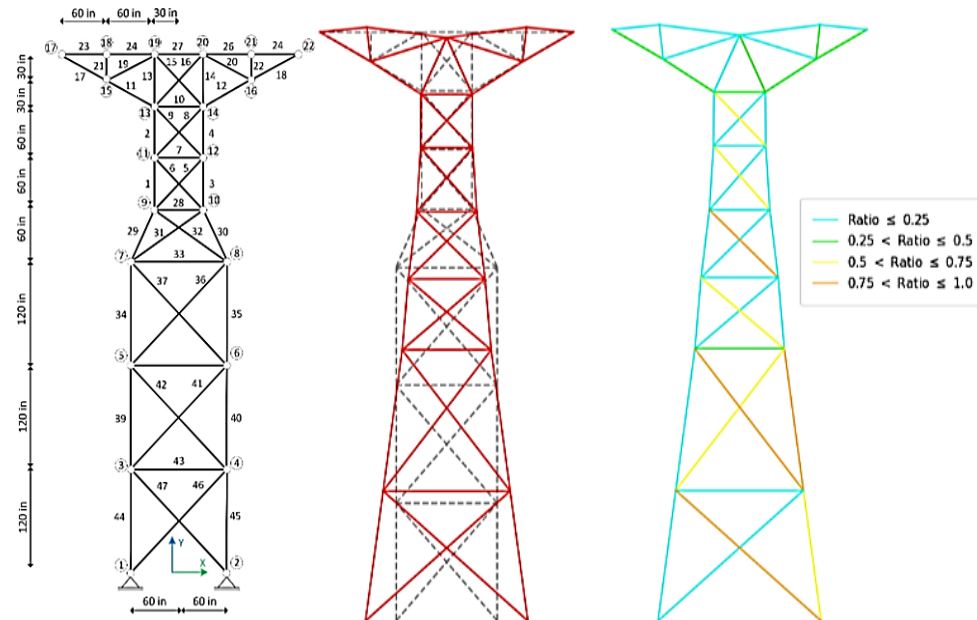


Figura 2.24. Aplicaciones de algoritmos genéticos en torres de transmisión (Van et al. 2022).

Gracias a los avances de la tecnología y la informática, muchos de los algoritmos son más fáciles de poderlos integrar y adaptarlos en programas como MATLAB, Python, RStudio, etc.; lo que permite analizar y obtener la visualización de modelos complejos. En el caso particular, los AG, la solución final es influenciada por los factores de diseño y su configuración inicial,. Asimismo, la calidad y la diversidad de la población inicial (*librería de perfiles*); es determinante en la convergencia del algoritmo, afectando directamente la dirección y la velocidad con las que se alcanzan soluciones adecuadas.

▪ Elitismo

El *elitismo* es una técnica empleada en AG, empleada para garantizar la calidad de las mejores soluciones y los individuos de una generación, para que sean preservados y transferidos directamente a la siguiente generación sin tener alteraciones. Esto evita la pérdida de soluciones óptimas; debido a la aleatoriedad del cruce o la mutación, asegurando que la calidad de la población no disminuya entre generaciones, manteniendo o mejorando la función objetivo (*aptitud*) de la población con el tiempo.

En la ingeniería estructural, el *elitismo* permite mantener diseños estructurales que cumplan con las normas de diseño, mientras el resto de la población va evolucionando; además, se integra el proceso de selección, para evaluar la *función de objetivo*, para evaluar el peso de la estructura, mediante la selección de los mejores perfiles y la posición de los nodos y el mejor diseño con menor peso (cuantías) (Cuevas Jiménez et al. 2016).

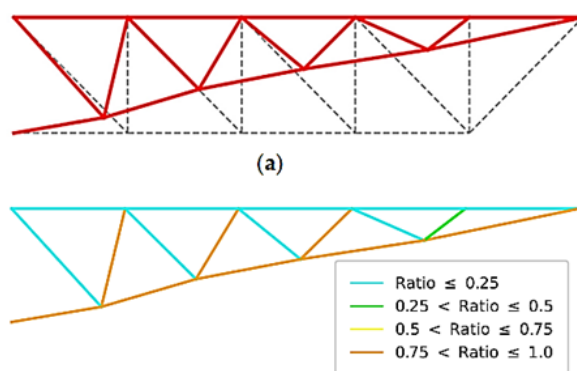


Figura 2.25. Estructura optimizada dentro de los parámetros de seguridad (Van et al. 2022).

2.3.4. Normativas y reglamentos en diseño de cerchas metálicas

En el diseño de cubiertas metálicas en 2D, se requiere un análisis riguroso de las normas de diseño para garantizar seguridad, resistencia y estabilidad. Los códigos de diseño establecen requisitos para la planificación, construcción y mantenimiento, considerando condiciones locales y enfoques internacionales, en los procesos de cálculo, diseño y construcción (Swabarna y Chinmay Kumar 2020). Los códigos de diseño más aplicables dentro del cálculo y diseño de cerchas metálicas son:

- **Resistencia a la carga.**

Establecen valores de cargas muertas, vivas, nieve, viento y sísmicas, como, por ejemplo: ASCE/SEI 7-16 (*Minimum Design Loads and Associated Criteria for*

Buildings and Other Structures), NB 1225003-1 (Acciones sobre estructuras-acción del viento parte 1 NB 1225003-1), Norma Boliviana de Acción del Granizo; (ASCE/SEI 7-16), (*Norma Boliviana de Acción del Granizo sobre las Construcciones*).

- **Especificaciones de material.**

Controlan propiedades mecánicas y durabilidad de materiales (ASTM A653, 2020).

- **Condiciones de servicio y desempeño.**

Incluyen criterios de estabilidad, limitaciones de deflexión y control de vibraciones, destacando la norma (AISI LRFD 1996) (Kaveh et al. 2020).

- **Diseño y construcción de conexiones.**

Especifican uniones soldadas y atornilladas para asegurar la capacidad de carga. Normas como ASTM A653, AISI S100 y ASCE 7-16 son cruciales para el diseño de cubiertas metálicas, influyendo en la optimización estructural (tamaño, forma, topología) (Falcon et al. 2023).

Dentro de una revisión crítica de las normas nacionales e internacionales; revela que, si bien normas como AISI y AISC, son marcos técnicos sólidos a nivel global, estas fueron desarrolladas antes los AG y la IA. En Bolivia, aunque existen pocas normas para acciones (viento, granizo) y hormigón, hay una carencia de especificaciones técnicas para los perfiles CFS, lo que genera dependencia de normas internacionales y una debilidad en el análisis local, especialmente en regiones con condiciones climáticas como la ciudad de Sucre, Bolivia. Según datos estadísticos, muestran que el 78.00% de las cubiertas metálicas usan perfiles CFS usando métodos tradicionales; mientras que el 12.00% de esos proyectos utiliza algún método de optimización computacional, limitando la reducción de peso y costos, lo que genera problemas en el presupuesto.

La *NB 1225003-1*, y la “*Norma Boliviana de Acción del Granizo*”, solo controlan la determinación de las acciones mínimas sobre las estructuras; siendo una referencia para el diseño de los componentes de las cerchas como los anclajes y el hormigón; no obstante, carecen de especificaciones técnicas para los perfiles CFS, generando una dependencia técnica a las normas internacionales. Esto representa una debilidad en cuanto al análisis dentro de un contexto geográfico y climático en la ciudad de Sucre, donde las ráfagas de viento pueden alcanzar velocidades de hasta más de 60km/hr en eventos extremos.

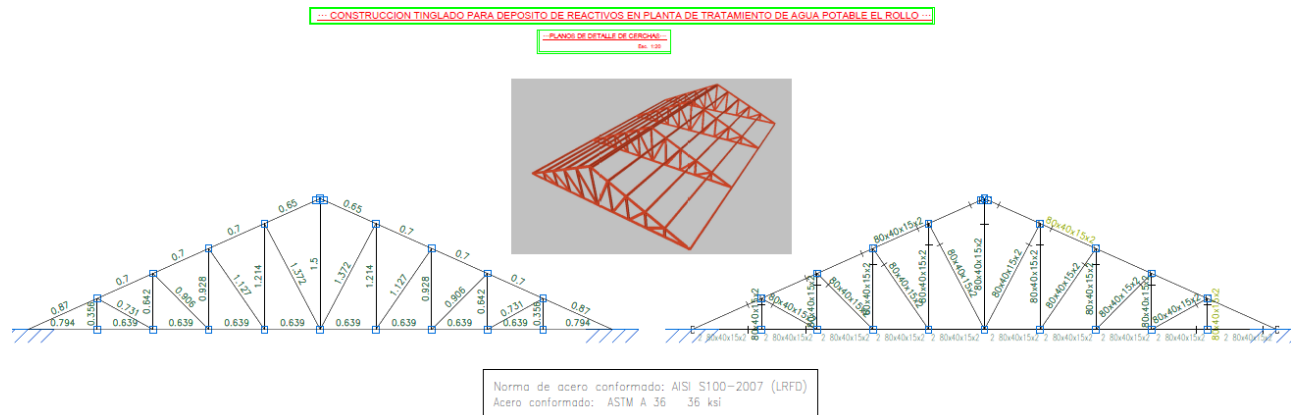


Figura 2.26. Plano constructivo de una cercha tipo sin optimización extraído del SICOES en la ciudad de Sucre, denominado como “CONSTRUCCION TINGLADO CAMPO DEPORTIVO J.V. SAN CRISTOBAL”(SICOES 2025).

Las normas bolivianas a menudo adoptan criterios más generales, lo que puede resultar en diseños sobredimensionados. Las normativas internacionales también integran criterios de sostenibilidad y fomentan el uso de software avanzado (SAP2000, ANSYS, Revit, Robot Structural, etc.) para validar los resultados obtenidos, mientras que las nacionales carecen de estas actualizaciones, afectando la precisión del diseño (Li et al. 2023).

3. Metodología

Este capítulo describe el enfoque metodológico adoptado para optimizar el diseño de cerchas metálicas 2D de cubiertas a dos aguas con perfiles conformados en frío (CFS), detallando el tipo y alcance de la investigación, materiales, herramientas, técnicas de recolección, operacionalización de variables, selección de la muestra, instrumentos de recolección de datos y los criterios de validación del modelo numérico.

La metodología combina modelación numérica usando FEM, para la optimización de las cerchas en 2D usando algoritmos genéticos y validación comparativa en SAP2000, en un contexto de *investigación aplicada y experimental computacional*. La *función objetivo* del algoritmo genético es minimizar el peso total de la cercha "*W*" suma de los pesos por barra/perfiles; sujeto a restricciones de las normas y las combinaciones de las cargas de resistencia y servicio; donde no se incluye el costo total de toda la cercha como objetivo, es decir, mano de obra, prefabricación, transporte, logística, etc.

3.1. Tipo y enfoque de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

El presente documento es una “*investigación aplicada y cuantitativo*”; porque desarrolla e implementa un modelo computacional “MARVALL” creado para optimizar el diseño estructural de cubiertas metálicas en 2D, usando perfiles CFS, mediante algoritmos genéticos, aplicados en la ciudad de Sucre. Su enfoque *explicativo* analiza la relación entre cargas de diseño y el comportamiento estructural. Este trabajo no solo genera conocimiento teórico; también *resuelve problemas técnicos*, mejorando el comportamiento estructural y *reduciendo peso (cuantías)* bajo cargas aplicadas en la ciudad de Sucre.

La investigación es *cuantitativa* se sustenta la formulación matemática, en la recolección y análisis de *datos numéricos* de simulaciones y procesos evolutivos, verificados en gráficas de convergencia.

3.1.2. Enfoque metodológico

El enfoque adoptado es “*cuantitativo, experimental–computacional*”, usando modelos numéricos, representando el comportamiento estructural de la cercha y el uso de algoritmos evolutivos para su optimización.

Se utiliza un modelo estructural de una cercha en 2D, aplicando FEM para el cálculo de las soluciones generadas por el algoritmo genético; el análisis es implementado en el software MATLAB r2022b, el cual usa 3 scripts compuesto por 2 módulos para el análisis, diseño y el algoritmo genético. Dicho experimento computacional se desarrolla a través de un proceso iterativo de una generación de poblaciones, evaluando por medio de la *función objetivo*, bajo las condiciones de carga más preponderantes de viento y granizo en la ciudad de Sucre. La validación de este enfoque se realiza mediante una comparación de los resultados obtenidos en MATLAB con un modelo desarrollado en SAP2000 v24, bajo las mismas propiedades de material, secciones transversales, condiciones de apoyo y combinaciones de carga. Esta comparación valida la etapa de calibración numérica del modelo, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

3.1.3. Alcance y nivel de investigación

El alcance de la investigación es “*explicativo, aplicado y correlacional*”, analizando cómo las combinaciones geométricas y topológicas de perfiles metálicos afectan el desempeño estructural (peso, resistencia, rigidez, estabilidad), donde se busca explicar cómo la optimización evolutiva mejora estas relaciones causa-efecto entre *variables de entrada* (geometría, propiedades, cargas) y *variables de salida* (desempeño). Académicamente, esta investigación se clasifica en los siguientes niveles:

- **Investigación aplicada:** Orientada a resolver un problema técnico real en el diseño de cubiertas metálicas usando tecnologías computacionales, normas de diseño y la aplicación de los AG.

- **Investigación correlacional-explicativa:** Analiza la influencia de parámetros de diseño y resultados de simulación numérica, evaluando la influencia de variables geométricas, mecánicas y topológicas en la eficiencia estructural.
- **Investigación experimental computacional:** Aplica modelos numéricos y simulaciones computacionales como experimentos virtuales, donde se modifican los parámetros del AG para evaluar su efecto en la solución óptima.

Las simulaciones y las optimizaciones de las cerchas, tienen un nivel tecnológico, ya que tienen principios científicos y técnicas computacionales, para proponer una herramienta replicable en el diseño óptimo de cerchas metálicas. El análisis se plantea como un estudio de caso representativo, cuyo objetivo principal es validar y demostrar la aplicabilidad del modelo MARVALL en una cercha 2D típica.

3.2. Materiales y recursos utilizados

Esta investigación requirió materiales de escritorio, computadoras y documentos de referencias bibliográficas. Se usaron para formular el problema estructural, implementar el algoritmo genético, realizar la simulación del comportamiento de la cercha metálica 2D y posterior validación de los resultados con un modelo estructural de referencia.

3.2.1. Materiales de gabinete

Se emplearon *planos estructurales*, *memorias de cálculo* y *catálogos de perfiles “C”* de empresas y entidades públicas. Esta información definió los parámetros geométricos, condiciones de apoyo, condiciones de carga y disposición de los nodos de la cercha.

Además, se usaron *manuales y normativas* (ASCE 7-16, AISI LFRD96, NB 1225003-1, Norma Boliviana de Granizo); estos documentos proporcionaron criterios de diseño para los perfiles CFS, las combinaciones de carga, los criterios de resistencia y servicio, y los límites de esbeltez y desplazamiento que el modelo de optimización debe cumplir.

3.2.2. Recursos computacionales

Para la implementación del modelo computacional y la optimización estructural, se empleó MATLAB r2022b, donde se desarrollaron los scripts del código del AG para el diseño de

cubiertas metálicas. Adicionalmente, se usaron programas complementarios: AutoCAD y Revit para planos; MathCad Prime y MS Excel para manejo de datos; SAP2000 v24 para la validación de los resultados del AG. A continuación, se describen algunos requisitos para el funcionamiento del AG, destacando:

- **Sofwares utilizado:** MATLAB r2022b, SAP 2000 v24, MathCad Prime v10.0; Microsoft Excel v2013.
- **Hardware del sistema operativo mínimo:** **Sistema operativo:** Windows 7 SP1 o superior, **Procesador:** Intel o AMD x86-64, recomendado corei5 de 7ª generación, **Disco:** 2 GB solo para MATLAB, recomendado 4-6 GB para una instalación, **RAM:** 1 GB mínimo, 4 GB recomendado, **Tarjeta gráfica:** Soporte para OpenGL 3.3 recomendado con 1 GB en GPU.
- **Material bibliográfico y documental:** Artículos científicos de bases indexadas (Scopus, ScienceDirect, Springer, Redalyc, SciELO), libros especializados en diseño estructural metálico, optimización estructural, y algoritmos genéticos, monografías y tesis relacionadas con el tema de investigación.
- **Gestores bibliográficos e información:** “Zotero” para la organización de referencias y bibliografía utilizada en el diseño del modelo y validación de resultados.

3.2.3. Datos estructurales

La investigación utilizó datos estructurales de referencia (bibliografía, fichas técnicas) relacionados con las propiedades mecánicas de perfiles CFS; se destacan las siguientes:

- *Densidad del acero, $\gamma=7850 \text{ kg/m}^3$*
- *Módulo de elasticidad, $E=200\,000 \text{ Mpa}$*
- *Esfuerzo de fluencia, $f_y = 248.211 \text{ Mpa}$ o 36 ksi (porque el acero es A36)*
- *Esfuerzo último de fluencia, $f_u = 400 \text{ Mpa}$*
- *Relación de esbeltez máxima a tracción, $E_t = 300$*
- *Relación de esbeltez máxima a compresión, $E_c = 200$*
- *Factor de la longitud efectiva, $K = 1.00$*

Se aplicaron combinaciones de carga ASCE 7-16 y normativas bolivianas, adaptadas a Sucre; las cargas de diseño son:

- *Carga muerta (peso propio de la estructura): 5 a 15 kg/m²*
- *Carga viva (peso el uso continuo): 0 kg/m²*
- *Carga viva de mantenimiento: 40 a 50 kg/m²*
- *Carga de granizo (para la ciudad de Sucre): 110 kg/m²*
- *Carga de viento (obtenido de datos SENAMHI): 32.40 m/s o 116.64 km/hr*

Las restricciones estructurales y las normativas

- *Límites de flecha admisibles: $\Delta = L/300$ siendo la separación de extremos de la cercha, para la condición de la carga de servicio.*
- *Condiciones de apoyo: simplemente apoyadas con apoyos fijos o móviles en la dirección “x”.*

3.3. Métodos y técnicas de investigación

La investigación de desarrollo con un “*método cuantitativo, experimental computacional*”, basado en la formulación matemática del problema estructural y su resolución mediante modelos numéricos y el uso de AG; el procedimiento comprende las siguientes etapas:

- Una formulación del modelo estructural bidimensional de la cercha metálica, empleando el método de rigidez, la elaboración de la *función objetivo*, creada para la minimización el peso total de la cercha y el cumplimiento de las normas de diseño.
- La aplicación de los AG, para generar y mejorar la configuración de la cercha, de acuerdo a las iteraciones, la selección de los perfiles y la variación de la posición de los nodos; en base a una evaluación numérica del análisis estructural, para una posterior validación y comparación de la solución ideal con un modelo equivalente en SAP2000.

Esta secuencia metodológica fue sacada de acuerdo a las recomendaciones de las referencias bibliográficas, para los problemas de optimización estructural, en el caso de estructuras reticuladas con perfiles CFS. El comportamiento estructural de la cercha se representa mediante un modelo bidimensional (2D) formulado con el método de rigidez:

- Los elementos se idealizan como barras articuladas en sus extremos, sometidas a esfuerzos axiales de tracción y compresión; cada barra se caracteriza por su longitud, área de sección transversal, módulo de elasticidad y ángulo de inclinación; a partir de las matrices de rigidez locales y la transformación se construye la matriz de rigidez global del sistema; sobre el modelo global se aplican las combinaciones de carga, resolviendo el sistema de ecuaciones para obtener los desplazamientos nodales; con los desplazamientos calculados se determinan los esfuerzos axiales en cada elemento.

3.3.1. Optimización mediante algoritmos genéticos

En esta investigación se aplican los AG codificados en MATLAB r2022b; para poder resolver los problemas de diseño estructural con variables discretas, donde cada solución representa un cromosoma, cuyos genes codifican el perfil seleccionado para cada barra de la cercha, las cuales se encuentran dentro de una base de datos (librería).

La “*función de aptitud*” o “*función de objetivo*” (*fitness function*) busca un equilibrio entre peso total de la estructura, la relación carga, resistencia, longitudes, distribución de nodos, conectividad de elementos y el cumplimiento de normas diseño relacionados con los esfuerzos y deformaciones admisibles, evaluadas en cada iteración. Para calibrar el algoritmo genético (AG) en MATLAB R2022b, se ajustaron parámetros clave: tamaño de población, generaciones, tasas de cruzamiento y mutación, y elitismo.

▪ ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS.

Con el propósito de garantizar la confiabilidad del modelo de optimización desarrollado en MATLAB, se desarrolló un análisis de sensibilidad de los principales parámetros del AG y una calibración del modelo de SAP2000.

Para todas las pruebas de sensibilidad se mantuvieron fijos los datos geométricos de la cercha, las cargas de diseño, la librería de perfiles; de igual manera se mantuvieron constantes la población genética y el número máximo de generaciones, realizando variaciones de los parámetros del AG, adoptando valores extremos para evidenciar su influencia sobre la convergencia del proceso y el peso mínimo alcanzado.

A continuación, se describen las pruebas realizadas y las observaciones más relevantes.

▪ Pruebas con casos extremos de Elitismo

Se analizó el efecto del *elitismo* sobre el comportamiento del algoritmo. Para ello se realizaron tres corridas con valores extremos:

Tabla 3.1. Pruebas de sensibilidad del parámetro del Elitismo “E”

Prueba	Valor de elitismo “E”	Peso mínimo de la cercha (kg)	Detalles
Prueba 1 ($E = n$)	($E = 10$)	El peso es aproximadamente 667.3119 kg en todas las generaciones	Se copian todos los individuos de la población inicial a la siguiente generación (elitismo total).
Prueba 2 ($E = 0$)	($E = 0$)	El peso oscila aproximadamente entre 728.7847 y 671.7969 kg	Sin elitismo donde ningún individuo está protegido, toda la población puede ser reemplazada.
Prueba 3 ($E = n - 1$)	($E = 1$)	El peso está en aproximadamente 674.2364 kg a 670.5573 kg	Se conserva toda la élite menos un individuo; casi toda la población de mejor desempeño pasa a la siguiente generación.

Nota: Pruebas de los diferentes tipos de elitismo (Elaboración propia).

En todas las pruebas se fijó el tamaño de población en 80 individuos y se mantuvieron constantes las probabilidades de cruce y mutación utilizadas en el modelo de referencia.

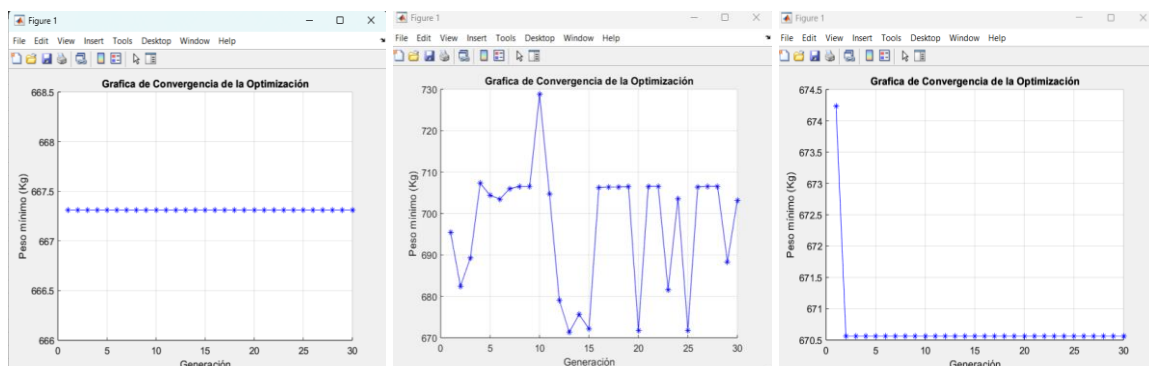


Figura 3.1. Curvas de convergencia usando diferentes casos de Elitismo (Elaboración propia).

A partir de estas tres pruebas se concluye que ninguno de los casos extremos es adecuado; la conservación de buenas soluciones y la diversidad, se adoptó un elitismo moderado de ($E = 1.00$) que asegura la preservación del mejor individuo de cada generación, sin impedir la exploración del espacio de búsqueda.

▪ Pruebas con casos extremos de probabilidad de cruce

El segundo conjunto de pruebas analizó la influencia de la probabilidad de cruce P_c considerando los casos extremos:

Tabla 3.2. Pruebas de sensibilidad del parámetro de la probabilidad de cruce P_c

Prueba	Probabilidad de cruce P_c	Peso mínimo de la cercha (kg)	Detalle
Prueba 4	$P_c = 1.00$	De 689.2431 kg a 671.1155kg, luego se estabiliza.	Cruce en todos los apareamientos, siempre se realiza recombinación entre los padres.
Prueba 5	$P_c = 0.00$	Aproximadamente 667.5408 kg casi constante en todas las generaciones.	Sin cruce, no hay recombinación; sólo copia y mutación de individuos.

Nota: Pruebas de los diferentes tipos de probabilidad de cruce (Elaboración propia).

En ambas corridas se mantuvieron constantes el tamaño de población, el elitismo y la probabilidad de mutación.

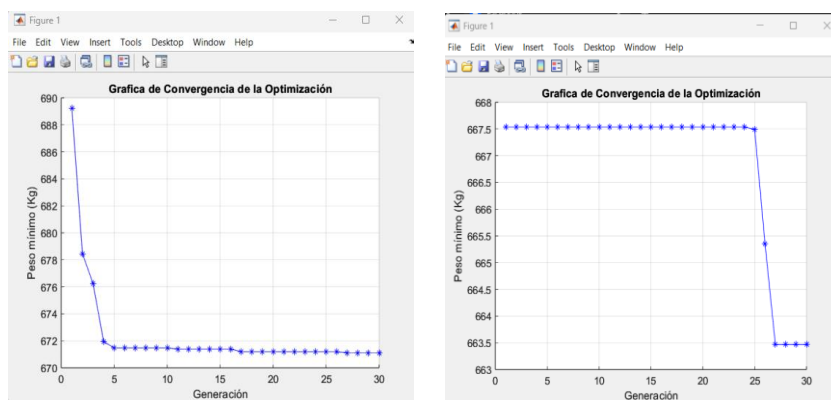


Figura 3.2. Curvas de convergencia usando diferentes casos de la probabilidad de cruce (Elaboración propia).

Los resultados muestran que la probabilidad de cruce es un parámetro que ayuda en la convergencia hacia soluciones de menor peso. Por este motivo, se adoptó una probabilidad de cruce $P_c = 1.00$; garantizando la máxima mezcla de genes en cada generación.

▪ Pruebas con casos extremos de probabilidad de mutación

Finalmente, se evaluó la influencia de la probabilidad de mutación P_m ; considerando el caso extremo, el peso mínimo de la cercha disminuye inicialmente, desde 692.9959 kg hasta alrededor de 671,9661 kg y luego permanece prácticamente constante. Este resultado indica que, sin la mutación, el cruce permite cierta mejora inicial; sin embargo, la ausencia de la mutación reduce la *diversidad de la población*, estancando las soluciones subóptimas.

En consecuencia, se adoptó una probabilidad de mutación moderada de 5.00%, suficiente para preservar la diversidad genética sin introducir un comportamiento excesivamente aleatorio en la búsqueda.

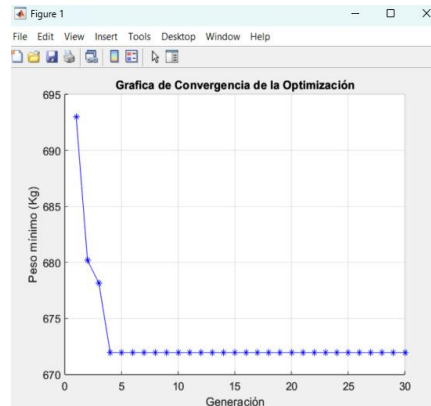


Figura 3.3. Curvas de convergencia cuando la probabilidad de mutación es 0 (Elaboración propia).

Finalmente, se hace una comparación de la diferentes grafica de convergencia, para poder calibrar los parámetros del algoritmo genético, además para poder apreciar, las variaciones del elitismo, probabilidad de cruce y la probabilidad de mutación como se muestra a continuación:

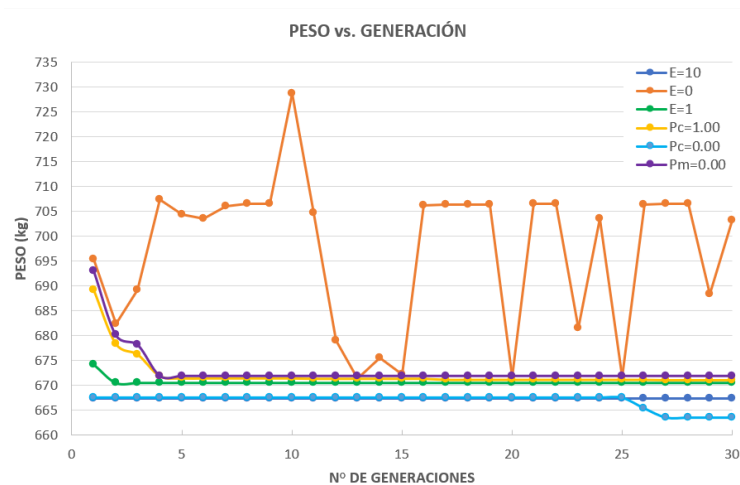


Figura 3.4. Comparación de la diferentes graficas de convergencia de acuerdo a las variaciones del elitismo, probabilidad de cruce y mutación (Elaboración propia).

Estos valores se basaron en pruebas de sensibilidad y las restricciones computacionales del problema estructural, los parámetros para del algoritmo son:

- *Función objetivo*, $f(x) = \min(\text{Peso})$ cumpliendo $\sigma \leq \sigma_{adm}$, $\delta \leq \delta_{max}$
- *Número de individuos genéticos de la población*, $n_{pob} = 80$

- *Elitismo*, $E = 1.00$
- *Probabilidad de cruce*, $P_c = 1.00$
- *Probabilidad de mutación*, $P_m = 0.05$
- *Rango de mutación*, $R_m = 1.00$
- *Porcentaje de finalización*, $\%f_m = 95.00 \%$
- *Tolerancia*, $Tolerancia = 0.00004 \text{ } m/m$
- *Número máximo de generaciones*, $N_{GEN} = 30.00$
- *Método de selección*, $Método = \text{Ruleta}$

Tabla 3.3. Parámetros del algoritmo y su justificación.

Parámetro	Valor Adoptado	Rango Analizado	Justificación
Número de individuos genéticos de la población, n_{pob}	80.00	30 – 100	Se evaluaron diferentes tamaños. Se eligió 80 ya que ofreció buen equilibrio entre diversidad genética y tiempo de cómputo.
Elitismo E	1 individuo	1.00 – 2.00	Se conserva el mejor individuo de cada generación, equivalente al 1.25 % de la población.
Probabilidad de cruce P_c	1.00 (100 %)	0.50 – 1.00	Asegura una alta mezcla genética por generación, útil en problemas de búsqueda discreta como la selección de perfiles.
Probabilidad de mutación P_m	0.05 (5 %)	0.01 – 0.10	Introduce variabilidad controlada para evitar convergencia prematura.
Rango de mutación R_m	1.00		Aplica mutación sobre todos los genes posibles con la probabilidad definida.
Porcentaje de finalización $\%f_m$	0.95 (95.00%)		Se establece como umbral de convergencia para detener el algoritmo si se alcanza el 95.00 % de estabilidad poblacional.
Tolerancia de convergencia	0.00004		Define el cambio mínimo aceptable en la función objetivo entre generaciones consecutivas para detener el proceso
Número máximo de generaciones N_{GEN}	30.00	20 – 1000	Se estableció como criterio de convergencia junto al porcentaje de finalización para evitar iteraciones innecesarias una vez alcanzada la convergencia.

Nota: Esta tabla fue sacada del análisis de los parámetros del algoritmo genético (Elaboración propia).

El máximo número de generaciones fue 30, la tolerancia 0.0004 y el porcentaje de finalización 0.95; esto provocó una convergencia temprana del algoritmo. Los valores se

establecieron tras pruebas internas y validaciones con ejemplos de referencia, considerando investigaciones previas recomendadas por (Tejani et al. 2018; Kaveh y Zaerreza 2020).

La *función objetivo* se diseñó para minimizar el peso total de la estructura, penalizando al mismo tiempo aquellas soluciones que superen o excedan las restricciones de las normas.

$$f(x) = W_{(x)} + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot Penalización_i(x) \quad (3.1)$$

Donde: $W_{(x)}$ es el peso total de la estructura generada por una solución (x) ; $Penalización_i(x)$ es la penalización si no cumple alguna de las condiciones de esfuerzo o desplazamiento; α_i es el coeficiente de la (10^6) . Dentro de las penalizaciones incluidas, se pueden describir las más importantes:

- Esfuerzos admisibles: $\sigma > \sigma_{admin} \rightarrow Penalización_1 > 0$
- Desplazamientos máximos: $\delta > \delta_{max} \rightarrow Penalización_2 > 0$
- Estabilidad (esbeltez/pandeo): $\lambda > \lambda_{max}$

3.3.2. Simulación estructural computacional

El desempeño estructural de las configuraciones del algoritmo se evaluará mediante simulaciones numéricas en SAP2000 v24. Las simulaciones computacionales permiten verificar las soluciones propuestas por el algoritmo genético. Cada modelo será sometido a cargas combinadas, según normas como ASCE 7-16, para determinar las cargas:

- **Carga muerta** (*peso propio de la estructura*).
- **Carga viva** (*uso*).
- **Carga viva de mantenimiento** (*mantenimiento*).
- **Carga de nieve** (*peso*).
- **Carga de granizo** (*peso*).
- **Carga de viento** (*presión variable según zona e incidencia, barlovento y sotavento*).

Para el desarrollo y la efectividad de los resultados del algoritmo, se evaluaron los siguientes parámetros:

- *Desplazamientos máximos en nudos críticos.*
- *Factores de carga aplicados y de resistencia (según LRFD).*

- *Esfuerzos internos en miembros principales.*
- *Deflexiones admisibles según límites de servicio.*

3.4. Operacionalización de variables

La *operacionalización de variables* vincula el marco teórico con los modelos de optimización, reflejados en *indicadores medibles*. En esta investigación se identificó y analizó variables clave que influyen en el comportamiento estructural y el desempeño de los modelos de optimización usando AG, de acuerdo a su categoría y su operación.

3.4.1. Variables independientes y dependientes

Se realizó un análisis de las variables independientes y dependientes, las cuales servirán en la investigación, que se detallan en la **Tabla 3.5** a continuación:

Tabla 3.4. Operacionalización de variables.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES	INDICADOR	INSTRUMENTO
Variable independiente	Coordenadas nodales (X, Y)	Geometría estructural	Variación de posición nodal	Hoja de cálculo (Excel), código MATLAB
Variable independiente	Tipo de perfil “C”, “2C” y “2C+pletinas”	Sección transversal	Índice de perfil asignado por el algoritmo	Librería de perfiles estructurales (Excel)
Variable independiente	Esbeltez permitida	Estabilidad estructural	$\lambda_x = L/r_x$ $\lambda_y = L/r_y$	Normativa técnica AISI
Variable dependiente	Peso total de la estructura	Consumo de material	Suma del peso (kg) de todos los elementos $w = \gamma_i \cdot A_i \cdot L_i$	Script (MATLAB) función <code>calcular_peso()</code>
Variable dependiente	Esfuerzos internos	Resistencia estructural	Esfuerzos de tracción y compresión de los elementos σ_t, σ_c	Análisis estructural (ANALISIS.m)
Variable dependiente	Desplazamientos nodales	Comportamiento en servicio	Desplazamientos nodales $\delta_{\max}$ (mm)	Script (MATLAB) <code>DISENO.m</code> + tabla de desplazamientos

Nota: Esta tabla fue realizada en función del análisis y el enfoque (Elaboración propia).

3.4.2. Definición conceptual y operativa

Tabla 3.5. Tabla de la definición conceptual y operativa

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERATIVA
Coordenadas nodales (X, Y)	• Posición de los nodos que forman la armadura en el plano 2D.	• Valores que se ajustan en el algoritmo para cambiar la forma de la estructura.

Tipo de perfil	Tipo de barra metálica usada en cada elemento (según su forma y resistencia).	Se elige automáticamente de una tabla de perfiles según resistencia y esbeltez.
Esbeltez permitida	Relación máxima aceptada entre la longitud no arriostrada y el radio de giro del perfil, conforme a normativas estructurales.	Se calcula como relación entre longitud y rigidez. Se compara con lo permitido por norma.

Tabla 3.5. Tabla de la definición conceptual y operativa (continuación)

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERATIVA
Esbeltez permitida	Relación máxima aceptada entre la longitud no arriostrada y el radio de giro del perfil, conforme a normativas estructurales.	Se calcula como relación entre longitud y rigidez. Se compara con lo permitido por norma.
Peso total de la estructura	Masa combinada de todos los perfiles empleados en la estructura, asociado al consumo de material.	Calculado como la longitud de cada barra por su peso por metro. Es el valor que se busca minimizar.
Esfuerzos internos	Fuerzas axiales desarrolladas en los elementos estructurales debido a la aplicación de cargas externas.	Calculados mediante análisis matricial por rigidez, se verifica que la tracción y compresión, cumplan con la resistencia del material para validación.
Desplazamientos nodales	Movimiento que tiene cada nodo al aplicarle cargas.	Se calcula en cada simulación, cuyo valor debe estar dentro de un límite.
Índice de eficiencia estructural	Se aprovecha cada perfil sin pasarse de su capacidad.	Índice calculado como: $\eta = \sigma / \sigma_{adm}$

Nota: Esta tabla fue elaborada a partir del análisis realizado (Elaboración propia).

3.4.3. Criterios de evaluación estructural y de optimización

Para la validez y eficacia del modelo propuesto, se establecieron los siguientes criterios basados en normas de diseño y los criterios de optimización, detallados a continuación:

Tabla 3.6. Criterios de evaluación estructural y de optimización

CATEGORÍA	CRITERIO	DESCRIPCIÓN TÉCNICA	REFERENCIA
Resistencia	Esfuerzo en tracción admisible	La barra debe resistir la tracción sin exceder su límite elástico. $\sigma_t \leq 0.90 \cdot F_y$	AISI S100-16
	Esfuerzo en compresión admisible	Considerando esbeltez y modo de pandeo del perfil. $\sigma_c \leq 0.85 \cdot F_c$	AISI S100-16
	Esbeltez crítica	Depende del esfuerzo está en tracción o compresión $\lambda = L/r \leq \lambda_{adm}$	CIRSOC 301/303, NSR-10
Servicios	Desplazamiento nodal admisible	El criterio personalizado según función estructural $\delta_{max} = L/300$	ASCE 7-16
Eficiencia	Peso total mínimo	Se busca minimizar el peso estructural total sin comprometer la resistencia.	Diseño función objetivo del AG

CATEGORÍA	CRITERIO	DESCRIPCIÓN TÉCNICA	REFERENCIA
	Índice de aprovechamiento	Se considera eficiente si el perfil se usa casi al máximo $\eta = \frac{\sigma}{\sigma_{adm}} \approx 0.85 - 0.95$	AISI optimización
	Convergencia del algoritmo	La solución óptima debe estabilizarse usando la condición $diferencia < tolerancia\ predefinida.$	Algoritmo Genético MARVALL

Nota: Esta tabla fue elaborada a partir del análisis realizado (Elaboración propia).

3.5. Población y muestra

El enfoque metodológico es *cuantitativo y experimental*, debido a que se analiza una población estructural de cubiertas de 2 aguas y una muestra representativa que permita aplicar el modelo de optimización; para que puedan modelarse, analizarse y optimizarse virtualmente a través de simulación computacional, con criterios técnicos de acuerdo a normas de diseño. A continuación, se describe la delimitación y los casos de estudio.

3.5.1. Población: estructuras metálicas utilizadas en cubiertas

La población del objeto de estudio está conformada por las estructuras metálicas en 2D que tienen 2 pendientes (2 aguas) utilizadas en cubiertas de edificaciones públicas y privadas en el área urbana de la ciudad de Sucre. Este tipo de estructuras metálicas compuestas por correas y perfiles CFS (“C”, “2C” y “2C +pletinas”) y su configuración puede variar de acuerdo a las condiciones del lugar, el tipo de cubierta, y el método constructivo.

3.5.2. Delimitación geográfica: ciudad de Sucre

El área de estudio se delimita geográficamente a la ciudad de Sucre (Bolivia), a una altitud promedio de 2,800.00 msnm. Esta región presenta condiciones climáticas particulares:

- Vientos de 32.40 m/s = 116.64 km/hr según el SENAMHI (2024).
- La carga de granizo de 110 kg/m² (con acumulación hasta de 50 cm).

Estas condiciones influyen directamente en el diseño estructural de cubiertas metálicas en 2D, lo que justifica la aplicación de metodologías de optimización estructural.

3.5.3. Casos de estudio seleccionados

Para la realización de esta investigación se analizaron tres (3) tipologías de cerchas de cubiertas, elegidas por su mayor uso en el ambiente geográfico, su representatividad estructural y la parametrización del modelo.

- Los modelos elegidos representan las tipologías de cerchas con mayor uso en Sucre, Bolivia; la cercha metálica de 2 aguas en residencias, comerciales, tinglados, etc.
- Se permiten múltiples variaciones internas modificando geometría nodal, perfiles, longitud, pendiente y separación de apoyos.
- La investigación prioriza la calidad analítica y exploración óptima, enfocándose en soluciones estructurales diferentes, mediante la comparación de los 3 tipos de cerchas.
- El análisis del tipo de cubiertas, se lo ha categorizado en celosía tipo PRATT, tipo HOME y tipo WARREN.

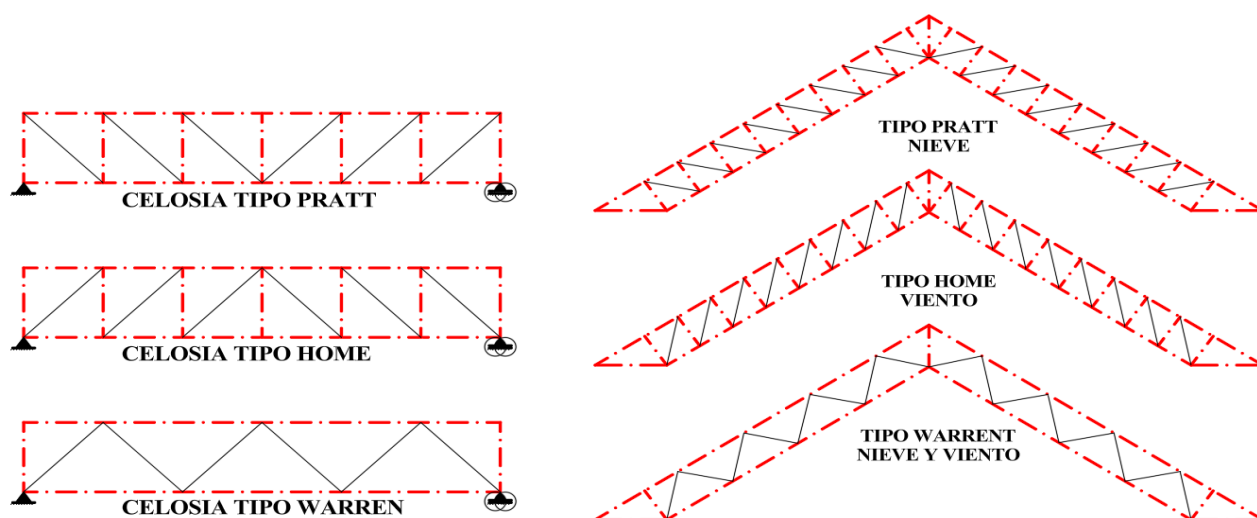


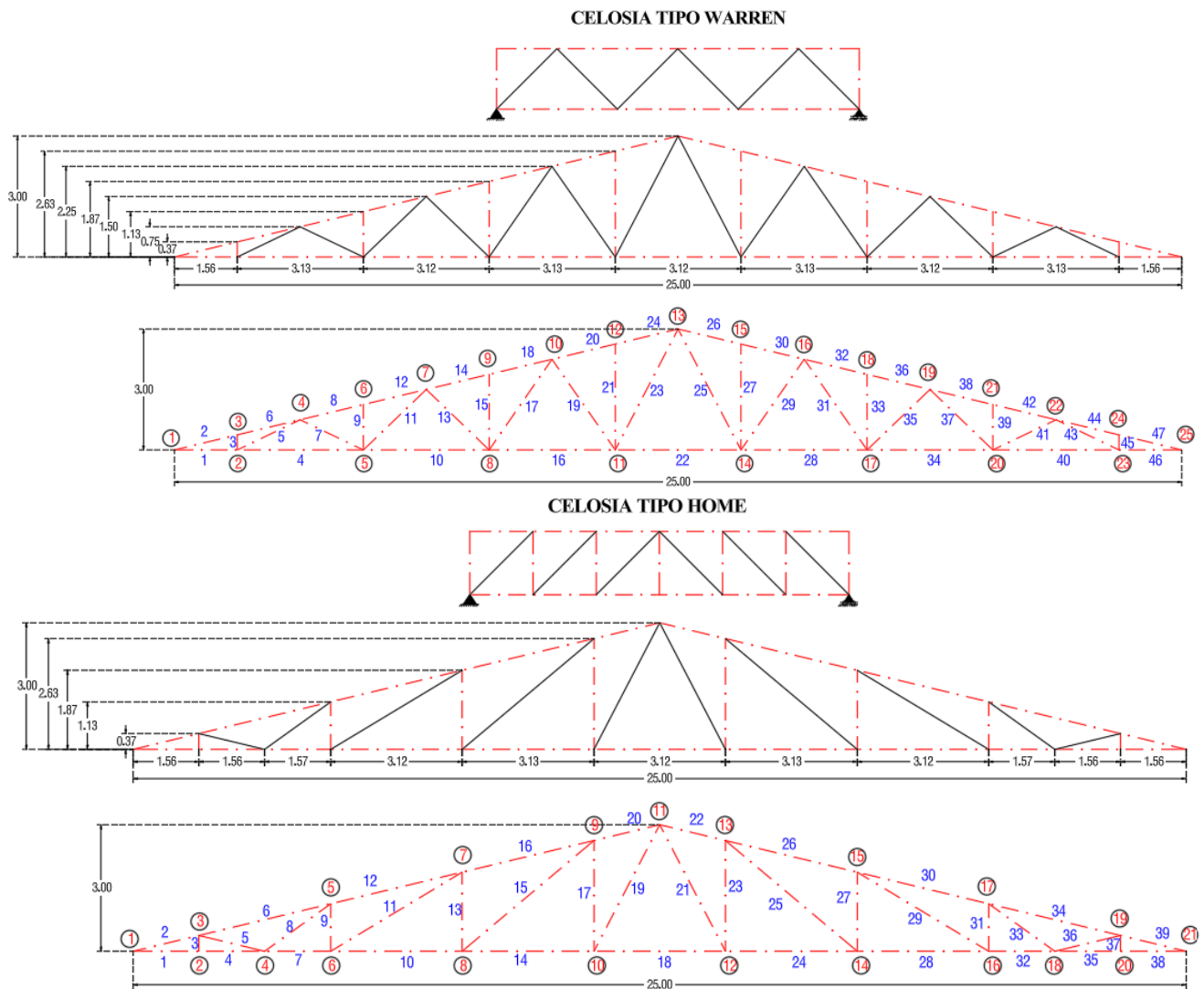
Figura 3.5. Idealización de las tipologías de las celosías de acuerdo a las cargas de diseño (Elaboración propia)

Dentro de la descripción del caso de estudio, se describen las siguientes características:

- *Estructura:* Cercha metálica a dos aguas (doble pendiente).
- *Tipología:* PRATT, HOME, WARREN.
- *Distancia entre apoyos:* 25.00 metros
- *Altura de cumbrera:* 3.00 metros.
- *Inclinación de pendientes:* 13.5° siendo $\leq 15^\circ$ se asume el 100 de la carga de granizo
- *Tipo de perfiles:* costaneros “C”, doble costaneros o cajón “2C” y “2C + pletinas”

- *Condiciones de carga:* carga muerta, viva de mantenimiento, granizo y viento
- *Condiciones de apoyo:* Articulaciones en ambos extremos (simples apoyos).
- *Configuración variable:* Posiciones nodales, tipo de perfil, separación entre elementos.

Los modelos se implementaron en MATLAB, por medio del uso de una base de datos en Excel, para la simulación y optimización usando el script MARVALL. Esta elección permite obtener resultados concluyentes para el diseño eficiente de cubiertas metálicas, mediante una comparación de las tipologías, como se muestran en la **figura 3.6**.



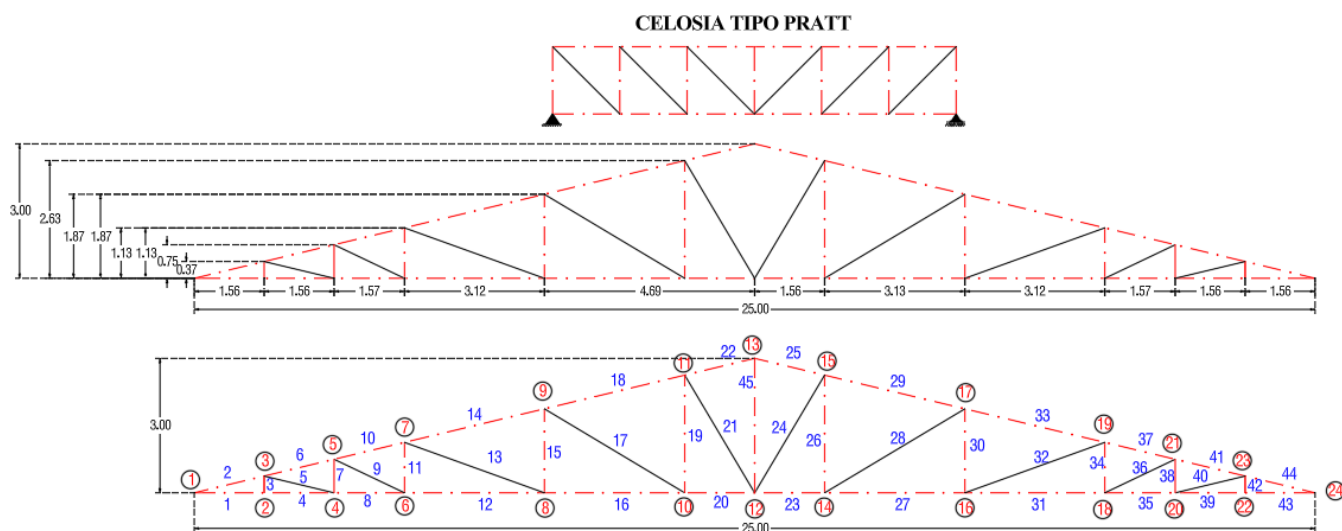


Figura 3.6. Tipologías de las cerchas que serán analizadas, cercha tipo Warren, Home y Pratt (Elaboración propia).

3.6. Muestreo y diseño experimental

Este tipo de investigación tiene un *enfoque experimental-computacional*, debido a que el muestreo no es físico, sino virtual, realizando el análisis de 3 tipos de cerchas, tipo Pratt, tipo Home y tipo Warren; debido a que son las más recurrentes y de mayor uso en la ciudad de Sucre; el diseño se hará a través de simulaciones usando AG, para buscar y validar el modelo de optimización estructural más adecuado, evaluando múltiples soluciones de diseño de acuerdo a normas. A continuación, se detalla el tipo, tamaño y justificación del muestreo:

3.6.1. Tipo de muestreo

Se utilizó un “*muestreo no probabilístico*” de tipo *intencional* o por *conveniencia*, se utilizó un muestreo no probabilístico intencional, apropiado para investigaciones técnicas (Hernández Sampieri et al. 2014). Este garantiza la representación técnica de los casos de optimización estructural, aunque sin estadísticas generales; la selección de las estructuras depende de los criterios técnicos:

- Tipología de las cerchas (Warren, Home y Pratt).
- Rango de coordenadas nodales.
- Librería de perfiles conformados en frío.

- Restricciones geométricas y estructurales (esbeltez, carga, apoyo).
- Acceso a información detallada (planos, memorias de cálculo, cargas aplicadas).

3.6.2. Tamaño y justificación de la muestra

El tamaño de la muestra no obedece a datos estadísticos tradicionales, pues no se trabaja con población física, sino con modelos a partir de AG. Por tanto, la muestra incluye todas las configuraciones estructurales de la cerchas creadas, evaluadas y optimizadas durante el proceso evolutivo. A partir del script “MARVALL.m”, el tamaño de la muestra es el resultado del producto entre los parámetros del algoritmo, como ser: *número de individuos* ($n_{igp} = 80$) y el *número máximo de generaciones* ($n_{max\ gen} = 30$), por tanto, el resultado es:

$$Muestra_{total} = n_{igp} * n_{max\ gen} = 240 \quad (3.2)$$

La justificación de este muestreo radica en que cada configuración es una solución posible, definida por las coordenadas nodales, perfiles y cargas. Además, el AG requiere muchos individuos y generaciones para converger, representando la selección, cruzamiento y mutación en la solución ideal. Este enfoque permite una representación adecuada del comportamiento estructural de cerchas metálicas en 2D; en el contexto geográfico de Sucre.

3.6.3. Diseño del experimento computacional

El experimento computacional se realizó en procesos de iteración de una simulación y optimización estructural, cuyo objetivo es minimizar el peso de las armaduras metálicas. El experimento se basa en un modelo estructural paramétrico 2D de cercha a dos aguas, donde se hacen variar los nodos (independientes), la selección de perfiles (base de datos .xlsx) y la configuración de la topología interna. El AG trabajó con una población inicial de **80 individuos** que evolucionaron en **30 generaciones**. Cada configuración se evaluó mediante análisis de rigidez de barras (esfuerzos internos, desplazamientos nodales, criterios de las normas: esbeltez, tracción, compresión, límites de servicio).

Las soluciones no admisibles fueron penalizadas por la *función objetivo*, cuya meta es reducir el peso; no obstante, el proceso evolutivo incorporó la selección (elitismo y ruleta), cruce y mutación aleatorios, con un *límite de 30 generaciones*, donde se obtuvo una

convergencia que cumple con las restricciones, analizando 240 configuraciones para encontrar la mejor solución del modelo estructural, a continuación, se muestra el flujo de trabajo computacional realizado para el desarrollo de la investigación:

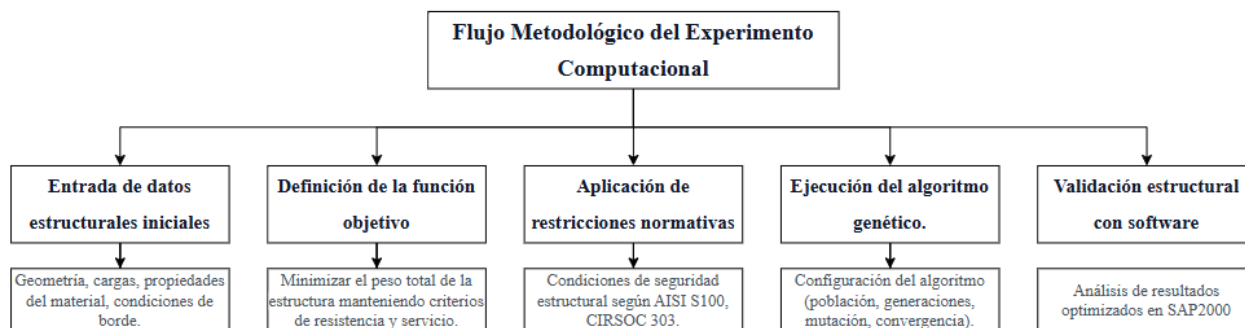


Figura 3.7. Flujo metodológico para la investigación (Elaboración propia).

A continuación, se muestra el diagrama de flujo del script “MARVAL.m”, el cual fue utilizado para el desarrollo de los procesos de optimización en la **figura 3.8**.

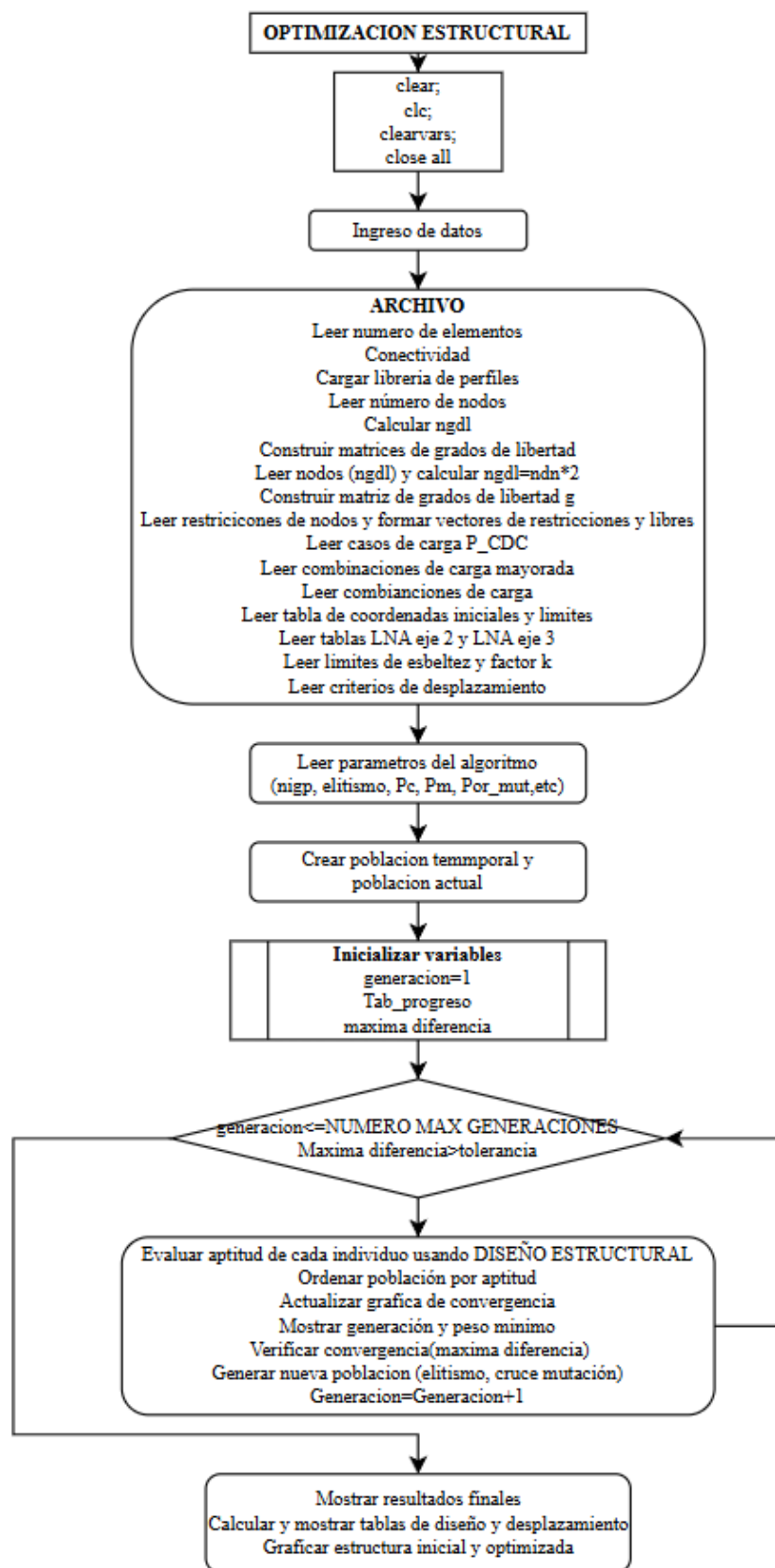


Figura 3.8. Diagrama de flujo del algoritmo genético (Elaboración propia).

3.7. Limitaciones del modelo estructural

El modelo estructural se limita a una aproximación numérica del comportamiento de una estructura bidimensional o 2D, para una cercha de 2 aguas compuesta por perfiles CFS, con barras articuladas, cuyos grados de libertad son horizontales y verticales; motivo por el cual no se contempla un análisis de estructuras tridimensionales o 3D, debido a que se presentan esfuerzos de flexión y torsión.

Por tanto, la cercha en 2D tiene un arriostramiento lateral, proporcionado por las correas de la cubierta, donde los resultados obtenidos se muestran en el plano de la cercha; y de igual manera se asume que el comportamiento del material es elástico, donde no se consideran fenómenos de límites plásticos, ablandamiento, ni esfuerzos inelásticos.

Además, no se desarrolla un estudio de la respuesta sísmica de la cercha, debido a que su comportamiento frente a los sismos, depende en mayor medida del sistema global; esta limitación metodológica puede ser desarrollada para una *futura investigación*.

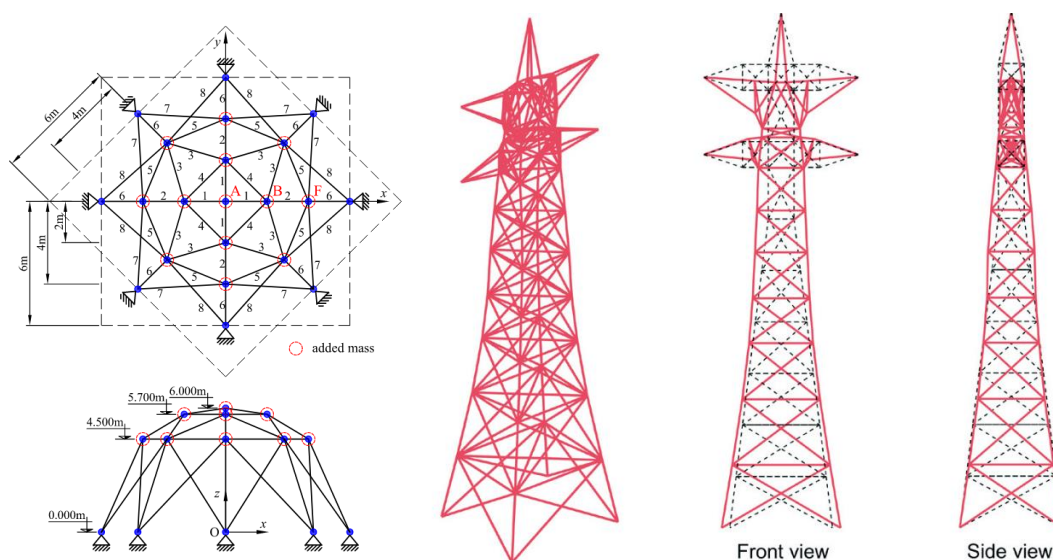


Figura 3.9. Comparación del diseño optimizado de una cúpula (52 barras) y de una torre de transmisión (272 barras), modelos de una estructura en 3D (Kaveh y Zaeerza 2020).

3.8. Diseño de instrumentos de recolección

El desarrollo del modelo de optimización se ha realizado usando herramientas virtuales para organizar y almacenar información por medio de iteraciones, siendo el principal script “MARVALL.m” en MATLAB r2022b, que opera con dos módulos y un archivo Excel.

- Módulo “*ANALISIS_ESTRUCTURAL.m*”, calcula esfuerzos, desplazamientos nodales y reacciones vía matriz de rigidez, generando matrices de comportamiento estructural.
- Módulo “*DISENO_ESTRUCTURAL.m*”, aplica normativas (AISI S100-16) de resistencia y esbeltez, clasificando barras y validando configuraciones.
- Base de datos “*.xlsx*”, contiene propiedades de perfiles para selección automatizada.

Los datos de salida después de procesos de iteraciones son automáticos, mostrando al final de todo el proceso: el número de elementos, esfuerzos (tracción/compresión), perfil, pesos (barra/total), desplazamientos máximos, desplazamientos y gráficas (convergencia, cercha inicial vs. optimizada). La información se transformó en parámetros de entrada para el algoritmo en MATLAB: la codificación de variables, límites de sección y restricciones de servicio (esfuerzo, flecha, pandeo). Durante el proceso de la simulación, el modelo creó matrices de resultados por cada iteración (geometría, peso, esfuerzos, desplazamientos), mediante visualizaciones gráficas de la curva de convergencia.

3.9. Procedimiento para la recolección y el proceso de datos

El proceso de *recolección y procesamiento* de datos y la información sigue una secuencia lógica y computacional, almacenando resultados de simulación estructural y la optimización evolutiva. El procedimiento se desarrolló en tres etapas secuenciales: *generación de datos, recolección automática y procesamiento analítico*.

- En una primera etapa, el algoritmo genético "MARVAL" en MATLAB generó múltiples configuraciones de cerchas. Cada individuo se definió por coordenadas nodales y perfiles aleatorios, limitados por condiciones geométricas y normativas.
- Durante la segunda etapa, el módulo “*ANALISIS_ESTRUCTURAL.m*” resolvió ecuaciones de equilibrio (matriz de rigidez), calculando esfuerzos internos, desplazamientos nodales y reacciones. Luego, “*DISENO_ESTRUCTURAL.m*” verificó las restricciones de las normas (resistencia, esbeltez, desplazamientos).
- En la tercera etapa, los datos se organizaron en hojas de cálculo y archivos de texto. Se generaron gráficas de convergencia y comparaciones de cerchas (inicial vs. optimizada) para visualización gráfica.

El flujo de trabajo es replicable y verificable con cargas reales y normas de diseño; todos los resultados iterativos (geometría, peso) se registraron. El análisis numérico se complementó con la comparación en SAP2000, usando cargas combinadas (muerta, viva, viento, granizo), para validar la seguridad estructural bajo condiciones reales.

3.10. Estructura de datos de entrada

Para manejar datos de geometría estructural, cargas y algoritmo, se emplearon hojas de cálculo Excel, divididas para una mejor organización, las cuales se detallan en la parte de anexos (**C. Archivo de datos**).

- En la *primera hoja* “**RESTRICCIONES**”, en la *tabla c.1. Restricciones de nodos* se encuentran las restricciones que se coloca el número de nodos, tanto para el *eje “x”* y para el *eje “y”* las cuales son denominadas con el valor de 1 para restricciones fijas y 0 sin restricción.
- En la *segunda hoja* de “**ESTRUCTURA**”, está la *Tabla C.2. Relaciones de esbeltez máxima y factor de longitud efectiva*, donde se introducen las relaciones de esbeltez en tracción y compresión; para posteriormente hacer la asignación de los valores de los nudos de la cercha, las coordenadas fijas o variables, al igual que el desplazamiento máximo y mínimo, tanto en el *eje “x”* y en el *eje “y”*. Finalmente, la introducción de los elementos; es decir, las barras o la conectividad de los nodos.
- En la *tercera hoja* de “**LIBRERÍA DE PERFILES**”, está la *Tabla C.5. Tabla de la librería de perfiles comerciales*, donde se colocan las propiedades de los perfiles, las cuales ya fueron desarrolladas en una plantilla en MathCad Prime para un análisis más rápido y sencillo, el cual se encuentra en complemento virtual del documento.
- En la *cuarta hoja* de “**CARGAS**”, está la *Tabla C.6. Tabla de las cargas en los nodos de la cercha* se colocan las cargas en los nodos, las cuales se harán en la hoja quinta “**COMBINACIONES DE CARGA**” y la hoja sexta “**COMBINACIONES DE SERVICIO**”.
- En la *hoja séptima* “**LNA EJE LOCAL 2**” y la *octava hoja* “**LNA EJE LOCAL 3**” se coloca el número máximo de elementos sumados por longitud no arriostrada en el eje 2 y en el eje 3 de todos los elementos que componen las cerchas, que se encuentran en

la **Tabla C.9. Longitud no arriostrada en el “eje local 2”** y la **Tabla C.10. Longitud no arriostrada en el “eje local 3”**.

- En la novena hoja de “**LIMITES DE DESPLAZAMIENTO**” se colocan las combinaciones de carga de servicio, los nodos de control y los desplazamientos máximos sacados $L/300$, se encuentra la **Tabla C.11. Modelo de tabla**.
- Finalmente, en la última hoja “**DATOS ALGORITMO GENETICO**” se colocan los valores del algoritmo genético; cabe mencionar que todos los valores fueron desarrollados, los cuales se encuentran en la parte del “**ANEXO C**”.

Tabla 3.7. Datos del algoritmo genético

Descripción	Valores
Número de individuos genéticos de la población n_{pob}	80.00
Elitismo E	1.00
Probabilidad de cruce P_c	1.00
Probabilidad de mutación P_m	0.05
Rango de mutación R_m	1.00
Porcentaje de finalización $\%f_m$	0.95
Tolerancia $Tolerancia$	0.00004
Número máximo de generaciones N_{GEN}	30.00

Nota: Esta tabla fue sacada para el análisis del AG (Elaboración propia).

3.11. Validación de resultados

Con el objeto de garantizar la confiabilidad del modelo de optimización estructural, basado en AG y los perfiles CFS; se ha realizado la validación estructural, por medio del método de FEM usando el software SAP2000, para verificar las soluciones generadas por el algoritmo MARVALL en MATLAB. Los modelos se sometieron a las cargas de acuerdo a las normas ASCE 7-22 y NB 1225003-1 (cargas muertas, vivas, viento, granizo) adaptadas a la ciudad de Sucre, Bolivia; verificándose bajo criterios de resistencia ($\sigma \leq F_y$), servicio ($\text{desplazamiento} \leq L/300$) y estabilidad (*pandeo*) según AISI S100-16. Un análisis comparativo con métodos tradicionales mostró una *cercha tipo Warren* de 3.84%, *cercha tipo Home* de 1.44% *cercha tipo Pratt* de 3.13% del peso total, representando un ahorro en materiales de los perfiles (cuantías), sin comprometer seguridad. La *estabilidad del algoritmo genético* se evidenció en la curva de convergencia, alcanzando estabilidad numérica antes de 30 generaciones. Las soluciones óptimas cumplen con las normas de diseño, ofrecen resultados replicables.

3.11.1. Validación mediante comparación de resultado

Para la validación, se compararon los diseños del AG en MATLAB con los diseños convencionales en SAP2000. Este proceso evaluó la efectividad del algoritmo genético en estructuras metálicas frente a diseños convencionales. La información de perfiles se recolectó de catálogos, hojas de cálculo y normas; la comparación se basó en *indicadores técnicos clave*, que se muestran a continuación:

Tabla 3.8. Criterios de comparación

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Peso total de la estructura (kg)	Indicador de consumo de material
Desplazamientos máximos ($\delta_{\max}$)	Verificación del estado límite de servicio
Esfuerzos máximos ($\sigma_{\max}$)	Evaluación de seguridad estructural
Aprovechamiento del material (%)	Relación entre esfuerzo máximo y esfuerzo admisible

Nota: Criterios y valores que serán analizados por cada tipología de la cercha (Elaboración propia).

Para el proceso de validación se compararon los modelos optimizados de los tres tipos de cerchas con sus respectivos modelos tradicionales, ambos bajo las mismas cargas, apoyos y restricciones, las cuales se detallan en la **figura 3.6**. El análisis de la gráfica de convergencia evaluó los resultados de los procesos de optimización, donde se logró una *reducción promedio* para la cercha tipo *Warren* de 3.84%, cercha tipo *Home* de 1.44% cercha tipo *Pratt* de 3.13% con sus respectivos pesos de la cercha, considerado solo el material de las barras, validando la eficacia del método propuesto.

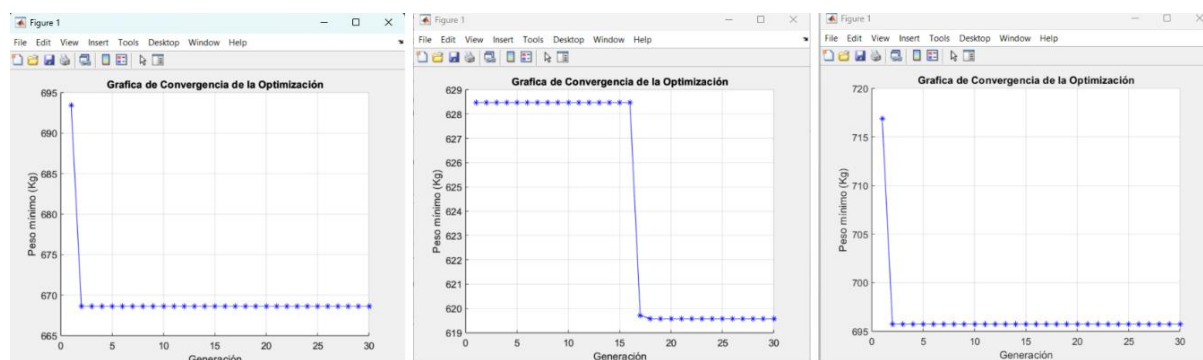


Figura 3.10. Gráfica de convergencia de la solución óptima (Elaboración propia).

Para la validación del modelo “MARVALL” se compararon los resultados obtenidos con los generados por el software de análisis estructural SAP2000v24. Esta comparación se extrajo de la **tabla 4.2**, **tabla 4.3** y la **tabla 4.4** reveló una variación mínima y altamente aceptable, siendo un 8.292%, 13.222% y 5.975% en esfuerzos de tracción y un 6.254%, 12.465% y 26.059% de esfuerzos de compresión en las barras de los tres tipos de cercha,

reflejados en la **tabla 3.8**. El nivel de concordancia entre los esfuerzos máximos de tracción y compresión obtenidos para tres tipologías de cercha (Warren, Howe y Pratt), empleando como indicadores el *promedio de la diferencia*, el promedio del porcentaje de variación y la desviación estándar.

Tabla 3.8. Resultados de la comparación de esfuerzos de tracción y compresión

Descripción	TIPO WARREN		TIPO HOME		TIPO PRATT	
	Esfuerzos en tracción	Esfuerzos en compresión	Esfuerzos en tracción	Esfuerzos en compresión	Esfuerzos en tracción	Esfuerzos en compresión
Promedio de la diferencia	2.2196	3.263	2.660	3.026	1.022	1.267
Promedio del % de variación	8.292 %	6.254%	13.222 %	12.465 %	5.975%	26.059%
Desviación estándar	4.243	4.690	4.706	4.786	2.316	2.415

Nota: Esta tabla fue calculada en función del análisis de **tabla 4.4** (Elaboración propia).

En *tracción*, la *cercha tipo Pratt* presenta el mejor ajuste global, al registrar la menor diferencia media 1.022 kN y el menor porcentaje de variación promedio 5.975%, además de una menor dispersión ($\sigma = 2.316$); lo que evidencia un comportamiento más estable y consistente entre elementos al comparar ambos modelos.

En *compresión*, la *cercha tipo Pratt* mantiene también la menor diferencia media 1.267kN y la menor desviación estándar ($\sigma = 2.415$) sin embargo, tiene un porcentaje de variación promedio mayor de 26.059%, lo que indica discrepancias absolutas que son muy pequeñas. Las *tipologías Warren* y *Howe* exhiben diferencias medias y desviaciones estándar más elevadas, tanto en tracción como en compresión, indicando una mayor variabilidad de las discrepancias a lo largo de los elementos y, por ende, una menor uniformidad en la correspondencia de resultados entre los procedimientos de análisis comparados, como se muestra en la **Tabla 3.8.**; y como se muestra en la representación gráfica de las cerchas del modelo inicial y las cerchas optimizadas de la **figura 3.11**

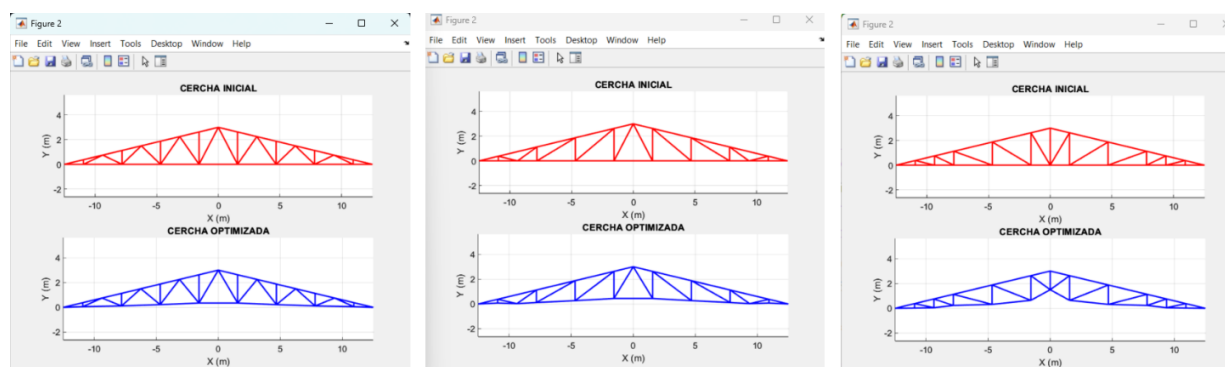


Figura 3.11. Tipos de cercha optimizados (izquierda) tipo Warren, (centro) tipo Howe (derecha) tipo Pratt (Elaboración propia).

4. Análisis de resultados

En este presente capítulo, se expone un *análisis detallado de los resultados* obtenidos mediante el desarrollo computacional de AG para la optimización estructural de armaduras metálicas en 2D, usando el método de la rigidez y el uso de una librería de perfiles CFS, han permitido explorar distintas configuraciones de diseño estructural; de acuerdo a normas de diseño estructural, con el propósito de *optimizar el peso de la estructura, esbeltez y resistencia*. Para la validación de esta metodología, se realizó la aplicación a tres tipologías *Warren, Home y Pratt* para los casos de estudio de tres tipos de cerchas simétricas de 25.00 m de largo y 3.00 m de alto, compuestas por 25 nodos y 47 barras, sometidas a las condiciones de carga particulares de Sucre.

4.1. Propuesta de la optimización estructural

En esta investigación se elaboró un modelo computacional “MARVALL”, en MATLAB r2022b; el modelo integra en un solo proceso la lectura de la geometría de la cercha, las propiedades mecánicas de los materiales y las combinaciones de carga; el análisis estructural mediante el método de la rigidez en 2D, considerando a la armadura como un sistema de barras articuladas; y la verificación automática de los estados límite de resistencia, esbeltez y desplazamientos nodales, de acuerdo a normas de diseño.

La optimización se realiza mediante un AG, que busca la mejor combinación posible de perfiles comerciales para cada barra de la armadura. La *función objetivo* corresponde al peso total de la estructura, mientras que las restricciones incluyen la capacidad resistente de los elementos, los límites de esbeltez, los desplazamientos máximos admisibles y la compatibilidad geométrica del sistema estructural. Cada posible solución del algoritmo representa una configuración completa de perfiles para la cercha, que es analizada y evaluada por el modelo estructural antes de ser aceptada o descartada.

Como caso de estudio se consideró tres tipos de cerchas Warren, Home y Pratt, armadura metálica 2D de dos aguas, de 25,00 m de luz y 3,00 m de altura, siendo común su uso en cubiertas de galpones, tinglado, etc. Sobre esta estructura se aplicaron las combinaciones de carga correspondientes al peso propio, carga muerta, carga viva de mantenimiento, viento y granizo, definidas según normas de diseño.

4.1.1. Justificación técnica y pertinencia del enfoque computacional

El diseño de estructuras metálicas en 2D, depende de la magnitud y la complejidad de la geometría de la armadura de estudio, lo que representa el análisis de un volumen considerable de información y la verificación de múltiples iteraciones. La aplicación del modelo “MARVALL” en MATLAB ofrece ventajas significativas:

- Reducción el tiempo del procesamiento, automatiza cálculos que serían tediosos y prolongados manualmente.
- Aumento de la precisión para poder reducir errores; la naturaleza computacional del modelo reduce la probabilidad de errores humanos.
- Facilitad de la comparación entre múltiples configuraciones y soluciones.
- Integración del análisis y revisión de las normas de diseño en un solo flujo, de acuerdo a los criterios de resistencia (tracción y compresión), esbeltez límite en los ejes (2 y 3), desplazamientos nodales y cálculo del peso de la estructura.

Tabla 4.1. Objetivos específicos del modelo y su aplicación en el algoritmo.

Objetivo Especifico	Descripción Técnica	Implementación en el Modelo MARVALL
Minimizar el peso total de la armadura	Reducir la masa estructural para optimizar el uso de material y costos sin comprometer la seguridad	Minimizar del peso total. Se evalúan todas las combinaciones posibles de perfiles desde la librería de secciones.
Verificar esbeltez de los elementos	Asegurar que la relación cumpla $\lambda = K \cdot L / r$ límites normativos para cada barra en los ejes principales	Cálculo automatizado de esbeltez en ejes 2 y 3. Comparación con límites normativos según AISI.
Verificar resistencia axial (tracción y compresión)	Comprobar que la capacidad resistente de cada perfil supere la fuerza interna obtenida por análisis estructural	Verificación de las iteraciones Tracción: $N_T = \phi \cdot A \cdot F_y$ Compresión: $N_C = \phi \cdot P_{cr}$
Controlar desplazamientos nodales	Evitar deformaciones excesivas que afecten la funcionalidad estructural	Comparación de δ_{max} con $\delta_{adm} = L / 300$
Usar perfiles reales disponibles en mercado	Limitar la selección de perfiles a una base de datos de secciones comerciales normalizadas y disponibles en el entorno constructivo local	Uso de librería de perfiles desde hoja Excel estructurada, con datos de área, peso, F_y , radios de giro y módulo elasticidad.

Nota: Estos valores son sacados del análisis realizado (Elaboración propia).

4.1.2. Formulación matemática del modelo y condiciones de contorno.

La base matemática del modelo MARVALL se sustenta en el *Método de los Elementos Finitos (MEF)*, específicamente aplicado a estructuras lineales en 2D, que considera principalmente los esfuerzos axiales de tracción y compresión, cada barra axial con rigidez axial $(A.E)/L$, despreciando los efectos de flexión y cortante.

La optimización de la estructura metálica es de “*tamaño y forma*”; el *tamaño* se logra mediante la selección de los perfiles comerciales óptimos para cada barra de la armadura; La *forma* se implementa permitiendo la variación de las coordenadas nodales de ciertos puntos de la estructura, mientras que otros nodos permanecen fijos; si bien el **Anexo C.1** detalla las coordenadas nodales, en el proceso de optimización de la *forma* varían únicamente las coordenadas en el “*eje y*” de los nodos superiores e inferiores, lo que permitió ajustar la altura y la curvatura del perfil, buscando la configuración adecuada sin comprometer la estabilidad global.

- **Elemento estructural tipo barra**

Cada elemento es tratado como una barra axial con rigidez axial $(A.E)/L$, sin considerar la flexión, ni la cortante.

- **Matriz de rigidez local k_e**

$$k_e = \frac{A_e \cdot E_e}{L_e} \cdot \begin{bmatrix} c^2 & c \cdot s & -c^2 & -c \cdot s \\ c \cdot s & s^2 & -c \cdot s & -s^2 \\ -c^2 & -c \cdot s & c^2 & c \cdot s \\ -c \cdot s & -s^2 & c \cdot s & s^2 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Donde: A_e Área de la sección transversal; E_e Módulo de elasticidad del acero; L_e Longitud de cada barra, θ_e Ángulo de inclinación de cada barra, $c = \cos(\theta_e)$ y $s = \sin(\theta_e)$

- **Ensamblaje global**

La matriz de rigidez global K se forma ensamblando cada k_e en su posición correspondiente dentro del vector de grados de libertad.

- **Aplicación de condiciones de contorno**

Se definen grados de libertad restringidos “*a*” y libres “*b*” aplicando el criterio de la estructura a ser analizada:

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_a \\ D_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_a \\ P_b \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$D_b = K_{bb}^{-1} \cdot (P_b - K_{ba} \cdot D_a) \quad (4.3)$$

Donde: D_a son los desplazamientos restringidos; D_b son los desplazamientos permitidos.

- **Cálculo de fuerzas internas**

$$P_i = \frac{E \cdot A}{L} \cdot [-c, -s, c, s] \cdot d_e \quad (4.4)$$

Donde: d_e es el vector de desplazamientos nodales del elemento.

Estas fuerzas se comparan con esfuerzos máximos y los límites de servicio, para determinar si cada barra cumple o es reemplazada en las iteraciones desde la librería que se muestra en la parte de **Anexos C.3** “Librería de perfiles”.

4.2. Implementación computacional del modelo

El programa identifica la solución óptima o cuasi-óptima, registrando la configuración de perfiles asignados a cada barra, y genera reportes con el peso total de la estructura, los esfuerzos internos y los desplazamientos nodales. Estos resultados permiten comparar el desempeño del diseño convencional frente al diseño optimizado mediante MARVALL, demostrando las ventajas del enfoque computacional propuesto.

4.2.1. Caracterización del modelo estructural de referencia

El caso de estudio seleccionado son tres *estructuras 2D simétricas de 2 aguas*, cuyo uso es más recurrente en la ciudad de Sucre; las dimensiones son *25.00 m de luz, 3.00 m de altura, compuesta por 25 nodos y 47 barras*. La disposición de los nodos obedece a las 3 tipologías estudiadas Warren, Home y Pratt,; diseñada para soportar esfuerzos axiales de tracción y compresión. La estructura fue idealizada como un sistema de barras articuladas en 2D, lo que permite la aplicación efectiva del método de la rigidez. Las *cargas aplicadas* a la armadura fueron determinadas conforme a normas como ASCE 7-16 y la NB-1225003-1, así como la “Norma Boliviana de Acción del Granizo sobre las Construcciones”; las cargas consideradas incluyeron carga muerta, carga viva de mantenimiento, carga de granizo y carga de viento, todas calculadas específicamente para las condiciones climáticas de la ciudad de Sucre, Bolivia.

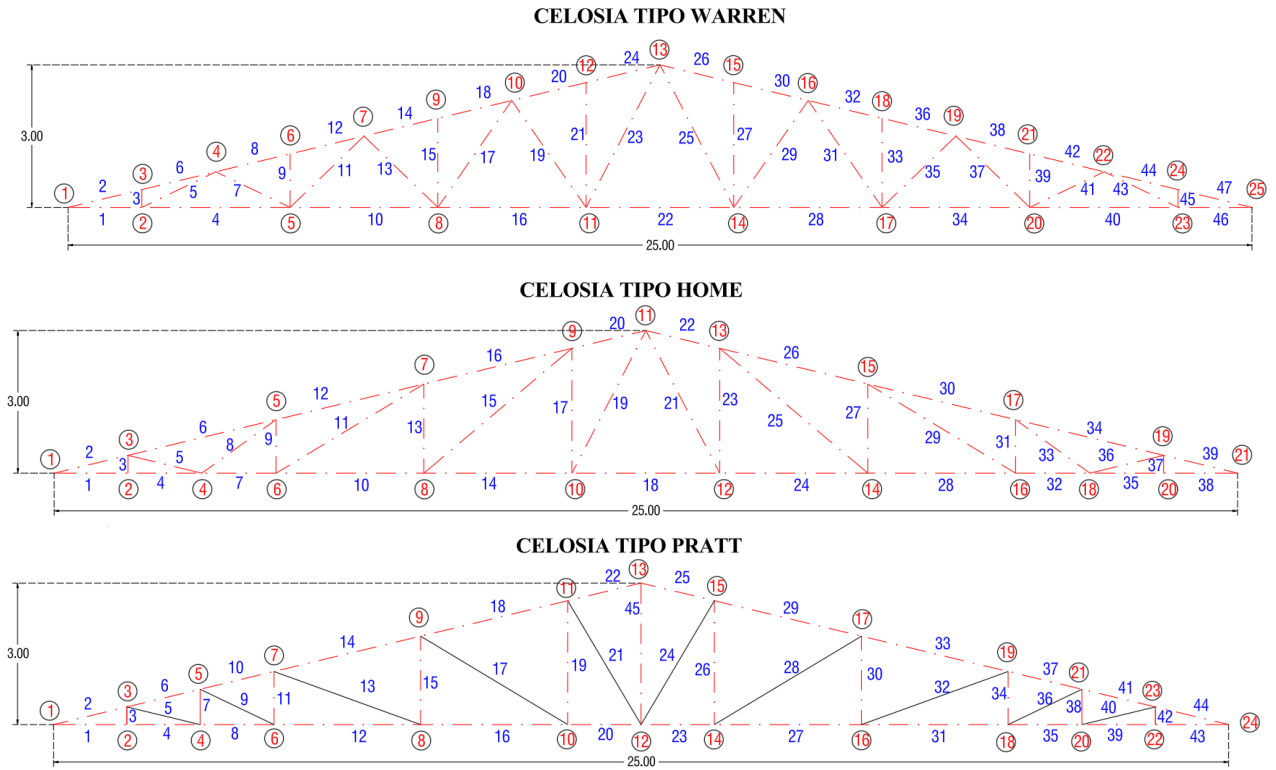


Figura 4.1. Esquema de la cercha de análisis tipo Warren, Home y Pratt (Elaboración propia).

Las cargas aplicadas fueron determinadas conforme a la normativa ASCE 7-16 y su NB NB-1225003-1, las cuales se describen con mayor detalle en la parte del **ANEXO B** y también dicha tabla se encuentra en el **ANEXO C.4 CARGAS**

4.2.2. Desarrollo del algoritmo genético

Con el objeto de poder resolver el problema de la selección óptima de perfiles bajo múltiples restricciones, se implementó un algoritmo genético que simula un proceso evolutivo para poder encontrar la configuración más adecuada de toda la estructura. La función objetivo fue definida como la minimización del peso de la estructura:

$$\min \left(W_{total} = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot A_i \cdot L_i \right) \quad (4.5)$$

Donde: ρ_i es el peso específico del material del acero; A_i es el área de la sección transversal de los perfiles; L_i es la longitud de los miembros de las barras de la estructura.

Las variables de diseño son los índices de perfiles disponibles en la librería comercial, asignados a cada elemento estructural. Cada individuo en la población representa una combinación posible de perfiles a lo largo de los elementos. Durante el proceso evolutivo, cada solución se evalúa respecto a las siguientes restricciones:

Tracción:

$$N_t \leq \phi \cdot A \cdot F_y \quad (4.6)$$

Donde: ϕ es el factor de resistencia a la tracción ≈ 0.90 ; A es el área de la sección transversal del perfil, F_y es el módulo del material de acero.

Compresión:

$$N_c \leq \phi_c \cdot P_{cr} \quad (4.7)$$

Donde: ϕ_c es el factor de resistencia a la compresión ≈ 0.85 ; P_{cr} es la carga crítica de pandeo calculado.

De igual manera se establece un límite a la esbeltez de los elementos, en los planos de las inercias (2 y 3) de cada sección; el algoritmo evalúa las condiciones para continuar o cambiar las barras, de acuerdo a las siguientes condiciones:

Barras en tracción:

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \leq 300 \quad (4.8)$$

Barras en compresión:

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \leq 200 \quad (4.9)$$

Donde: " K " es el factor de la longitud efectiva ≈ 1 articulaciones; " L " es la longitud No arriostrada; " r " es el radio de giro de la sección del perfil.

La deformación global de la estructura no debe superar los valores de servicio, cuyo valor se extrae directamente del vector de desplazamientos generado en cada análisis de las iteraciones; siendo una condición para las armaduras ligeras:

$$\delta_{max} \leq \frac{L}{300} \quad (4.10)$$

Donde: δ_{max} es el desplazamiento máximo vertical; L es la longitud entre los apoyos de la estructura.

Dentro de los parámetros evolutivos en la codificación genética, cada individuo (*solución*) se representa por medio de un vector de números enteros, representando un elemento estructural y su valor el *Número del perfil* de la librería.

$$\text{individuo} = [12, 8, 5, \dots, 20] \quad (4.11)$$

Para la población inicial, se generan de manera aleatoria de 200 a 300 individuos, utilizando perfiles válidos; esta diversidad inicial es clave para cubrir un amplio rango de soluciones. Debido a que la *función de aptitud (fitness)* evalúa el peso total de la estructura, penalización de valores de acuerdo a las normas de diseño y los perfiles sobredimensionados, cuya fórmula es expresada:

$$f_{(X)} = W_{TOTAL} + \alpha_1 \cdot P_1 + \alpha_2 \cdot P_2 \dots \quad (4.12)$$

Donde: α_i son los factores de ponderación, P_i son las funciones de penalización.

Los operadores genéticos usados en el programa son *la selección*, donde un torneo binario entre individuos escoge al mejor; *el cruzamiento*, donde cada perfil se hereda aleatoriamente de cada padre; *la mutación*, el cambio aleatorio de un perfil o varios elementos; y *el reemplazo*, donde se elimina el 20.00% de la población para mantener las mejores soluciones. Para que el algoritmo llegue a terminar su proceso de cálculo, debe cumplir con los siguientes criterios, los cuales están establecidos en el código del script:

- Convergencia de la función objetivo (sin mejoras significativas en 30 generaciones).
- Número máximo de generaciones alcanzado (usualmente 30).
- Porcentaje de individuos viables supera cierto umbral (90.00%).

4.2.3. Codificación y simulación computacional

La codificación fue desarrollada en su totalidad en MATLAB r2022b; debido a la gran capacidad de manejar matrices y la información en hojas de cálculo de Excel; además de presentar un entorno gráfico, donde se puede visualizar el proceso de optimización de la estructura; usando el análisis estructural y el diseño estructural.

El script principal implementa el AG, donde cada individuo representa una configuración nodal variable (para la forma) y una selección de perfiles (para el tamaño), de acuerdo a las restricciones geométricas, estructurales y normas. Los complementos del código, son

los módulos de “*ANALISIS_ESTRUCTURAL.m*” y “*DISEÑO_ESTRUCTURAL.m*”; que realizan rutinas específicas de análisis y diseño. La entrada de datos (geometría, combinaciones de carga y la librería de perfiles) se gestiona a través de un archivo Excel (*.xls*). Para la validación del modelo “MARVALL” se compararon los resultados obtenidos con la modelación en SAP2000v24.

4.3. Análisis de Resultados y Evaluación del Desempeño

4.3.1. Comparación entre diseño convencional y diseño optimizado

Realizando una comparación de los esfuerzos obtenidos en el programa de MATLAB con el programa SAP 2000v24, se realizó el cálculo del porcentaje de variación de los esfuerzos en tracción y compresión y el cálculo de la desviación estándar; reflejado en la **Tabla 3.8** a continuación, se muestran los reportes generados por el AG para las cerchas tipo Warren, Home y Pratt en la **figura 4.2**.

Command Window

TABLA DE RESULTADOS DE DISEÑO

Elemento	TRAC MAX (kN)	COMP MAX (kN)	PERFIL	PESO (Kg)
1	171.28	0	36	19.773
2	0	-176.05	17	18.507
3	0	-4.6936	1	0.53817
4	153.77	0	36	39.655
5	19.087	0	1	2.8655
6	0	-176.05	17	18.507
7	0	-13.461	2	3.1086
8	0	-145.25	17	18.619
9	0	-4.9099	1	1.6985
10	131.92	0	36	39.544
11	12.615	0	1	3.5023
12	0	-145.3	17	18.507
13	0	-13.174	4	5.6064
14	0	-125.14	17	18.507
15	0	-4.6936	1	2.7798
16	111.86	0	36	39.682
17	16.263	0	1	4.2975
18	0	-125.14	17	18.507
19	0	-16.29	4	6.8495
20	0	-104.25	16	12.859
21	0	-4.8489	3	2.2135
22	88.446	0	36	39.521
23	25.555	0	2	5.6458
24	0	-104.29	16	12.781
25	25.555	0	2	5.6458
26	0	-104.29	16	12.781
27	0	-4.8489	3	2.2135
28	111.86	0	36	39.682
29	0	-16.29	4	6.8495
30	0	-104.25	16	12.859
31	16.263	0	1	4.2975
32	0	-125.14	17	18.507
33	0	-4.6936	1	2.7798
34	131.92	0	36	39.544
35	0	-13.174	4	5.6064
36	0	-125.14	17	18.507
37	12.615	0	1	3.5023
38	0	-145.3	17	18.507
39	0	-4.9099	1	1.6985
40	153.77	0	36	39.655
41	0	-13.461	2	3.1086
42	0	-145.25	17	18.619
43	19.087	0	1	2.8655
44	0	-176.05	17	18.507
45	0	-4.6936	1	0.53817
46	171.28	0	36	19.773
47	0	-176.05	17	18.507

Peso total de la estructura (Kg): 668.6292

TABLA DE RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS

1	0.04769
2	0.048006

Command Window

TABLA DE RESULTADOS DE DISEÑO

Elemento	TRAC MAX (kN)	COMP MAX (kN)	PERFIL	PESO (Kg)
1	98.107	0	36	19.784
2	0	-100.78	17	18.507
3	7.7982	0	1	0.5014
4	98.037	0	36	19.77
5	0	-27.532	4	4.4372
6	0	-73.128	28	35.667
7	72.966	0	36	19.92
8	0	-2.1132	2	3.5136
9	0	-3.9543	1	1.6894
10	63.859	0	36	39.566
11	10.398	0	3	3.4796
12	0	-74.922	28	35.559
13	0	-7.5689	1	2.6996
14	53.872	0	36	39.712
15	12.524	0	3	3.8089
16	0	-65.593	23	21.916
17	0	-9.877	4	6.0573
18	45.897	0	36	39.521
19	15.146	0	2	5.4944
20	0	-55.318	7	7.9451
21	15.146	0	2	5.4944
22	0	-55.318	7	7.9451
23	0	-9.877	4	6.0573
24	53.872	0	36	39.712
25	12.524	0	3	3.8089
26	0	-65.593	23	21.916
27	0	-7.5689	1	2.6996
28	63.859	0	36	39.566
29	10.398	0	3	3.4796
30	0	-74.922	28	35.559
31	0	-3.9543	1	1.6894
32	72.966	0	36	19.92
33	0.014597	-2.1132	2	3.5136
34	0	-73.128	28	35.667
35	98.037	0	36	19.77
36	0	-27.532	4	4.4372
37	7.7982	0	1	0.5014
38	98.107	0	36	19.784
39	0	-100.78	17	18.507

Peso total de la estructura (Kg): 619.5751

TABLA DE RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS

1	0.028125
2	0.028295

Command Window

TABLA DE RESULTADOS DE DISEÑO

Elemento	TRAC MAX (kN)	COMP MAX (kN)	PERFIL	PESO (Kg)
1	113.97	0	36	19.763
2	0	-117.2	17	18.507
3	0	-0.28212	1	0.59282
4	113.97	0	36	19.763
5	0	-10.005	1	2.67758
6	0	-107.13	17	18.507
7	0	-8.0415	1	1.1792
8	104.85	0	36	20.018
9	6.4655	0	1	2.7758
10	0	-113.4	17	18.619
11	6.8252	0	1	1.5058
12	110.34	0	36	39.537
13	0	-24.148	7	15.962
14	0	-89.405	29	46.087
15	0.33032	-0.072546	1	2.6172
16	87.397	0	36	39.862
17	0	-8.0499	6	11.455
18	0	-81.689	23	21.916
19	0	-31.619	5	7.9583
20	90.625	0	36	22.543
21	34.408	0	1	3.2296
22	0	-110.38	12	11.522
23	90.625	0	36	22.543
24	34.408	0	1	3.2296
25	0	-110.38	12	11.522
26	0	-31.619	5	7.9583
27	87.397	0	36	39.862
28	0	-8.0499	6	11.455
29	0	-81.689	23	21.916
30	0.49139	-0.20606	1	2.6172
31	110.34	0	36	39.537
32	0	-24.148	7	15.962
33	0	-89.405	29	46.087
34	6.8252	0	1	1.5058
35	104.85	0	36	20.018
36	6.4655	0	1	2.7758
37	0	-113.4	17	18.619
38	0	-8.0415	1	1.1792
39	113.97	0	36	19.763
40	0	-10.005	1	2.6741
41	0	-107.13	17	18.507
42	0	-0.28212	1	0.59282
43	113.97	0	36	19.763
44	0	-117.2	17	18.507
45	46.903	0	1	2.5216

Peso total de la estructura (Kg): 695.7103

TABLA DE RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS

1	0.045866
2	0.046006
3	0.049133

Figura 4.2. Resultados obtenidos usando el programa de AG en el análisis de la cercha tipo (izquierda) WARREN , (centro) HOME y (derecha) PRATT (Elaboración propia).

Se aprecia una diferencia en el consumo de material que presenta el menor peso total de la estructura, donde la cercha tipo Home tiene un peso ($W_{Home} = 619.58 \text{ kg}$) la cercha tipo Warren un peso ($W_{Warren} = 660.63 \text{ kg}$) y la cercha tipo Pratt un peso de ($W_{Pratt} = 695.71 \text{ kg}$) comprobando que, bajo las mismas condiciones de carga, la tipología influye directamente en la distribución de esfuerzos y en la selección de los perfiles.

En la cercha tipo Warren en la **Tabla 4.2**, los miembros que trabajan más en tracción debido a que muestran variaciones bajas a moderadas; diferencias cerca de 14 kN y variaciones típicas menores al 12%; mientras que en compresión los elementos presentan variaciones bajas; porque corresponden a esfuerzos pequeños en magnitud.

Tabla 4.2. Comparación de esfuerzos para cercha tipo Warren – MATLAB vs SAP2000

Elemento	MATLAB Tracción Máxima (kN)	SAP2000 Tracción Máxima (kN)	Diferencia	% de variación	MATLAB Compresión Máxima (kN)	SAP2000 Compresión Máxima (kN)	Diferencia	% de variación
1	171.2807	171.3250	0.0443	0.03%	-	-	-	0.00%
2	-	-	-	0.00%	-176.0537	-176.3150	0.2613	0.15%
3	-	-	-	0.00%	-4.6936	-3.3780	1.3156	38.95%
4	153.7724	164.9620	11.1896	6.78%	-	-	-	0.00%
5	19.0871	7.5100	11.5771	154.16%	-	-	-	0.00%
6	-	-	-	0.00%	-176.0537	-176.5350	0.4813	0.27%
7	-	-	-	0.00%	-13.4607	-10.9420	2.5187	23.02%
8	-	-	-	0.00%	-145.2480	-159.1510	13.9030	8.74%
9	-	-	-	0.00%	-4.9099	-4.6140	0.2959	6.41%
10	131.9233	145.5270	13.6037	9.35%	-	-	-	0.00%
11	12.6147	12.3950	0.2197	1.77%	-	-	-	0.00%
12	-	-	-	0.00%	-145.2984	-159.0830	13.7846	8.67%
13	-	-	-	0.00%	-13.1742	-13.4390	0.2648	1.97%
14	-	-	-	0.00%	-125.1360	-138.9430	13.8070	9.94%
15	-	-	-	0.00%	-4.6936	-4.2470	0.4466	10.52%
16	111.8622	125.8120	13.9498	11.09%	-	-	-	0.00%
17	16.2626	15.3540	0.9086	5.92%	-	-	-	0.00%
18	-	-	-	0.00%	-125.1360	-138.8270	13.6910	9.86%
19	-	-	-	0.00%	-16.2902	-21.3290	5.0388	23.62%
20	-	-	-	0.00%	-104.2520	-115.3430	11.0910	9.62%
21	-	-	-	0.00%	-4.8489	-4.2750	0.5739	13.42%
22	88.4460	96.8050	8.3590	8.63%	-	-	-	0.00%
23	25.5545	30.1930	4.6385	15.36%	-	-	-	0.00%
24	-	-	-	0.00%	-104.2881	-115.2290	10.9409	9.49%
25	25.5545	25.4910	0.0635	0.25%	-	-	-	0.00%
26	-	-	-	0.00%	-104.2881	-112.7750	8.4869	7.53%
27	-	-	-	0.00%	-4.8489	-4.3460	0.5029	11.57%
28	111.8622	120.1660	8.3038	6.91%	-	-	-	0.00%
29	-	-	-	0.00%	-16.2902	-16.2020	0.0882	0.54%
30	-	-	-	0.00%	-104.2520	-112.8680	8.6160	7.63%
31	16.2626	15.5770	0.6856	4.40%	-	-	-	0.00%
32	-	-	-	0.00%	-125.1360	-133.1920	8.0560	6.05%
33	-	-	-	0.00%	-4.6936	-4.3880	0.3056	6.96%
34	131.9233	140.0250	8.1017	5.79%	-	-	-	0.00%
35	-	-	-	0.00%	-13.1742	-13.4480	0.2738	2.04%
36	-	-	-	0.00%	-125.1360	-133.2730	8.1370	6.11%
37	12.6147	12.4830	0.1317	1.05%	-	-	-	0.00%
38	-	-	-	0.00%	-145.2984	-153.4970	8.1986	5.34%
39	-	-	-	0.00%	-4.9099	-4.6160	0.2939	6.37%
40	153.7724	159.5390	5.7666	3.61%	-	-	-	0.00%
41	-	-	-	0.00%	-13.4607	-10.9550	2.5057	22.87%
42	-	-	-	0.00%	-145.2480	-153.5630	8.3150	5.41%
43	19.0871	7.5910	11.4961	151.44%	-	-	-	0.00%
44	-	-	-	0.00%	-176.0537	-171.0380	5.0157	2.93%
45	-	-	-	0.00%	-4.6936	-3.7590	0.9346	24.86%
46	171.2807	165.9980	5.2827	3.18%	-	-	-	0.00%
47	-	-	-	0.00%	-176.0537	-170.8330	5.2207	3.06%

Nota: Esta tabla fue sacada de los resultados de MATLAB y los resultados de SAP2000 (Elaboración propia).

En la cercha tipo Howe en la **Tabla 4.3**, se observa un comportamiento estable para barras con tracciones mayores a 98 kN, las diferencias son pequeñas, alrededor de 1.00%, lo que indica un ajuste sólido en los miembros principales. En compresión, existen discrepancias absolutas de 9 a 12 kN en algunos miembros y, en ciertos casos, elevadas cuando la compresión es baja.

Tabla 4.3. Comparación de esfuerzos para cercha tipo Home – MATLAB vs SAP2000

Elemento	MATLAB Tracción Máxima (kN)	SAP2000 Tracción Máxima (kN)	Diferencia	% de variación	MATLAB Compresión Máxima (kN)	SAP2000 Compresión Máxima (kN)	Diferencia	% de variación
1	98.1067	97.0990	1.0077	1.04%	-	-	-	0.00%
2	-	-	-	0.00%	-100.7816	-99.9650	0.8166	0.82%
3	7.7982	3.2470	4.5512	140.17%	-	-	-	0.00%
4	98.0366	96.8580	1.1786	1.22%	-	-	-	0.00%
5	-	-	-	0.00%	-27.5321	-15.9850	11.5471	72.24%
6	-	-	-	0.00%	-73.1277	-83.5710	10.4433	12.50%
7	72.9662	82.4350	9.4688	11.49%	-	-	-	0.00%
8	-	-	-	0.00%	-2.1132	-1.3120	0.8012	61.07%
9	-	-	-	0.00%	-3.9543	-4.2390	0.2847	6.72%
10	63.8587	74.9660	11.1073	14.82%	-	-	-	0.00%
11	10.3976	8.5560	1.8416	21.52%	-	-	-	0.00%
12	-	-	-	0.00%	-74.9221	-84.6510	9.7289	11.49%
13	-	-	-	0.00%	-7.5689	-7.0470	0.5219	7.41%
14	53.8723	65.7200	11.8477	18.03%	-	-	-	0.00%
15	12.5243	11.5620	0.9623	8.32%	-	-	-	0.00%
16	-	-	-	0.00%	-65.5928	-76.4920	10.8992	14.25%
17	-	-	-	0.00%	-9.8770	-9.3950	0.4820	5.13%
18	45.8966	57.4670	11.5704	20.13%	-	-	-	0.00%
19	15.1461	15.5300	0.3839	2.47%	-	-	-	0.00%
20	-	-	-	0.00%	-55.3179	-67.3900	12.0721	17.91%
21	15.1461	15.5300	0.3839	2.47%	-	-	-	0.00%
22	-	-	-	0.00%	-55.3179	-67.3900	12.0721	17.91%
23	-	-	-	0.00%	-9.8770	-9.9350	0.0580	0.58%
24	53.8723	65.7200	11.8477	18.03%	-	-	-	0.00%
25	12.5243	11.5620	0.9623	8.32%	-	-	-	0.00%
26	-	-	-	0.00%	-65.5928	-76.9420	11.3492	14.75%
27	-	-	-	0.00%	-7.5689	-4.2390	3.3299	78.55%
28	63.8587	82.4350	18.5763	22.53%	-	-	-	0.00%
29	10.3976	8.5560	1.8416	21.52%	-	-	-	0.00%
30	-	-	-	0.00%	-74.9221	-84.6510	9.7289	11.49%
31	-	-	-	0.00%	-3.9543	-4.2390	0.2847	6.72%
32	72.9662	82.4350	9.4688	11.49%	-	-	-	0.00%
33	0.0146	0.0290	0.0144	49.67%	-2.1132	-1.3120	0.8012	61.07%
34	-	-	-	0.00%	-73.1277	-83.5710	10.4433	12.50%
35	98.0366	96.8580	1.1786	1.22%	-	-	-	0.00%
36	-	-	-	0.00%	-27.5321	-15.9850	11.5471	72.24%
37	7.7982	3.2470	4.5512	140.17%	-	-	-	0.00%
38	98.1067	97.0990	1.0077	1.04%	-	-	-	0.00%
39	-	-	-	0.00%	-100.7816	-99.9650	0.8166	0.82%

Nota: Esta tabla fue sacada de los resultados de MATLAB y los resultados de SAP2000 (Elaboración propia).

Finalmente, para la cercha tipo Pratt en la **Tabla 4.4** la coincidencia es estrecha en muchos elementos de tracción; aunque se registran porcentajes muy altos en compresión asociados a esfuerzos pequeños. Por lo tanto, para este tipo de resultados, se justifica el uso de promedios, porcentajes de variación y desviaciones estándar.

Tabla 4.4. Comparación de esfuerzos para cercha tipo Pratt – MATLAB vs SAP2000

Elemento	MATLAB Tracción Máxima (kN)	SAP2000 Tracción Máxima (kN)	Diferencia	% de variación	MATLAB Compresión Máxima (kN)	SAP2000 Compresión Máxima (kN)	Diferencia	% de variación
1	113.9684	104.4840	9.484	9.08%	-	-	-	0.00%
2	-	-	-	0.00%	-117.2038	-107.546	9.658	8.98%
3	-	-	-	0.00%	-0.2821	-3.610	3.328	92.19%
4	113.9727	107.2850	6.688	6.23%	-	-	-	0.00%
5	-	-	-	0.00%	-10.0045	-2.762	7.243	262.22%
6	-	-	-	0.00%	-107.1343	-107.472	0.338	0.31%
7	-	-	-	0.00%	-8.0415	-7.464	0.578	7.74%
8	104.8513	105.1420	0.291	0.28%	-	-	-	0.00%
9	6.4655	6.4720	0.006	0.10%	-	-	-	0.00%
10	-	-	-	0.00%	-113.4042	-111.983	1.421	1.27%
11	6.8252	6.4720	0.353	5.46%	-	-	-	0.00%
12	110.3448	108.8890	1.456	1.34%	-	-	-	0.00%
13	-	-	-	0.00%	-24.1483	-22.745	1.403	6.17%
14	-	-	-	0.00%	-89.4046	-89.263	0.142	0.16%
15	0.3303	0.1560	0.174	111.74%	-0.0725	-0.224	0.151	67.61%
16	87.3972	87.2890	0.108	0.12%	-	-	-	0.00%
17	-	-	-	0.00%	-8.0499	-7.661	0.389	5.08%
18	-	-	-	0.00%	-81.6886	-81.941	0.252	0.31%
19	-	-	-	0.00%	-31.6195	-29.648	1.971	6.65%
20	90.6250	89.9780	0.647	0.72%	-	-	-	0.00%
21	34.4076	31.8870	2.521	7.90%	-	-	-	0.00%
22	-	-	-	0.00%	-110.3781	-108.582	1.796	1.65%
23	90.6250	89.9780	0.647	0.72%	-	-	-	0.00%
24	34.4076	31.8870	2.521	7.90%	-	-	-	0.00%
25	-	-	-	0.00%	-110.3781	-108.582	1.796	1.65%
26	-	-	-	0.00%	-31.6195	-29.648	1.971	6.65%
27	87.3972	87.2900	0.107	0.12%	-	-	-	0.00%
28	-	-	-	0.00%	-8.0499	-7.662	0.388	5.06%
29	-	-	-	0.00%	-81.6886	-81.491	0.198	0.24%
30	0.4914	0.3300	0.161	48.91%	-0.2061	-0.399	0.193	48.35%
31	110.3448	108.8800	1.465	1.35%	-	-	-	0.00%
32	-	-	-	0.00%	-24.1483	-22.744	1.404	6.17%
33	-	-	-	0.00%	-89.4046	-89.264	0.141	0.16%
34	6.8252	6.4750	0.350	5.41%	-	-	-	0.00%
35	104.8513	105.2080	0.357	0.34%	-	-	-	0.00%
36	6.4655	4.4770	1.989	44.42%	-	-	-	0.00%
37	-	-	-	0.00%	-113.4042	-111.975	1.429	1.28%
38	-	-	-	0.00%	-8.0415	-7.469	0.573	7.67%
39	113.9727	106.1770	7.796	7.34%	-	-	-	0.00%
40	-	-	-	0.00%	-10.0045	-1.575	8.430	535.21%
41	-	-	-	0.00%	-107.1343	-107.537	0.403	0.37%
42	-	-	-	0.00%	-0.2821	-3.524	3.242	91.99%
43	113.9684	105.9340	8.034	7.58%	-	-	-	0.00%
44	-	-	-	0.00%	-117.2038	-109.024	8.180	7.50%
45	46.9030	46.0600	0.843	1.83%	-	-	-	0.00%

Nota: Esta tabla fue sacada de los resultados de MATLAB y los resultados de SAP2000 (Elaboración propia).

Para efectos comparativos, se estableció como base el diseño convencional de la estructura, utilizando los perfiles comerciales seleccionados manualmente, recurriendo en secciones mayores; a este tipo de diseño se compara la configuración optimizada de la cercha generada por el AG “MARVALL” donde se puede apreciar en la **Tabla 4.4**.

Tabla 4.5. Comparación de resultados

Criterio	TIPO WARREN		TIPO HOME		TIPO PRATT	
	Diseño	Diseño	Diseño	Diseño	Diseño	Diseño
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Peso total (kg)	694.3119	668.6292	628.4933	619.5751	717.5195	695.7103
Nº perfiles distintos usados	4	7	4	9	4	9
Cumple AISI (esfuerzo axial)	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Cumple esbeltez (2D)	Parcial	Si	Parcial	Si	Parcial	Si
Desplazamiento máx. (cm)	8.33mm	4.80 mm	8.33mm	2.82mm	8.33mm	4.60mm
% Ahorro en peso	-	3.84%	-	1.44%	-	3.13%
Nº de iteraciones	-	30	-	30	-	30
Tiempo de diseño	>1 hora	<10 min	>1 hora	<10 min	>1 hora	<10 min

Nota: Los siguientes resultados fueron sacados del diseño y del modelo propuesto (Elaboración propia).

En los modelos optimizados se logró una reducción en el peso total de las estructuras, respetando las normas de diseño; esta mejora proviene de una distribución más eficiente de los perfiles por tracción y compresión. En la evaluación técnica se han evaluado los criterios de seguridad, mas importantes, destacando:

- Los esfuerzos axiales: La resistencia de los perfiles a tracción y compresión.
- La esbeltez: La verificación de la esbeltez en los ejes 2 y 3 de las barras.
- Los desplazamientos: La revisión del desplazamiento de los nodos se encuentra dentro del rango de $L/300$, según los criterios descritos en la hoja de Excel.
- Se pudo apreciar que los perfiles con mayores secciones se ubicaron en el cordón inferior, demostrando la resistencia y estabilidad de toda la cercha.

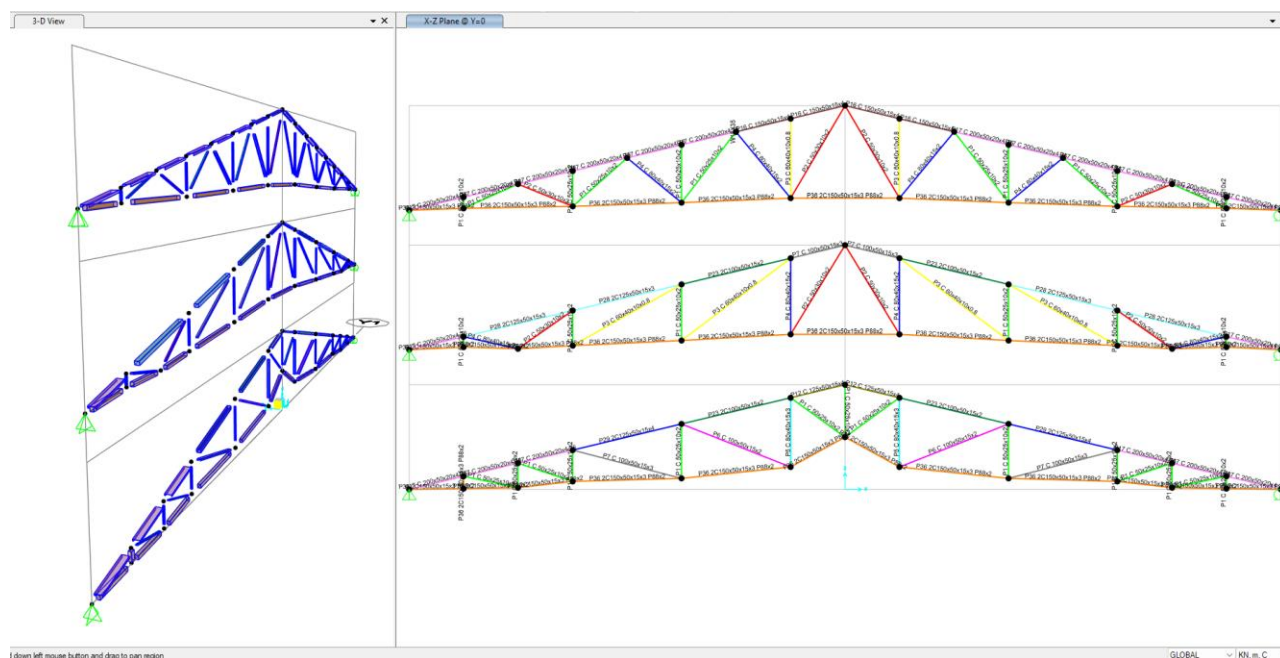


Figura 4.3. Selección de los perfiles en las tres topologías de la cercha, teniendo mayor sección en el cordón inferior (Elaboración propia).

Dentro del ahorro de materiales y el análisis de la eficiencia, nos demuestran que el uso de los modelos optimizados da como resultados más económicos, reduciendo el peso de la estructura (cuantía) de un promedio para la *cercha tipo Warren* de 694.3119 kg hasta 668.6292 kg; *cercha tipo Howe* de 628.4993 kg hasta 619.5751 kg y la *cercha tipo Pratt* 717.5195 kg hasta 695.7103 kg al igual que la eficiencia estructural. Por tanto, la variación de las variables de la estructura permite modificar los valores para poder obtener los siguientes casos de la **Tabla 4.5**.

Tabla 4.6. Tabla de la sensibilidad de las variables de la estructura

Variable Perturbada	Magnitud Cambio	Impacto Principal
Carga vertical en cercha	+20.00 %	Aumento de perfiles para cordones
Límite de esbeltez en tracción	-10.00 %	Reasignación en elementos intermedios
Longitud total de cercha	+15.00 %	Aumento de peso en aproximadamente 6.80%
F_y (acero)	-15.00 %	Rediseño en zona central y aumento de peso

Nota: Estos valores son sacados de los resultados obtenidos en el programa (Elaboración propia).

▪ Análisis de la sensibilidad de la estructura

Dentro del análisis de la sensibilidad en las estructuras en este tipo de investigación, permite comprender como las pequeñas variaciones en los parámetros de la estructura, ocasionan variaciones en la cercha optimizada.

- Por ejemplo, al aumentar la carga vertical ocasionada por las condiciones climatológicas de viento y granizo, en la cercha en un 20.00%, se puede observar el incremento de los perfiles en secciones más grandes o reforzadas en el cordón superior e inferior, lo que indica que el algoritmo prioriza la seguridad de la estructura.
- La reducción del límite de esbeltez en tracción en 10.00%, genera una reasignación de elementos intermedios, evidenciando la estabilidad local en las configuraciones optimizadas para evitar inestabilidades de los miembros de la cercha.
- El aumento de la longitud de la cercha en un 15.00% proporciona directamente el aumento del peso de la cercha, por lo que están directamente relacionados entre la luz de la cercha y el peso, que deben ser tomados en cuenta en proyectos de grandes longitudes o luces.
- La disminución del límite de fluencia, obliga a rediseñar la zona central de la cercha, lo que muestra la sensibilidad del algoritmo con relación a los cambios del material que se puedan experimentar.

Estos hallazgos son importantes al momento de tomar decisiones para determinar la cercha que se pretende optimizar. La implementación de los modelos estructurales permitió encontrar soluciones viables, eficientes y seguras. La capacidad del AG permite encontrar soluciones ideales; los resultados obtenidos respaldan la *hipótesis inicial*, la automatización permite alcanzar configuraciones superiores en el desempeño frente a metodologías convencionales. Dentro de los hallazgos más importantes se puede mencionar:

- La optimización no compromete la seguridad, siempre que las restricciones estén correctamente implementadas.
- El modelo es replicable para otras geometrías, siempre que se actualicen las condiciones de contorno y la base de perfiles.
- Se confirma que una armadura liviana puede ser mejorada por medio de procesos de iteraciones gracias al uso de elitismo y mutación adaptativa.

4.3.2. Optimización del diseño estructural

La implementación del AG en MATLAB automatizó la selección de perfiles comerciales, permitiendo la exploración de un extenso espacio de soluciones de manera eficiente. El proceso de diseño convergió exitosamente, proporcionando los resultados finales para cada elemento de la armadura, incluyendo las fuerzas máximas (tracción y compresión), el perfil seleccionado y su peso individual.

El resultado directo de la *función objetivo* fue la minimización del peso total de la estructura optimizada. Se logró una *reducción del 3.84%, 1.44% y 3.13%* en el peso total de la armadura en comparación con diseños convencionales, representando ahorros económicos en costos de material de construcción en Sucre. Por ejemplo, en un proyecto real de una cubierta metálica, una reducción de la cuantía de la cercha, puede representar miles de bolivianos en acero, más aún cuando el país viene atravesando una inestabilidad económica.

Además de la reducción de peso, el modelo garantizó el cumplimiento riguroso de los límites de desplazamiento admisible ($L/300$), para los nodos de control bajo las combinaciones de carga de servicio. Esto asegura que la estructura no solo sea liviana y económica, sino también funcional y segura, evitando deformaciones excesivas que puedan comprometer su rendimiento a largo plazo. Un hallazgo técnico relevante fue la mejora del cumplimiento de la esbeltez de los elementos; mientras que en diseños convencionales la esbeltez podía ser *Parcial* o *Nula*, el diseño optimizado mostró el cumplimiento de la esbeltez; siendo una validación crítica de la calidad del diseño propuesto, también en el desempeño estructural ante fenómenos de pandeo, lo que directamente incrementa la seguridad de la estructura.

4.3.3. Cumplimiento de normas integral

El modelo “MARVALL” incorpora la evaluación de perfiles conforme a los criterios normativos locales e internacionales (como AISI, ASCE 7-16 y las normas bolivianas de granizo y viento). Esto asegura que las soluciones de diseño óptimas no solo sean eficientes, sino también seguras, un aspecto crucial dada la ausencia de normas bolivianas específicas para perfiles CFS y el uso de métodos computacionales.

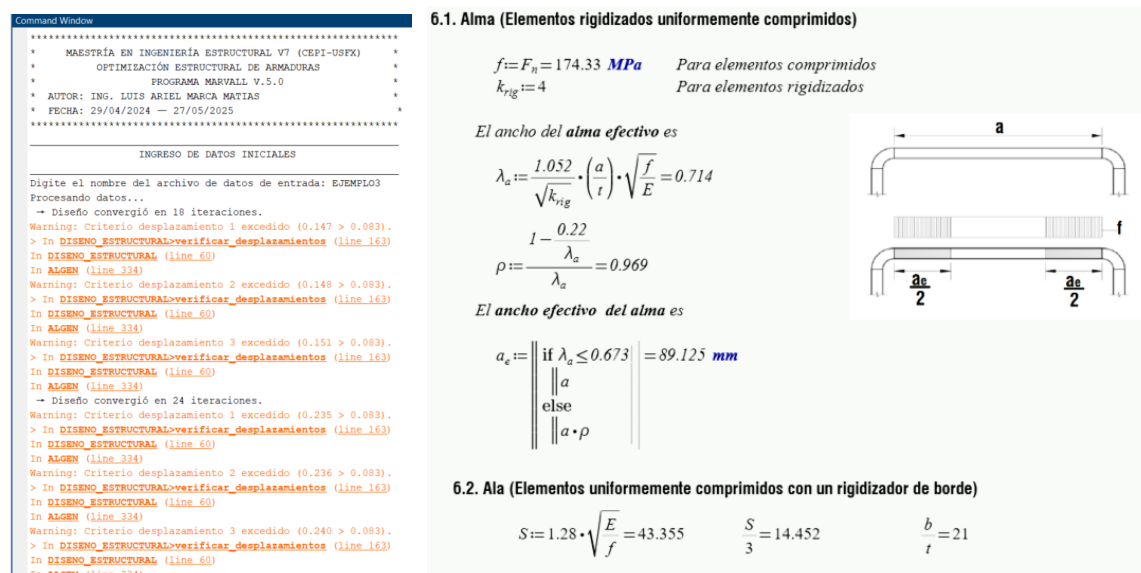


Figura 4.4. Desarrollo del cumplimiento de las normas de diseño en los procesos de iteración (Elaboración propia).

4.3.4. Desarrollo de librería de perfiles comerciales

La creación y tabulación de una extensa librería de perfiles CFS (secciones “C”, “2C”, y “2C + pletinas”) con sus propiedades geométricas y mecánicas calculadas con Mathcad Prime v10, fue un pilar fundamental para la viabilidad del algoritmo, porque ayuda a seleccionar perfiles reales y disponibles.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad y eficacia del modelo “MARVALL” para la optimización de estructuras metálicas; las soluciones, también ofrecen una *contribución en la sostenibilidad y peso/material* de los proyectos de construcción, al reducir el consumo de material. La aplicación de esta metodología es particularmente relevante para las condiciones de Sucre, al considerar factores ambientales específicos como el viento y el granizo.

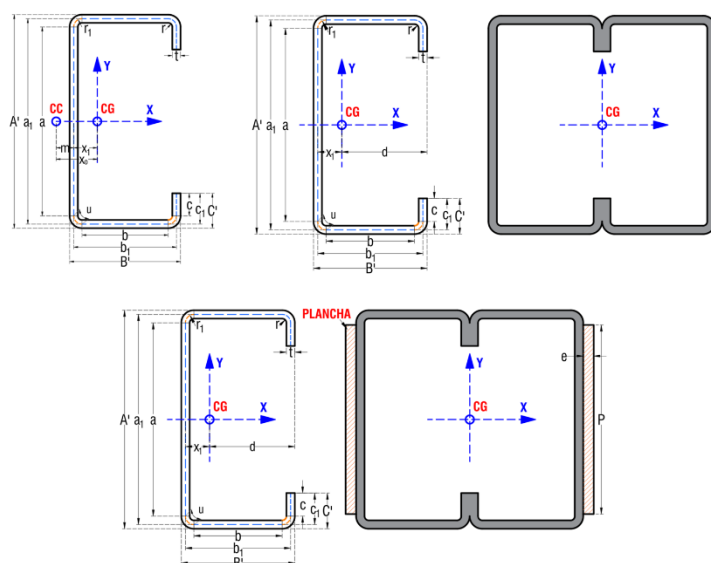


Figura 4.5. Sección de los perfiles CFS sesión normal, sección cajón y sección cajón con pletinas (Elaboración propia)

4.3.5. Limitaciones de la metodología desarrollada

Aunque la metodología de la optimización basada en AG hechas en MATLAB r2022b, ha demostrado ser muy útil para poder encontrar configuraciones estructurales, presenta ciertas limitaciones que condicionan el alcance y la validez de los resultados obtenidos. La calidad de las soluciones depende de la *función objetivo* y las restricciones del modelo; por tanto, las soluciones obtenidas pueden diferir de las condiciones óptimas en la práctica profesional; una simplificación excesiva o una formulación inadecuada puede afectar la precisión de los resultados de diseño. Asimismo, el análisis estructural realizado en SAP2000 se llevó a cabo bajo la hipótesis del comportamiento elástico lineal, con una aproximación válida en etapas iniciales de diseño, pero limita la consideración de fenómenos no lineales como el pandeo local, imperfecciones geométricas, flexibilidad en conexiones semirrígidas; afectando de manera los resultados obtenidos. Finalmente, los AG son métodos estocásticos; es decir, que son procesos aleatorios, como la mutación, el cruce de individuos; por lo que los resultados pueden variar en los procesos de iteración bajo condiciones iniciales; aunque este efecto puede ser controlado con parámetros de convergencia; donde no se puede determinar en forma exacta si las soluciones obtenidas son el óptimo global absoluto.

5. Discusión de resultados

En este capítulo se analizan los hallazgos de la investigación, evaluando la metodología de optimización estructural para estructuras metálicas en 2D usando perfiles CFS y su impacto en peso, cuantías, normativa y eficiencia, cruciales en ingeniería estructural.

5.1. Contribución de la investigación

La aplicación de AG en el diseño de estructuras de perfiles CFS mediante algoritmos metaheurísticos tiene propiedades únicas; un AG codificado en MATLAB, cuyos resultados son comparados con SAP2000, se basa en el uso de normas locales, validando la propuesta y los resultados obtenidos; este tipo de comprobación es indispensable para su aplicación y validez de la investigación (Phan et al. 2013; 2015; 2017). La investigación desarrolla un AG para el diseño optimizado de cubiertas metálicas usando perfiles CFS, respaldado por estudios previos realizados; la particularidad es considerar cargas y normas locales de Sucre; el AG ofrece alto potencial, diseños rápidos, optimizados y estables (Khan 2024; Phan et al. 2017). En las construcciones de los marcos y pórticos de perfiles CFS, plantean una solución para edificios de baja altura; no obstante, en este tipo de investigación y en los modelos tradicionales, todavía no se descubrió la optimización de marcos (fijos/variables) de acero (Phan et al. 2013).

5.2. Metodología de optimización: calibración y eficiencia

La calibración de los parámetros del AG, fue muy importante para poder obtener soluciones óptimas y eficientes, un grado de convergencia estable en esta investigación, como se lo menciona en el acápite **3.3.1. Optimización mediante algoritmos genéticos**, donde además se realizó la calibración de los parámetros del AG; además, se determinó un tamaño de

población de 80 individuos para un equilibrio en la exploración-convergencia de los resultados (frente a rangos mayores de 40-160) (Phan et al. 2013; 2017). Se adoptó una probabilidad de cruzamiento del 100.00% (superior al 80-90%) y una tasa de mutación del 5.00%, para introducir variabilidad y prevenir el estancamiento en óptimos locales (Ghaemifard y Ghannadiasl 2024; Khan 2024; Phan et al. 2013). Esta calibración fue un desafío crítico por su impacto directo en la convergencia y calidad; también se empleó una tasa de cruzamiento del 80.00% y mutación del 5.00% (inferior a 10-20% en otras aplicaciones); con una población inicial de 200-300 individuos. El algoritmo demostró convergencia estable en menos de 30 generaciones, superando la velocidad de 50-200 generaciones de estudios similares (Phan et al. 2015; 2017).

Los parámetros del AG pueden variar entre estudios y referencias bibliográficas, resaltando su adaptabilidad a cada problema particular; la eficiencia de los resultados se mostró en los umbrales de precisión 95.00% finalización, la tolerancia de 0.00004 y un límite de 30 generaciones, basado en la rápida convergencia de soluciones (Ghaemifard y Ghannadiasl 2024; Phan et al. 2013; 2015; 2017). El AG implementado en MATLAB para el modelo MARVALL mostró una convergencia estable en menos de 30 generaciones, dentro del análisis de los resultados obtenidos, se obtuvo para la cercha tipo Warren un valor 3.84%, tipo Home 1.44% y tipo Pratt 3.13%; reduciendo el material de la cercha (cuantías), que representa la diferencia entre el peso total de la estructura optimizada y la estructura original, como se muestra en la **Figura 5.1**.

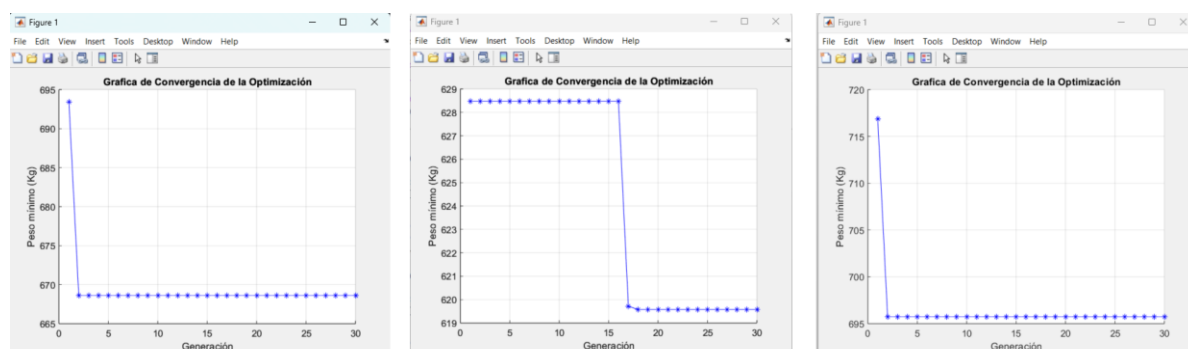


Figura 5.1. Gráfica de convergencia de la optimización estructural (izquierda) tipo Warren, (centro) tipo Home, (derecha) tipo Pratt (Elaboración propia)

Esta eficiencia redujo el tiempo de diseño de más de una hora a menos de 10 minutos, un beneficio clave de métodos de optimización. Para el cálculo del ahorro del valor de las cuantías de la cercha, se puede calcular de la siguiente manera:

$$Ahorro_{WARREN} = \frac{W_{inicial} - W_{optimo}}{W_{inicial}} = \frac{694.3119 \text{ kg} - 668.6292 \text{ kg}}{668.6292 \text{ kg}} = 3.84\% \quad (5.1)$$

$$Ahorro_{HOME} = \frac{W_{inicial} - W_{optimo}}{W_{inicial}} = \frac{628.4933 \text{ kg} - 619.5751 \text{ kg}}{619.575 \text{ kg}} = 1.44\% \quad (5.2)$$

$$Ahorro_{PRATT} = \frac{W_{inicial} - W_{optimo}}{W_{inicial}} = \frac{717.5195 \text{ kg} - 695.7103 \text{ kg}}{695.7103 \text{ kg}} = 3.13\% \quad (5.3)$$

Donde: "W" es el peso total de la estructura.

Los porcentajes de reducción de peso muestran una eficiencia del material del diseño óptimo frente al convencional. Sin embargo, este tipo de resultados, no se infiere reducción de costo total, debido a que depende de fabricación, uniones, logística y tiempos de montaje, no abordados en este modelo. Además, este tipo de porcentaje representa la eficiencia obtenida por el AG en la reducción del peso (cuantías), que influye directamente en la cantidad de material de los perfiles. En investigaciones realizadas por (Kaveh et al. 2021), como se muestra en la **figura 5.2** describen que los ahorros del material varían del 1.00 % hasta más del 35.00%, para estructuras para dos cargas puntuales; mientras que otros estudios realizados por (Tejani et al. 2018) presentan un rango de 2.00% al 30.00% para la misma estructura de 10 barras sometidas a una carga.

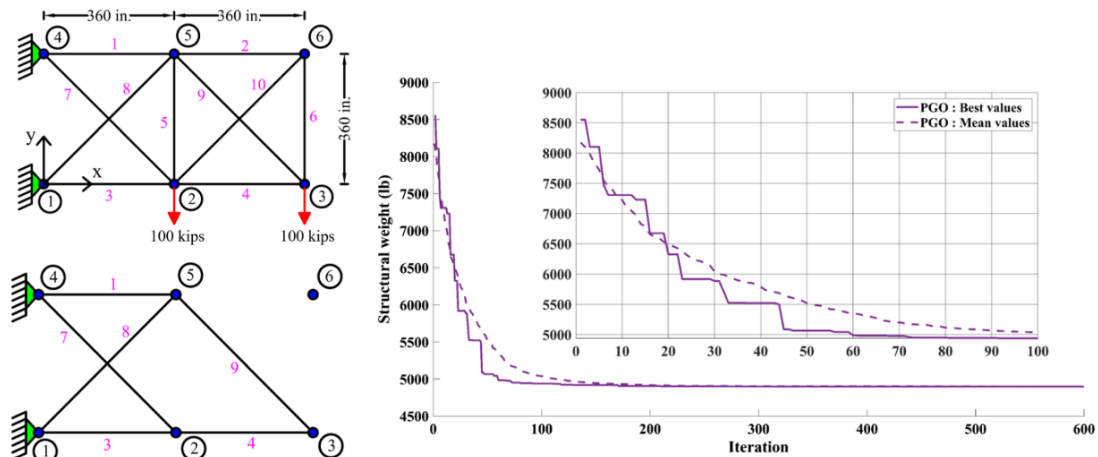


Figura 5.2. Cerchas inicial y optimizadas de 10 barras, demostrando la gráfica de convergencia respecto al peso de la estructura (Kaveh et al. 2021).

Estos hallazgos muestran la efectividad de los AG en la ingeniería civil; se justifica por su adaptación al problema específico de armaduras; además, mostró convergencia estable y eficiente sin estancamientos, atribuida a elitismo, mutación y población inicial diversa,

facilitando la exploración y previniendo inestabilidad estructural (Ghaemifard y Ghannadiasl 2024). Los AGs de codificación real (RC-GA), con operadores y la mutación polinomial, son altamente adecuados para el manejo de variables continuas y simplifican la optimización estructural (Phan et al. 2015; 2017).

5.3. Resultados de la optimización: reducción de peso y diseño

La eficiencia del AG en la reducción de peso estructural se confirmó con un ahorro en el perfil de la cercha tipo Warren un 3.84%, tipo Home 1.44% y tipo Pratt 3.13% en material, equivalente a 25.6827 kg, 8.9182kg y 21.8092kg por cada tipo cercha, con relación a los costos económicos de los materiales, se considera que la cuantía para estructuras metálicas varía entre $\rho_{cuantia} \geq 15.00 - 25.00 \text{ kg/m}^2$. Este resultado se alinea con investigaciones previas que demuestran la capacidad del AG para generar ahorros significativos: hasta 53% en costos de material para marcos CFS (Phan et al. 2015), un 30% en peso de uniones en marcos 2D de acero y 37% de ahorros generales en armaduras y marcos CFS (Ghaemifard y Ghannadiasl 2024); sin embargo, no influye en la reducción del costo total de cercha, mano de obra, logística, etc.

A diferencia del diseño convencional, limitado por prácticas empíricas, los AG ofrecen una capacidad superior para explorar espacios de diseño complejos, abordando problemas no lineales y discontinuos (Khan 2024; Phan et al. 2017). Los resultados de esta investigación demuestran que el AG seleccionó perfiles "2C" (sección cajón) y "2C+pletinas" para estructuras de luces largas (superiores a 7.50 m, como 15.00 m). Esta selección incrementa la inercia y rigidez en compresión, sin comprometer el peso, para minimizar pandeo, esfuerzos de torsión y cumplir límites de esbeltez en grandes luces (Ghaemifard y Ghannadiasl 2024; Phan et al. 2013; 2015; 2017). Aunque los algoritmos metaheurísticos (GWO, HS, FA, WOA, AOS, SNS, CGO, EVO, MGA) también son eficaces, la elección del AG se basó en la adaptación al problema de investigación; el estudio considera cargas específicas (Sucre) y normas locales e internacionales; un aspecto distintivo es el empleo de un algoritmo codificado en MATLAB para perfiles CFS; representando una innovación en optimización estructural (Ghaemifard y Ghannadiasl 2024; Khan 2024).

5.4. Verificación de la normativa de las soluciones optimizadas

El proceso de validación incluyó un *análisis crítico* de los *desplazamientos de nodos* y los *esfuerzos internos* de tracción y compresión, los cuales se encuentran desarrollados en la tabla 4.2, tabla 4.3 y tabla 4.4; en los elementos de la cercha. Esta evaluación exhaustiva es fundamental para garantizar el cumplimiento de los criterios de diseño y la seguridad estructural (Ghaemifard y Ghannadial 2024; Khan 2024; Phan et al. 2013; 2015; 2017).

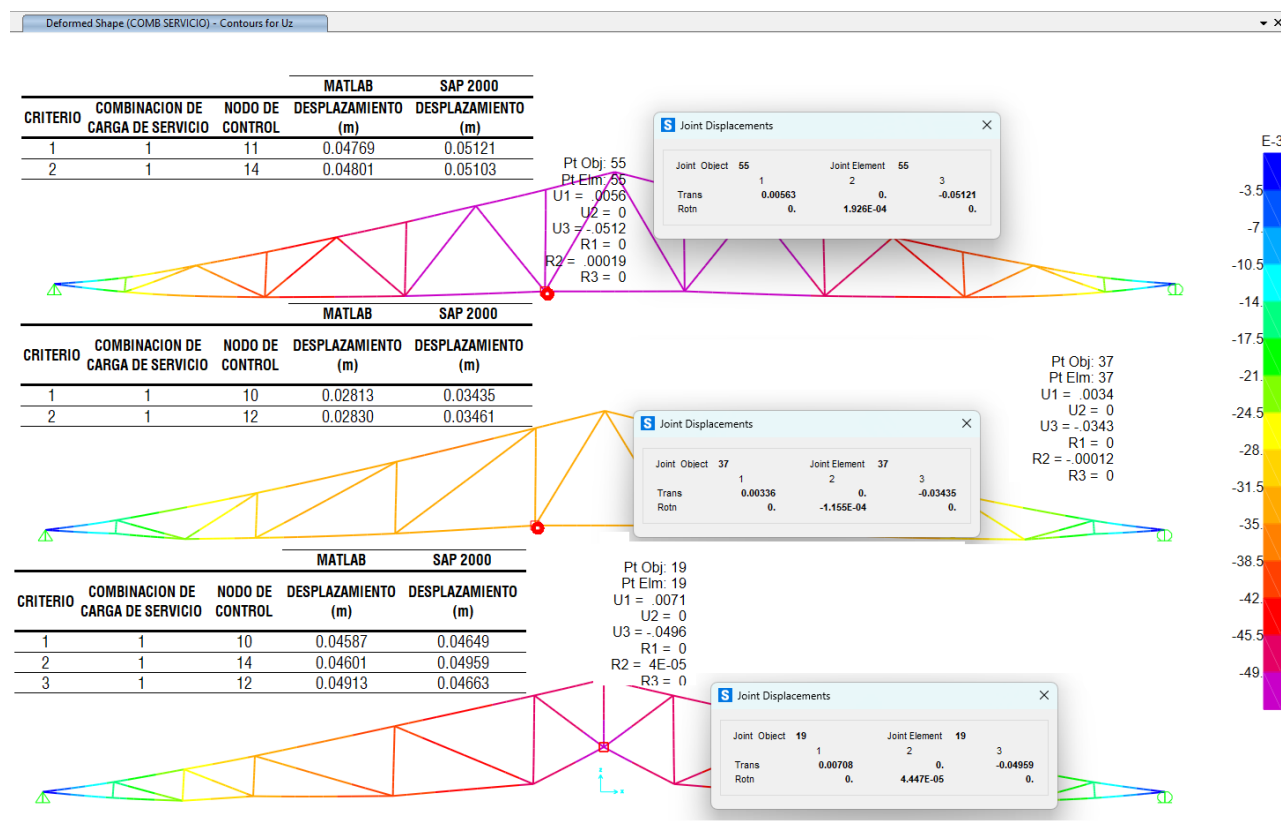


Figura 5.3. Resultados de los desplazamientos de los nodos de análisis para las cerchas Warren, Home y Pratt (Elaboración propia).

Todas las soluciones finales obtenidas cumplieron rigurosamente con el 100.00% de las restricciones de diseño, cumpliendo con las normas de diseño. La consistencia del modelo numérico se validó mediante una comparación de los esfuerzos, mediante una comparación de las desviaciones de las tres tipologías de cerchas en tracción de 4.243kN, 4.706kN y 2.316kN y en compresión 4.690kN, 4.786kN y 2.415kN respectivamente, las reacciones y deformaciones con el software SAP2000 v24.

La validación del modelo MARVALL ha sido crucial, demostrando una alta precisión y validez, las comparaciones con SAP2000v24 revelaron variaciones en los esfuerzos en

tracción de 8.292%, 13.222% y 5.975%; y en compresión de 6.254%, 12.465% y 26.059%, estos resultados confirman la capacidad de MARVALL, en línea con el software SAP2000.

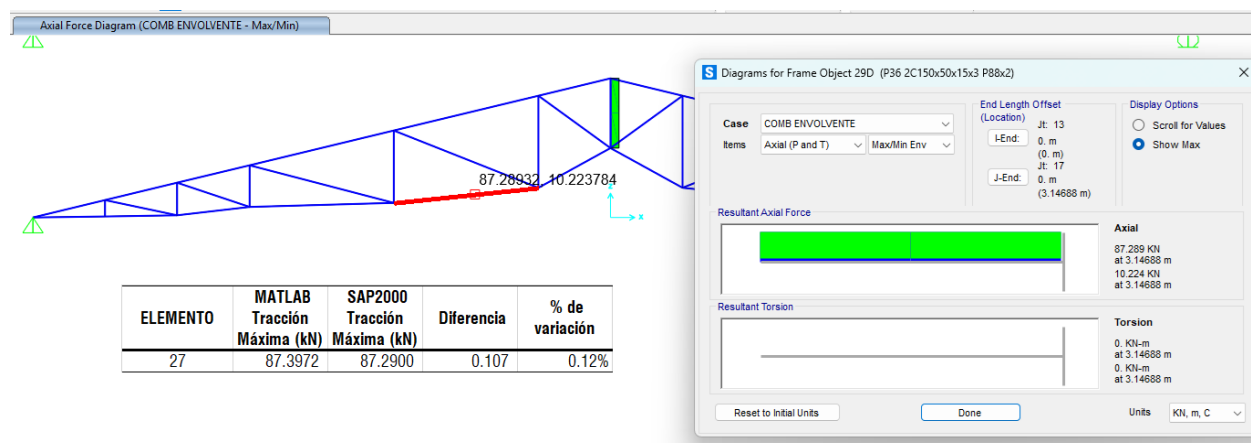


Figura 5.4. Figura de los resultados de los esfuerzos de tracción del **elemento 27**, obteniendo 87.2900 kN en relación con el modelo del algoritmo de 87.3972 kN en una cercha tipo Pratt (Elaboración propia).

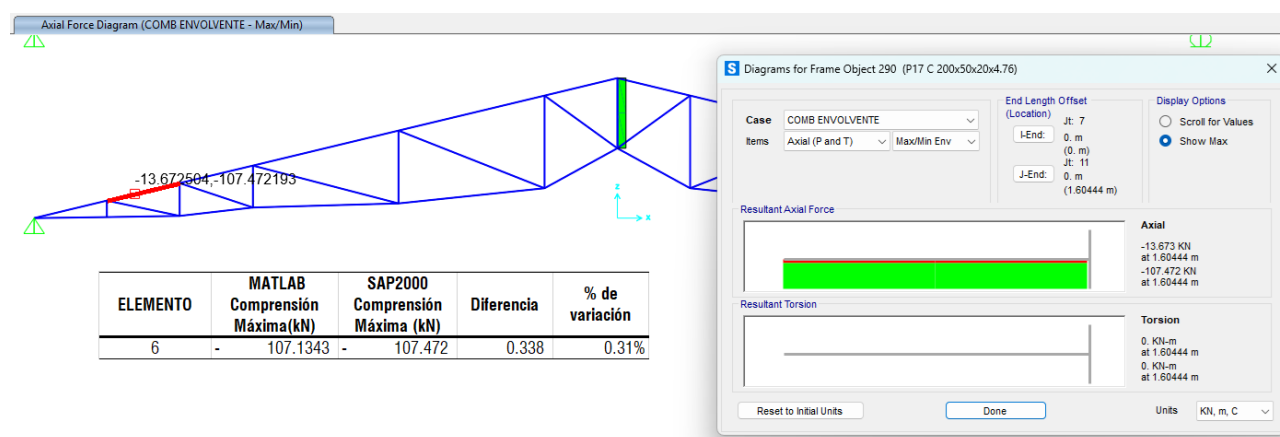


Figura 5.5. Figura de los resultados de los esfuerzos de compresión del **elemento 6**, obteniendo -170.472 kN en relación con el modelo del algoritmo de 107.1343 kN en una cercha tipo Pratt (Elaboración propia)

En las *pruebas de la sensibilidad del AG*, demostraron la robusta estabilidad computacional del modelo “MARVALL” tanto en los parámetros del algoritmo como en diversas perturbaciones de entrada, incluyendo cambios en cargas, geometría y perfiles. Durante estas pruebas, no se registraron errores de convergencia, desbordamientos numéricos, ni conflictos, lo que confirma la fiabilidad del modelo; la eficiencia en los resultados otorga a “MARVALL” un alto potencial de aplicabilidad en diversos campos:

- **Ingeniería estructural:** Facilita el desarrollo de diseños rápidos, optimizados y conformes a las normas de diseño, sin la necesidad de licencias de software costosas.

- **Entorno educativo:** Ofrece un código MATLAB como un valioso recurso didáctico para la enseñanza de métodos numéricos, análisis estructural y optimización.
- **Proyectos económicos:** Resulta crucial en proyectos donde la eficiencia del material y la rapidez en el cumplimiento de normas de diseño son importantes.

5.5. Cumplimiento normativo y consideraciones de diseño

El modelo MARVALL asegura un riguroso cumplimiento normativo para sus elementos estructurales, incluyendo límites de esbeltez ($\lambda \leq 300$ para tracción y $\lambda \leq 200$ para compresión) y el desplazamiento máximo admisible de $(L/300)$ bajo cargas de servicio.

La incorporación de arriostres en los aleros mejora el rendimiento estructural al reducir secciones y momento de flexión. Estudios previos muestran reducciones de peso de hasta 19.72% en marcos de CFS y ahorros significativos (Phan et al. 2015; 2017). La rigidez de las uniones es muy importante para predecir el comportamiento estructural, debido a que influye en la distribución de los momentos, deflexiones, estabilidad y áreas mínimas, permitiendo un modelado preciso; su implementación puede generar secciones menores y ahorros de hasta 14.00% comparado con uniones rígidas (Khan 2024). Aunque una reducción directa de peso por bases de columna rígidas y la rigidez general de las uniones impactan la distribución de fuerzas y deflexiones.

5.6. Futuras líneas de investigación

Para la implementación del desarrollo de investigaciones futuras, se recomiendan acciones clave, como: actualizar continuamente la base de datos de perfiles, incluyendo tipos “C” y “2C”, y asegurar la conformidad normativa con códigos recientes.

Es crucial ampliar las combinaciones de carga e investigar la integración de modelos 3D, considerando el aumento del tiempo computacional y hardware requerido; se recomienda incluir posición, y considerar el pandeo local entre restricciones laterales. Es esencial mejorar la eficiencia computacional del AG de codificación real para reducir el tiempo de cálculo, explorando técnicas avanzadas y enfoques híbridos (Ghaemifard y Ghannadiasl 2024).

Se sugiere aplicar el algoritmo a la optimización de topología estructural 3D para una investigación más realista; para la integración de la flexibilidad de uniones en diseños más ligeros y económicos (Khan 2024; Phan et al. 2013; 2015; 2017). El tema de investigación propuesto es muy extenso a objetivos múltiples (costo y constructibilidad), integrando catálogos de perfiles estandarizados/prefabricación y estructuras de costo locales para aumentar la práctica sin alterar el algoritmo.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En este trabajo de investigación se analizó y validó la manera de optimizar el diseño de cerchas 2D de cubiertas a dos aguas con perfiles CFS en la ciudad de Sucre, usando un algoritmo genético implementado en el script “MARVALL” en MATLAB y comparando sus resultados con un modelo de referencia en SAP2000. Las principales conclusiones del presente trabajo de investigación son las siguientes:

- Los algoritmos genéticos (AG) son adecuados para problemas de optimización estructural, porque trabajan con poblaciones de soluciones y se adaptan a escenarios complejos; sin embargo, su desempeño depende de una buena configuración de parámetros, y pueden presentar mucho tiempo en el desarrollo si no se calibran en forma adecuada.
- El comportamiento estructural de cubiertas con CFS exige considerar sus propiedades mecánicas, clasificación y la selección correcta de secciones comerciales, debido a la sensibilidad a fenómenos de esbeltez y estabilidad; por ello, disponer de una base de perfiles con sus dimensiones y propiedades (“2C”, “2C+pletinas”, etc.) es clave para diseños seguros y eficientes.
- El modelo MARVALL hecho en MATLAB permitió optimizar forma y tamaño de cerchas 2D, logrando convergencia estable en menos de 30 generaciones y reduciendo el tiempo de diseño en menos de 10 minutos. Además, se observó una reducción de peso (cuantías) en las tipologías evaluadas, como en la cercha tipo Warren 3.84%, Home 1.44% y Pratt 3.13%.
- La validación con el programa SAP2000 v24 respalda la confiabilidad del modelo propuesto; se reporta alta precisión en esfuerzos de tracción de 8.292%, 13.222% y

5.975%; y en compresión de 6.254%, 12.465% y 26.059%; cumpliendo con las restricciones de las normas de diseño, incluyendo desplazamientos tipo L/300, evidenciando que es posible reducir peso, sin comprometer seguridad estructural frente a diseños convencionales.

Recomendaciones

En este trabajo de investigación se ha realizado exclusivamente el análisis y la optimización de la estructura de las cubiertas metálicas hechas de perfiles CFS, para mejorar la utilidad de “MARVALL” y avanzar en la optimización estructural, se proponen las siguientes líneas de investigación futuras:

- Incluir en futuras investigaciones una función objetivo multicriterio como el peso, costo, constructibilidad, ya que el ahorro de peso no necesariamente implica ahorro total de costo de la fabricación, uniones, logística y montaje.
- Ampliar el modelo para evaluar más topologías como cerchas 3D de diferentes luces, pendientes y configuraciones de cubierta, para generalizar la aplicabilidad del script en escenarios reales.
- Incorporar restricciones adicionales de diseño como detallado de conexiones, criterios de montaje, longitudes comerciales, para que las soluciones optimizadas sean más ejecutables en obra.
- Complementar la validación numérica con más casos de comparación, como combinaciones de carga y modelos, con verificación experimental, para fortalecer el sustento técnico del desempeño del diseño optimizado.

Referencias bibliográficas

- Acciones sobre las estructuras - Acción del viento – Parte 1: Especificaciones norma NB 1225003-1:2014). 2022. «IBNORCA - NB 1225003-1:2022». Acciones sobre las estructuras - Acción del viento. <https://www.ibnorca.org/tienda/catalogo/detalle-norma/nb/nb-1225003-1:2022-nid=3701>.
- AISI. 1996. *The 1996 AISI Specification*. <https://scholarsmine.mst.edu/iscss/13iccfss/13iccfss-opening/3/>.
- Altay, Onur, Oguzhan Cetindemir, y Ibrahim Aydogdu. 2024. «Size optimization of planar truss systems using the modified salp swarm algorithm». *Engineering Optimization* 56 (4): 469-85. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2160449>.
- Aparicio-Ortubé, A. J., y Litzy E. Barrientos-Arancibia. 2022. «Métodos de reconstitución para la caracterización mecánica de suelos de grano grueso en ensayos triaxiales». *Ingenium* 1 (3): 47-53.
- Avcı, Muhammed Serdar, Demet Yavuz, Emre Ercan, y Ayhan Nuhoğlu. 2024. «Efficient Sizing and Layout Optimization of Truss Benchmark Structures Using ISRES Algorithm». *Applied Sciences* 14 (8): 8. <https://doi.org/10.3390/app14083324>.
- Awad, Rafiq. 2021. «Sizing optimization of truss structures using the political optimizer (PO) algorithm». *Structures* 33 (octubre): 4871-94. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.027>.
- Bekdaş, Gebrail, Melda Yucel, y Sinan Melih Nigdeli. 2021. «Evaluation of Metaheuristic-Based Methods for Optimization of Truss Structures via Various Algorithms and Lévy Flight Modification». *Buildings* 11 (2): 2. <https://doi.org/10.3390/buildings11020049>.
- Bodalal, Rafiq, y Farag Shuaib. 2023. «Marine Predators Algorithm for Sizing Optimization of Truss Structures with Continuous Variables». *Computation* 11 (5): 5. <https://doi.org/10.3390/computation11050091>.
- Botejara-Antúnez, Manuel, Jaime González-Domínguez, y Justo García-Sanz-Calcedo. 2022. «Comparative analysis of flat roof systems using life cycle assessment methodology: Application to healthcare buildings». *Case Studies in Construction Materials* 17 (diciembre): e01212. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01212>.
- Brütting, Jan, Camille Vandervaeren, Gennaro Senatore, Niels De Temmerman, y Corentin Fivet. 2020. «Environmental impact minimization of reticular structures made of reused and new elements through Life Cycle Assessment and Mixed-Integer Linear Programming». *Energy and Buildings* 215 (mayo): 109827. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109827>.
- Cazacu, Razvan, y Lucian Grama. 2014. «Steel Truss Optimization Using Genetic Algorithms and FEA». *Procedia Technology*, The 7th International Conference

- Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2013, 10-11 October 2013, Petru Maior University of Tirgu Mures, Romania, vol. 12 (enero): 339-46. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.496>.
- Charalampakis, Aristotelis E., y George C. Tsiatas. 2019. «Critical Evaluation of Metaheuristic Algorithms for Weight Minimization of Truss Structures». *Frontiers in Built Environment* 5 (octubre). <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00113>.
- Charan, Pal Ranjan Sasti, Nirmal Baran Hui, y J. Paulo Davim. 2021. «Analysis and Optimization of Truss Structures, Constrained Handling Using Genetic Algorithm». *Journal of Applied and Computational Mechanics* 7 (3): 1324-33. <https://doi.org/10.22055/jacm.2020.33076.2143>.
- Congiu, Eleonora. 2020. *Parametric Design and Optimization of Arched Trusses under Vertical and Horizontal Multi-Load Cases*. marzo 6. <https://iris.unica.it/handle/11584/290547>.
- Correo Del Sur. 2021. «Tres Granizadas Históricas Se Cuentan Desde El 2008 En Sucre». <https://correodelsur.com/local/20210107/tres-granizadas-historicas-se-cuentan-desde-el-2008-en-sucre.html>.
- Correo del Sur. 2022. «Transgresiones al patrimonio arquitectónico ¿Qué está permitido y qué no?» <https://correodelsur.com/panorama/20220626/transgresiones-al-patrimonio-arquitectonico-que-esta-permitido-y-que-no.html>.
- Cuevas Jiménez, Erick V., Jose V. Osuna Enciso, Diego A. Oliva Navarro, y Margarita A. Diaz Cortes. 2016. *Optimización Algoritmos Programados Con Matlab*. Alfaomega. <https://www.alpha-editorial.com/Papel/9789587782110/Optimizaci%C3%B3n+Algoritmos+Programados+Con+Matlab>.
- Delyová, Ingrid, Peter Frankovský, Jozef Bocko, et al. 2021. «Sizing and Topology Optimization of Trusses Using Genetic Algorithm». *Materials* 14 (4): 4. <https://doi.org/10.3390/ma14040715>.
- Falcon, Gines Arturo Santos, Rodrigo das Chagas Gaspar, Walnório Graça Ferreira, y Fernando César Meira Menandro. 2023. «Computational Methodology for the Optimal Design of Steel Truss Frames Integrating MATLAB and FEA Platforms». *REM - International Engineering Journal* 76 (abril): 129-37. <https://doi.org/10.1590/0370-44672020760117>.
- Gatheeshgar, Perampalam, Keerthan Poologanathan, Shanmuganathan Gunalan, Brabha Nagaratnam, Konstantinos Daniel Tsavdaridis, y Jun Ye. 2020. «Structural Behaviour of Optimized Cold-Formed Steel Beams». *Steel Construction* 13 (4): 294-304. <https://doi.org/10.1002/stco.201900024>.
- Ghaemifard, Saeedeh, y Amin Ghannadiasl. 2024. «A Comparison of Metaheuristic Algorithms for Structural Optimization: Performance and Efficiency Analysis». *Advances in Civil Engineering* 2024 (1): 2054173. <https://doi.org/10.1155/2024/2054173>.
- González-Vallejo, Patricia, Radu Muntean, Jaime Solís-Guzmán, y Madelyn Marrero. 2020. «Carbon Footprint of Dwelling Construction in Romania and Spain. A Comparative Analysis with the OERCO2 Tool». *Sustainability* 12 (17): 17. <https://doi.org/10.3390/su12176745>.
- Grandon Albornoz, Edgar. 2011. *Diseño basico de estructuras de acero laminado en frio*. Vol. 1.

- Hernández Sampieri, Roberto, Carlos Fernández Collado, y Pilar Baptista Lucio. 2014. *Metodología de la investigación*. McGraw Hill España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>.
- Jafari, Malihe, Eysa Salajegheh, y Javad Salajegheh. 2021. «Optimal design of truss structures using a hybrid method based on particle swarm optimizer and cultural algorithm». *Structures* 32 (agosto): 391-405. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.017>.
- Kashani, Ali R., Charles V. Camp, Mehdi Rostamian, Koorosh Azizi, y Amir H. Gandomi. 2022. «Population-Based Optimization in Structural Engineering: A Review». *Artificial Intelligence Review* 55 (1): 345-452. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10036-w>.
- Kaveh, Ali, Kiarash Biabani Hamedani, Seyed Milad Hosseini, y Taha Bakhshpoori. 2020. «Optimal design of planar steel frame structures utilizing meta-heuristic optimization algorithms». *Structures* 25 (junio): 335-46. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.032>.
- Kaveh, Ali, Seyed Milad Hosseini, y Ataollah Zaeerza. 2021. «Size, Layout, and Topology Optimization of Skeletal Structures Using Plasma Generation Optimization». *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 45 (2): 513-43. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00527-1>.
- Kaveh, Ali, y Ataollah Zaeerza. 2020. «Size/Layout Optimization of Truss Structures Using Shuffled Shepherd Optimization Method». *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 64 (2): 2. <https://doi.org/10.3311/PPci.15726>.
- Khan, Belal Jamaluddin. 2024. «MATLAB-based optimization process using Sap2000». PhD Thesis, Politecnico di Torino. <https://webthesis.biblio.polito.it/secure/31191/1/tesi.pdf>.
- Li, Wenhua, Tao Zhang, Rui Wang, y Jing Liang. 2023. «Multimodal Multi-objective Optimization: Comparative Study of the State-of-the-Art». *Swarm and Evolutionary Computation* 77 (marzo): 101253. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2023.101253>.
- Málaga-Chuquitaype, Christian. 2022. «Machine Learning in Structural Design: An Opinionated Review». *Frontiers in Built Environment* 8 (febrero). <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.815717>.
- Mei, Linfeng, y Qian Wang. 2021. «Structural Optimization in Civil Engineering: A Literature Review». *Buildings* 11 (2): 2. <https://doi.org/10.3390/buildings11020066>.
- Mortazavi, Ali. 2019. «THE PERFORMANCE COMPARISON OF THREE METAHEURISTIC ALGORITHMS ON THE SIZE, LAYOUT AND TOPOLOGY OPTIMIZATION OF TRUSS STRUCTURES». *Mugla Journal of Science and Technology* 5 (2): 2. <https://doi.org/10.22531/muglajsci.593482>.
- Mortazavi, Ali. 2020. «A new fuzzy strategy for size and topology optimization of truss structures». *Applied Soft Computing* 93 (agosto): 106412. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106412>.
- Nguyen-Van, Sy, Khoa T. Nguyen, Van Hai Luong, Seunghye Lee, y Qui X. Lieu. 2021. «A novel hybrid differential evolution and symbiotic organisms search algorithm for size and shape optimization of truss structures under multiple frequency

- constraints». *Expert Systems with Applications* 184 (diciembre): 115534. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115534>.
- Peleshko, Ivan, y Vitalina Yurchenko. 2023. «Parametric Optimization of Bar Structures with Discrete and Continuous Design Variables Using Improved Gradient Projection Method». *Strength of Materials and Theory of Structures*, n.º 110 (junio): 110. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.178-198>.
- Phan, Duoc T., James B. P. Lim, Tiku T. Tanyimboh, A. M. Wrzesien, Wei Sha, y R. M. Lawson. 2015. «Optimal design of cold-formed steel portal frames for stressed-skin action using genetic algorithm». *Engineering Structures* 93 (junio): 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.02.037>.
- Phan, Duoc T., James B.P. Lim, Wei Sha, et al. 2013. «Design optimization of cold-formed steel portal frames taking into account the effect of building topology». *Engineering Optimization* 45 (4): 415-33. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2012.678493>.
- Phan, Thanh Duoc, James B. P. Lim, Meheron Selowara Joo, y Hieng-Ho Lau. 2017. «Design Optimization of Long-Span Cold-Formed Steel Portal Frames Accounting for Effect of Knee Brace Joint Configuration». *Technologies* 5 (4): 4. <https://doi.org/10.3390/technologies5040081>.
- Renkavieski, Christopher, y Rafael Stubbs Parpinelli. 2021. «Meta-heuristic algorithms to truss optimization: Literature mapping and application». *Expert Systems with Applications* 182 (noviembre): 115197. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115197>.
- Sánchez Caballero, Samuel. 2012. «Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos». En *Riunet*. Tesis doctoral, Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/15409>.
- Savsani, Vimal, Ghanshyam Tejani, y Vivek Patel. 2024. «Topology, Shape, and Size Optimization». En *Truss Optimization: A Metaheuristic Optimization Approach*, editado por Vimal Savsani, Ghanshyam Tejani, y Vivek Patel. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49295-2_6.
- SENAMHI. 2024. «SENAMHI». SENAMHI. <https://senamhi.gob.bo/index.php/rhidrologico>.
- SICOES. 2025. «SICOES». <https://www.sicoes.gob.bo/portal/contrataciones/busqueda/convocatorias.php?tipo=convNacional&tipoContratacion=O&token=e47fc61d159e732290c738128a9c42041d9687e3cd1f878ca6f63aa551f215a7>.
- Swabarna, Roy, y Kundu Chinmay Kumar. 2020. *State-Of-The-Art Review On The Use Of Optimization Algorithms In Steel Truss*.
- Tejani, Ghanshyam G., Nantiwat Pholdee, Sujin Bureerat, Doddy Prayogo, y Amir H. Gandomi. 2019. «Structural optimization using multi-objective modified adaptive symbiotic organisms search». *Expert Systems with Applications* 125 (julio): 425-41. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.068>.
- Tejani, Ghanshyam G., Vimal J. Savsani, Vivek K. Patel, y Poonam V. Savsani. 2018. «Size, shape, and topology optimization of planar and space trusses using mutation-based improved metaheuristics». *Journal of Computational Design and Engineering* 5 (2): 198-214. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.10.001>.

-
- Thar, Eain Kyi. 2021. «Chaos Game Optimization Method for Weight Minimization of Steel Truss Structure». Thesis, Chulalongkorn University. <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/80824>.
- Van, Thu Huynh, Sawekchai Tangaramvong, Soviphou Muong, y Phuc Tran Van. 2022. «Combined Gaussian Local Search and Enhanced Comprehensive Learning PSO Algorithm for Size and Shape Optimization of Truss Structures». *Buildings* 12 (11): 11. <https://doi.org/10.3390/buildings12111976>.
- Weldeyesus, Alemseged Gebrehiwot, Jacek Gondzio, y Miguel F. Anjos. 2024. «On the Scalability of Truss Geometry and Topology Optimization with Global Stability Constraints via Chordal Decomposition». *Structural and Multidisciplinary Optimization* 68 (1): 7. <https://doi.org/10.1007/s00158-024-03947-z>.
- Zambrana Enríquez, Reynaldo Félix. 2025. «Norma Boliviana de Acción del Granizo sobre las Construcciones».

A. Determinación de las propiedades geométricas

Para la realización del cálculo de las propiedades geométricas y mecánicas de los perfiles conformados en frío de sección “C”, cajón “2C” y “2C +pletinas” más comerciales que existen; para lo cual se hizo un cálculo usando Mathcad Prime v10 y se describe a continuación las ecuaciones y el procedimiento para el cálculo:

A.1. Perfil costanero “C”

Para el cálculo de las propiedades geométricas se usarán las siguientes dimensiones, las cuales serán utilizadas en forma idéntica para el resto de perfiles

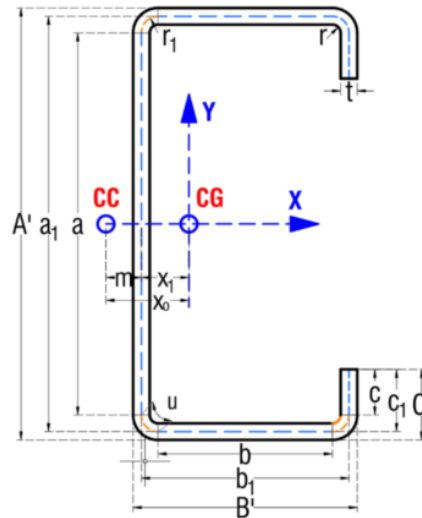


Figura A.1. Dimensiones y áreas de un perfil costanero “C” (Elaboración propia).

Perfil costanero “C” 100x50x15x2 mm

Donde: $A' = 100 \text{ mm}$, $B' = 50 \text{ mm}$, $C' = 15 \text{ mm}$; $r = t = 2 \text{ mm}$

Para el cálculo de los parámetros básicos se usarán las fórmulas a continuación:

$$r_1 = r + \frac{t}{2} \quad (\text{A.1})$$

$$u = \frac{\pi}{2} \cdot r_1 \quad (\text{A.2})$$

$$a = A' - (2.r_f + t) \quad (A.3)$$

$$a_f = A' - t \quad (A.4)$$

$$b = B' - \left(r_f + t/2 + (r_f + t/2)\right) \quad (A.5)$$

$$b_f = B' - (2.t/2) \quad (A.6)$$

$$c = C' - (r_f + t/2) \quad (A.7)$$

$$c_f = C' - t/2 \quad (A.8)$$

Realizando el cálculo de los valores de para el perfil “C” 100x50x15x2 mm se obtuvieron:

Tabla A.1. Parámetros básicos de un perfil costanero simple

Variables	Valores (mm)
r_f	3.00
u	4.71
a	92.00
a_f	98.00
b	42.00
b_f	48.00
c	11.00
c_f	14.00

Nota: Esta tabla fue calculada de los valores usando Mathcad Prime v10

El cálculo del área de la sección del perfil costanero se usará la ecuación:

$$A = t.(a + 2.(b + u) + 2.(c + u)) \quad (A.9)$$

Para calcular la distancia entre el centroide “CG” y la línea central del alma

$$x_f = \frac{2.t}{A} \cdot \left(b \cdot \left(\frac{b}{2} + r_f \right) + u \cdot (0.363.r_f) + (u \cdot (b + 1.637.r_f) + c \cdot (b + 2.r_f)) \right) \quad (A.10)$$

El cálculo de la distancia entre el centro cortante “CC” y la línea central del alma

$$m = b_f \cdot \left(\frac{(3.a_f^2.b_f) - c_f.(6.a_f^2 - 8.c_f^2)}{a_f^3 + (6.a_f^2.b_f) + c_f.(8.c_f^2 - 12.a_f.c_f + 6.a_f^2)} \right) \quad (A.11)$$

El cálculo de la distancia entre el centroide del elemento “CG” y el centro cortante “CC”

$$x_0 = -(x_f + m) \quad (A.12)$$

Para poder determinar el momento de la inercia respecto al eje “x”

$$\xi_x = 0.0833.c^3 + \frac{c}{4} \cdot (a - c)^2 + u \cdot \left(\frac{a}{2} + 0.637.r_f \right)^2 + 0.149.r_f^3 \quad (A.13)$$

$$I_x = 2.t \cdot \left(0.0417.a_f^3 + b \cdot \left(\frac{a}{2} + r_f \right)^2 + u \cdot \left(\frac{a}{2} + 0.637.r_f \right)^2 + 0.149.r_f^3 + \xi_x \right) \quad (A.14)$$

Para poder determinar el momento de inercia respecto al eje “y”

$$\xi_y = c. (b + 2.r_l)^2 + u. (b + 1.367.r_l)^2 + 0.149.r_l^3 \quad (\text{A.15})$$

$$I_y = 2.t. \left(b. \left(\frac{b}{2} + r_l \right)^2 + 0.0833.b^3 + 0.356.r_l^3 + \xi_x \right) - A.x_l^2 \quad (\text{A.16})$$

Los radios de giro en el eje “x”, en el eje “y”; y el radio de giro polar

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (\text{A.17})$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (\text{A.18})$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o} \quad (\text{A.19})$$

Para los módulos de sección en el eje “x” y en el eje “y”

$$S_x = \frac{I_x}{0.50.A'} \quad (\text{A.20})$$

$$S_y = \frac{I_y}{B' - \left(x_l + \frac{t}{2} \right)} \quad (\text{A.21})$$

Una vez realizado el desarrollo usando las fórmulas de cálculo se obtienen los siguientes valores descritos en la tabla

Tabla A.2. Tabla de resumen de valores calculados para un perfil “C”

Variables	Valores
A	433.699 mm ²
I_x	692436.783 mm ⁴
I_y	149804.146 mm ⁴
r_x	39.957 mm
r_y	18.585 mm
S_x	13848.736 mm ³
S_y	4574.549 mm ³

Nota: Esta tabla fue calculada de los valores usando Mathcad Prime v10.

Por tanto, para el cálculo y el desarrollo de la base de datos de la librería se realizó el mismo cálculo siguiendo la misma secuencia de cálculo para poder llenar el archivo en Excel .xlsx; para que el programa “MARVALL” funcione en forma adecuada.

A.2. Perfil costanero “2C” o cajón

Para el cálculo de las propiedades geométricas se usarán las siguientes dimensiones, las cuales serán utilizadas en forma idéntica para el resto de perfiles:

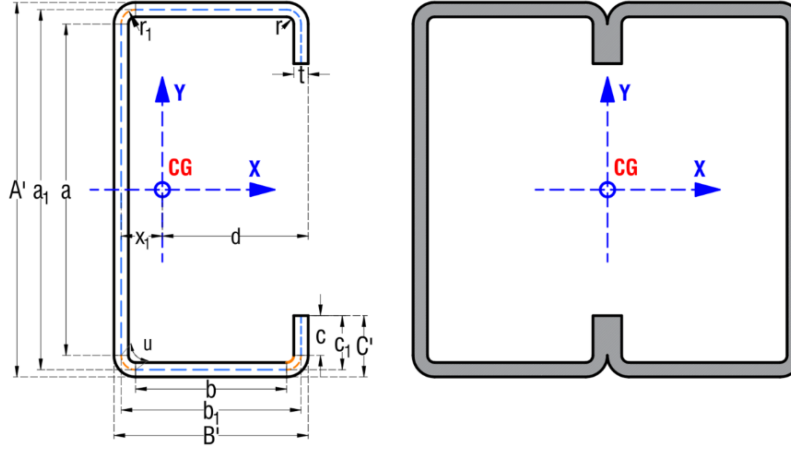


Figura A.2. Dimensiones y áreas de un perfil “2C” (Elaboración propia).

Para el cálculo costanero “2C” $100 \times 50 \times 15 \times 3 \text{ mm}$ de los parámetros básicos se usarán las mismas fórmulas (A.1), (A.2), (A.3), (A.4), (A.5), (A.6), (A.7), (A.8). Realizando el cálculo de los valores de para el perfil “C” $100 \times 50 \times 15 \times 3 \text{ mm}$ se obtuvieron:

Tabla A.3. Parámetros básicos de un perfil costanero simple

Variables	Valores (mm)
r_f	4.50
u	7.069
a	88.00
a_1	97.00
b	38.00
b_1	47.00
c	9.00
c_1	13.50

Nota: Esta tabla fue calculada de los valores usando Mathcad Prime v10

El cálculo del área de la sección del *perfil costanero simple*, se usará la ecuación:

$$A_S = t \cdot (a + 2 \cdot (b + u) + 2 \cdot (c + u)) \quad (\text{A.22})$$

Para calcular la distancia entre el centroide “CG” y la línea central del alma

$$x_1 = \frac{2 \cdot t}{A} \cdot \left(b \cdot \left(\frac{b}{2} + r_f \right) + u \cdot (0.363 \cdot r_f) + (u \cdot (b + 1.637 \cdot r_f) + c \cdot (b + 2 \cdot r_f)) \right) \quad (\text{A.23})$$

Para poder determinar el momento de la inercia respecto al *eje “x”*, se usarán las mismas ecuaciones (A.13), (A-14); al igual para el momento de inercia respecto al *eje “y”* también se usará (A.15), (A-16);

El área de la sección compuesta y el momento de inercia respecto al eje “x” y en el eje “y” será calculada de acuerdo a las siguientes fórmulas

$$A_{2C} = 2 \cdot A_s \quad (A.24)$$

$$I_{x\ 2c} = 2 \cdot I_x \quad (A.25)$$

La distancia del centroide de un costanero al “CG” para calcular la inercia en eje “y”

$$d = b_1 + \frac{t}{2} - x_1 \quad (A.26)$$

$$I_{y\ 2c} = 2 \cdot (I_y + A_s \cdot d^2) \quad (A.27)$$

Para los radios de giro en el *eje “x”* y en el *eje “y”*

$$r_{x\ 2c} = \sqrt{\frac{I_{x\ 2c}}{A_{2C}}} \quad (A.28)$$

$$r_{y\ 2c} = \sqrt{\frac{I_{y\ 2c}}{A_{2C}}} \quad (A.29)$$

Una vez realizado el desarrollo usando las fórmulas de cálculo, se obtienen los siguientes valores descritos en la tabla.

Tabla A.4. Tabla de resumen de valores calculados para un perfil “2C”

Variables	Valores
A_{2C}	1261.646 mm ²
$I_{x\ 2c}$	1955818.317 mm ⁴
$I_{y\ 2c}$	1769550.874 mm ⁴
$r_{x\ 2c}$	39.373 mm
$r_{y\ 2c}$	37.451 mm

Nota: Esta tabla fue calculada de los valores usando Mathcad Prime v10.

A.3. Perfil costanero “2C+plancha

Para este caso particular se seguirán los mismos pasos y la misma secuencia de cálculo, pero con la única diferencia de que se añadirá una plancha o pletina para poder mejorar su

resistencia en el eje “y”; para el presente ejemplo, se usó el perfil “2C 100x50x15x3+ plancha de 88x2mm”.

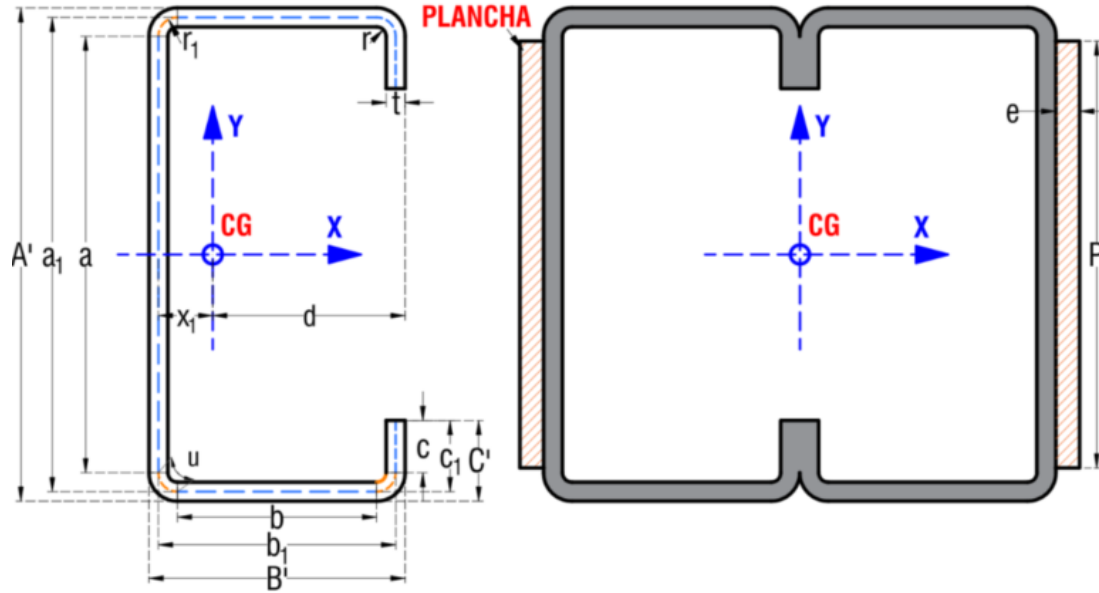


Figura A.3. Dimensiones y áreas de un perfil “2C+plancha” (Elaboración propia).

Para el cálculo de los parámetros básicos se usarán las mismas fórmulas (A.1), (A.2), (A.3), (A.4), (A.5), (A.6), (A.7), (A.8). Realizando el cálculo de los valores de para el perfil “C” 100x50x15x3 mm respectivamente; al igual que para el cálculo del área de la sección simple se usó la fórmula (A.22), pero para el cálculo del área de la plancha se usó la fórmula:

$$A_p = p \cdot e \quad (A.30)$$

Donde: “p” representa la altura de la plancha, y “e” el espesor de la plancha.

Para poder determinar las inercias respectivas al eje “x” y el eje “y”, se calculó usando las fórmulas:

$$I_{plancha \text{ "x" }} = \frac{e \cdot p^3}{12} \quad (A.31)$$

$$I_{plancha \text{ "y" }} = \frac{e^3 \cdot p}{12} \quad (A.32)$$

El cálculo de las inercias para una sección simple es el mismo según las fórmulas (A.13), (A.14), (A.15), (A.16); finalmente, para el cálculo del área compuesta más la plancha será

$$A_{2C+plancha} = 2 \cdot A_{perfil \text{ simple}} + 2 \cdot A_{plancha} \quad (A.33)$$

Para el cálculo del momento de inercia compuesta en el eje “x”, se usaron las siguientes fórmulas

$$I_{2C+plancha \text{ "x" }} = 2 \cdot I_{perfil \text{ simple}} + 2 \cdot I_{plancha} \quad (A.34)$$

En el momento de la inercia compuesta en el eje “y”, se usó el teorema de Steiner.

$$d = b_1 + \frac{t}{2} - x_1 \quad (\text{A.35})$$

$$d_1 = \frac{e}{2} + B' \quad (\text{A.36})$$

$$I_{2C+plancha \text{ "y"}} = 2 \cdot (I_{sec. \text{ simple "y"}} + A_{sec. \text{ simple}} \cdot d^2) + 2 \cdot (I_{plancha \text{ "y"}} + A_{plancha} \cdot d_1^2) \quad (\text{A.37})$$

Finalmente, para el radio de giro de la sección compuesta, será calculado:

$$r_{2C+plancha \text{ "x"}} = \sqrt{\frac{I_{2C+plancha \text{ "x"}}}{A_{2C+plancha}}} \quad (\text{A.38})$$

$$r_{2C+plancha \text{ "y"}} = \sqrt{\frac{I_{2C+plancha \text{ "y"}}}{A_{2C+plancha}}} \quad (\text{A.39})$$

Una vez realizado el desarrollo del cálculo de las propiedades geométricas para los casos de los perfiles de la sección simple “C”, sección compuesta “2C” o cajón y la sección “2C+plancha” se ha procedido a la tabulación de los resultados obtenidos; cabe mencionar que para poder mejorar la rapidez del cálculo y la precisión se utilizó el software Mathcad Prime v10 cuyas plantillas realizadas se encuentran en formato digital de la presente tesis.

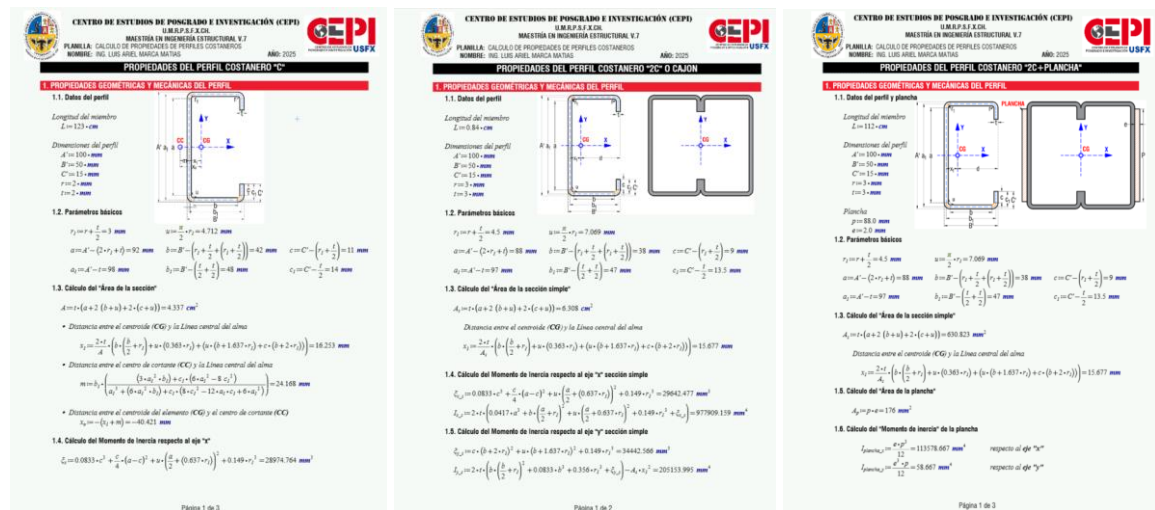


Figura A.4. Memorias de cálculo desarrolladas de las propiedades geométricas de los perfiles “C”, “2C” y “2C+Plancha” (Elaboración propia)

Una vez realizado el cálculo de las propiedades geométricas de todos los perfiles, se procedió al registro y tabulación de todos los datos calculados, para que posteriormente el

programa “MARVALL”, pueda escoger los perfiles más adecuados para el análisis y la selección del más adecuado.

Tabla A.5. Tabla de la librería de perfiles comerciales

PERFIL	NOMBRE	As (m ²)	E (kN/m ²)	r2 (m)	r3 (m)	PERFIL ESTABLE	Q	W (Kg/m)
1	50x25x10x2	0.000214	200,000,000.00	0.019251	0.009129	-	-	1.6775
2	50x30x10x2	0.000234	200,000,000.00	0.019702	0.010948	-	-	1.8345
3	60x40x10x0.8	0.000124	200,000,000.00	0.024923	0.015120	-	-	0.9718
4	80x40x15x2	0.000354	200,000,000.00	0.031571	0.015106	-	-	2.7765
5	80x40x15x3	0.000511	200,000,000.00	0.030987	0.014573	-	-	4.0100
6	100x50x15x2	0.000434	200,000,000.00	0.039957	0.018585	-	-	3.4045
7	100x50x15x3	0.000631	200,000,000.00	0.039373	0.018034	-	-	4.9520
8	100x50x15x4	0.000815	200,000,000.00	0.038771	0.017466	-	-	6.3962
9	120x50x15x3	0.000691	200,000,000.00	0.046638	0.017789	-	-	5.4230
10	125x50x15x2	0.000484	200,000,000.00	0.049060	0.018281	-	-	3.7970
11	125x50x15x3	0.000706	200,000,000.00	0.048421	0.017720	-	-	5.5407
12	125x50x15x4	0.000915	200,000,000.00	0.047763	0.017143	-	-	7.1812
13	125x50x15x6	0.001293	200,000,000.00	0.046381	0.015935	-	-	10.1523
14	150x50x15x2	0.000534	200,000,000.00	0.057868	0.017914	-	-	4.1895
15	150x50x15x3	0.000781	200,000,000.00	0.057175	0.017346	-	-	6.1295
16	150x50x15x4	0.001015	200,000,000.00	0.056462	0.016763	-	-	7.9662
17	200x50x20x4.76	0.001469	200,000,000.00	0.072934	0.016500	-	-	11.5350
18	2C50x25x10x2	0.000427	200,000,000.00	0.019251	0.018186	-	-	3.3551
19	2C50x30x10x2	0.000467	200,000,000.00	0.019702	0.021578	-	-	3.6691
20	2C60x40x10x0.8	0.000248	200,000,000.00	0.024923	0.029274	-	-	1.9435
21	2C80x40x15x2	0.000707	200,000,000.00	0.031571	0.029528	-	-	5.5531
22	2C80x40x15x3	0.001022	200,000,000.00	0.030987	0.029312	-	-	8.0199
23	2C100x50x15x2	0.000867	200,000,000.00	0.039957	0.037654	-	-	6.8091
24	2C100x50x15x3	0.001262	200,000,000.00	0.039373	0.037451	-	-	9.9039
25	2C100x50x15x4	0.001630	200,000,000.00	0.038771	0.037252	-	-	12.7923
26	2C120x50x15x3	0.001382	200,000,000.00	0.046638	0.038536	-	-	10.8459
27	2C125x50x15x2	0.000967	200,000,000.00	0.049060	0.038980	-	-	7.5941
28	2C125x50x15x3	0.001412	200,000,000.00	0.048421	0.038775	-	-	11.0814
29	2C125x50x15x4	0.001830	200,000,000.00	0.047763	0.038573	-	-	14.3623
30	2C125x50x15x6	0.002587	200,000,000.00	0.046381	0.038180	-	-	20.3047
31	2C150x50x15x2	0.001067	200,000,000.00	0.057868	0.040025	-	-	8.3791
32	2C150x50x15x3	0.001562	200,000,000.00	0.057175	0.039812	-	-	12.2589
33	2C150x50x15x4	0.002030	200,000,000.00	0.056462	0.039602	-	-	15.9323
34	2C200x50x20x4.76	0.002939	200,000,000.00	0.072934	0.040260	-	-	23.0699
35	2C100x50x15x2 P88x2	0.001219	200,000,000.00	0.036359	0.041946	-	-	9.7520
36	2C100x50x15x3 P88x2	0.001614	200,000,000.00	0.036781	0.040793	-	-	12.6671

Nota: Esta tabla fue calculada usando las propiedades geométricas.

B. Determinación de las cargas

La determinación de las cargas es muy importante para el funcionamiento del algoritmo y para poder determinar las secciones de los perfiles adecuados y aptos para poder soportar las cargas de diseño, motivo por el cual se adjunta el presente anexo tomando en cuenta los detalles del mismo.

B.1. Cargas por el peso propio “P_P”

Para el siguiente caso que se considerarán las propias cargas, generadas por el peso propio.

B.2. Carga muerta “C_M”

La carga muerta que es la suma de los pesos de calamina, pernos, pintura, etc.; cuyo valor varía entre $(5 - 15) \cdot \frac{kg}{m^2}$. Para el presente caso de investigación se adoptará:

$$C_M = 15.00 \frac{kg}{m^2} \quad (B.1)$$

B.3. Carga viva de mantenimiento “C_{VM}”

La carga viva de mantenimiento se determina como el peso respecto a las personas que realizarán en algún periodo de tiempo el mantenimiento; cuyo valor está entre $(40 - 50) \cdot \frac{kg}{m^2}$. Para el presente caso de investigación se adoptará:

$$C_{VM} = 50.00 \frac{kg}{m^2} \quad (B.2)$$

B.4. Carga de nieve “C_N”

Para poder determinar la carga de nieve se usó la norma ASCE 7-16 debido a que usa parámetros que fácilmente pueden adaptar a la ciudad de Sucre.

B.4.1. Carga de nieve en el suelo “P_g”

El peso específico " γ_n " de la nieve varía entre $(400 - 500) \text{ kgf/m}^2$ cuyo valor fue extraído de fuentes bibliográficas y resultados de investigación; la altura promedio de la nieve " h_n " varía entre 15 a 20cm según datos y registro de SEMANHI. Para la determinación de la carga de nieve en el suelo, se usó la ecuación (B.3) obteniendo un valor de $P_g = 90 \text{ kgf/m}^2$

$$P_g = \gamma_n \cdot h_n \quad (\text{B.3})$$

B.4.2. Carga de nieve en techos planos “P_f”

La ecuación (7.3.1) extraída de la ASCE 7-16 nos describe como:

$$P_f = 0.70 \cdot C_e \cdot C_t \cdot I_s \cdot P_g \quad (\text{B.4})$$

Donde: " C_e " es el coeficiente de exposición; " C_t " es el coeficiente térmico; " I_s " es el factor de importancia; y " P_g " es la carga de nieve en el suelo.

Para el cálculo del valor del coeficiente " C_e " se usó la tabla 7.3.1 de la norma ASCE 7-16, describiendo en nuestro caso de estudio que se encuentra en una categoría “B”, parcialmente expuesto, llegando a determinar un valor de $C_e = 1.00$

Tabla B.1. Tabla de valores de " C_e "

Surface Roughness Category	Fully Exposed	Partially Exposed	Sheltered
B (see Section 26.7)	0.90	1.00	1.20
C (see Section 26.7)	0.90	1.00	1.10
D (see Section 26.7)	0.80	0.90	1.00
Above the tree line in windswept mountainous areas	0.70	0.90	NA
In Alaska, in areas where trees do not exist within a 2-mi (3-km) radius of the site	0.70	0.80	NA

Nota: Esta tabla fue sacada de la norma ASCE 7-16, tabla 7.3.1.

Para poder determinar el valor del coeficiente térmico " C_t ", se usó la tabla 7.3.2 de la norma ASCE 7-16, obteniendo un valor de $C_t = 1.20$

Tabla B.2. Tabla de valores de " C_t "

Thermal Condition	" C_t "
All structures except as indicated below	1.00
Structures kept just above freezing and others with cold, ventilated roofs in which the thermal resistance (R-value) between the ventilated space and the heated space exceeds $25^{\circ}\text{F} \times \text{h} \times \text{ft}^2/\text{Btu}$ ($4.4 \text{ K} \times \text{m}^2/\text{W}$)	1.10
Unheated and open air structures	1.20
Freezer building	1.30
Continuously heated greenhouses with a roof having a thermal resistance (R-value) less than $2.0^{\circ}\text{F} \times \text{h} \times \text{ft}^2/\text{Btu}$ ($0.4 \text{ K} \times \text{m}^2/\text{W}$)	0.85

Nota: Esta tabla fue sacada de la norma ASCE 7-16, tabla 7.3.2.

Para el cálculo del factor de importancia se determina como $I_s = 1.00$ Posteriormente para poder usar la ecuación (B.1), llegando a obtener un valor de $P_{f1} = 75.60 \text{ kgf}/\text{m}^2$. Cabe mencionar que la misma norma ASCE 7-16; nos describe, se debe elegir el mayor valor de P_{f1} y de P_{f2} , para lo cual obtenemos un valor de $P_f = 90.00 \text{ kgf}/\text{m}^2$

$$P_{f2} = I_s \cdot P_g \quad (\text{B.5})$$

$$P_f = \max(P_{f1}, P_{f2}) \quad (\text{B.6})$$

B.4.3. Carga de nieve en techos inclinados "Ps"

Para la determinación de la carga se usó la ecuación 7.4.1. de la norma ASCE 7-16 como:

$$P_s = C_s \cdot P_f \max \quad (\text{B.7})$$

Donde: " C_s " es el coeficiente de la pendiente que se sacará de la **Figura B.1**. Cuyo valor depende del coeficiente térmico ($C_t = 1.20$) y el ángulo que forma la cubierta $\alpha = 13.5$

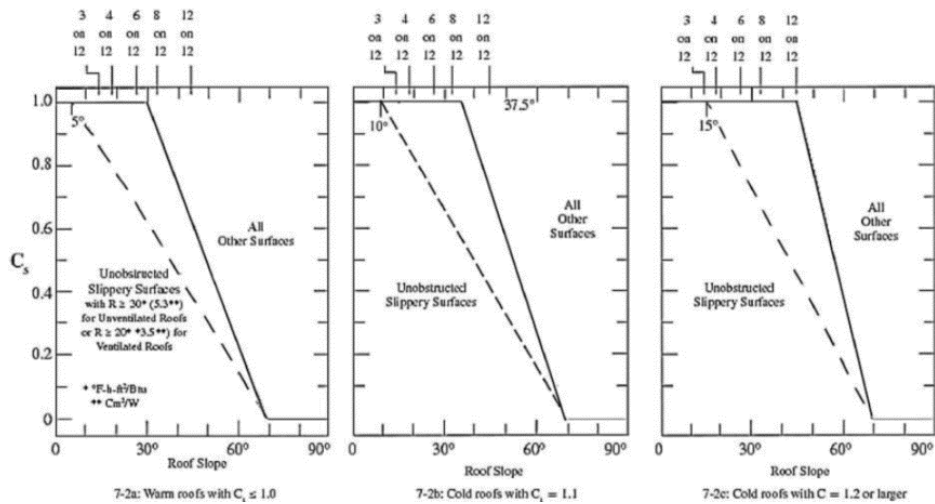


Figura B.1. Grafica para poder determinar el factor de la pendiente (ASCE 7-16)

Realizando las proyecciones en la **figura B.1**, obtuvimos un valor de ($C_s = 1.00$) y reemplazando en la ecuación (B.7) tenemos un valor de $P_s = 90.00 \text{ kgf/m}^2$.

B.5. Carga de granizo

Actualmente, se ha desarrollado la presentación de una *Norma Boliviana de Acción del Granizo sobre las Construcciones*; que está en fase de revisión, para lo cual se tienen algunos ajustes, como la pendiente de la cubierta, y la determinación de la carga de granizo ajustada.

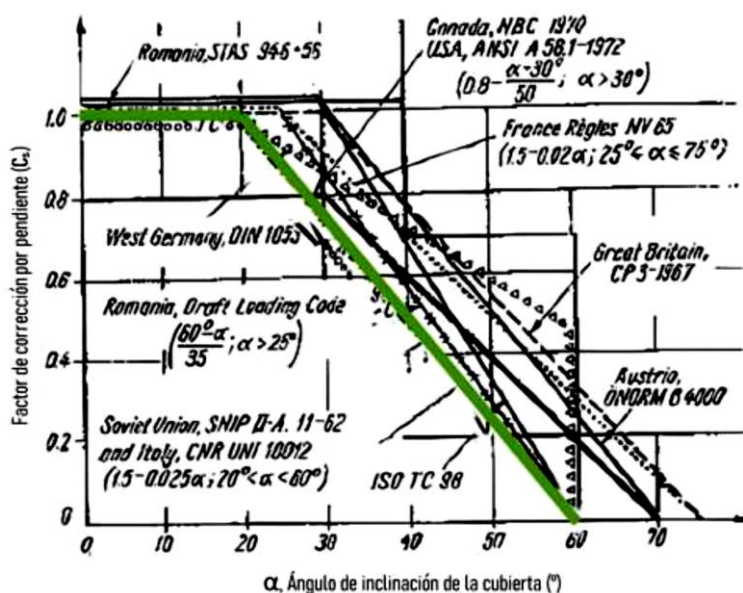


Figura B.2. Factores de corrección según reglamentos internacionales ANSI A58.1-1972 (USA), REGLES NV 65 (FRANCE), CP3 -1967 (GREAT BRITAIN), ONORM B 4000 (AUSTRIA) (Zambrana Enríquez 2025).

Cuya normativa nos indica es que, en función de un mapa sacado de registro meteorológico y de SENAMHI, se pudo determinar valores de la carga de granizo ajustado " q_a "

Tabla B.3. Tabla de la carga de granizo ajustada

Nº	Ciudad Capital	Departamento	Carga de Granizo Ajustada
1	Santísima Trinidad	Beni	35
2	Sucre	Chuquisaca	110
3	Cochabamba	Cochabamba	110
4	Nuestra Señora de La Paz	La Paz	110
5	Oruro	Oruro	110
6	Cobija	Pando	35
7	Potosí	Potosí	110
8	Santa Cruz de la Sierra	Santa Cruz	35
9	Tarija	Tarija	110

Nota: Los valores de la carga de granizo son $q_a \text{ (kg/m}^2\text{)}$ (Zambrana Enríquez 2025).

Tabla B.4. Valores de (C_s) según el ángulo de inclinación de cubierta

Ángulo de inclinación de la cubierta ($^{\circ}$)	Factor de corrección por pendiente (C_s)
$0^{\circ} \leq \alpha \leq 20^{\circ}$	1.00
$20^{\circ} < \alpha \leq 60^{\circ}$	$\frac{60 - \alpha}{40}$
$\alpha > 60^{\circ}$	0.00

Nota: La carga de granizo reducida por pendiente se calcula como: $q_g = q_a \cdot C_s$ donde $q_g (kgf/m^2)$.

Para el cálculo de la carga de granizo reducida " q_g " se usó los valores de $q_a = 110 \text{ kgf}/m^2$ y el valor de $C_s = 1.00$; obteniendo un valor de $q_g = 110 \text{ kgf}/m^2$; usando la ecuación descrita como:

$$q_g = q_a \cdot C_s \quad (\text{B.8})$$

B.6. Carga de viento

B.6.1. Cálculo de la presión dinámica " q_z "

Según la *APNB 1225003-I* se tiene que calcular la presión dinámica del viento " q_z ", según el artículo 5.8 de dicha norma

$$q_z = \frac{1}{16} \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2 \cdot I_v \quad (\text{B.9})$$

Donde: " K_z " es el coeficiente de exposición en función de la categoría, " K_{zt} " es el factor topográfico, " K_d " es el factor de direccionalidad, " V " que es la velocidad del viento, " I_v " es el factor de importancia.

En función de la tabla 5.3 de la norma *APNB 1225003-I*, se puede extraer el valor de la velocidad para la ciudad de Sucre, obteniendo un valor de ($V = 32.40 \text{ m}/\text{seg}$)

Tabla B.5. Velocidades básicas del viento en ciudades.

Ciudad	V (m/seg)
Cochabamba	44.3
La Paz	29.5
Oruro	29.4
Potosí	30.2
Santa Cruz	42.6
Sucre	32.4
Tarija	24.0
Trinidad	40.0
Cobija	26.5

Nota: Esta tabla fue sacada de la *APNB 1225003-I*, tabla 5.3

Para " K_d " el factor de direccionalidad, se usó la tabla 5.3.4 de la norma *APNB 1225003-1* obteniendo un valor de ($K_d = 1.00$)

Tabla B.6. Factor de direccionalidad " K_d ".

Tipo de estructura	Factor de direccionalidad " K_d "
Edificios	
Sistema principal resistente a la fuerza de viento	0.85
Componentes y revestimientos	0.85
Cubiertas abovedadas	0.85
Chimeneas, tanques y estructuras similares	
Cuadradas	0.90
Hexagonales	0.95
Redondas	0.95
Carteles llenos	0.85
Carteles abiertos y estructura reticulada	0.85
Torres reticuladas	
Triangular, cuadrada, rectangular	0.85
Toda otra sección transversal	0.85

Nota: El factor de direccionalidad se ha calibrado con las combinaciones de carga especificadas en la norma NB 1225002.

Para el " I_v " el factor de importancia se usó la tabla 5.4.2 de la norma *APNB 1225003-1* obteniendo un valor de $I_v = 1.00$, debido a que la estructura está en *categoría II*

Tabla B.7. Tabla del factor de importancia " I_v "

Categoría	" I_v "
I	0.87
II	1.00
III	1.15
IV	1.15

Nota: Esta tabla fue sacada de la norma APNB 1225003-1.

El factor del coeficiente de exposición " K_z ", debido a que se sabe que la estructura es de *Categoría B*, cuyos valores se extraen de la tabla 5.5.4.2; de los cuales se tienen los valores de ($\alpha_v = 7$), ($z_g = 366$) y un valor de ($z = 9.22\text{m}$); se encontró un valor de $K_z = 0.702$

$$K_z = 2.01 \cdot \left(\frac{z}{z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha_v}} \quad (\text{B.10})$$

El factor topográfico " K_{zt} ", debido a que el lugar es relativamente plano ($K_1 = 1.00$), ($K_2 = 1.00$), ($K_3 = 1.00$) usando la ecuación 5.6.2 de la norma APNB 1225003-1; se calculó el valor de $K_{zt} = 1.00$

$$K_{zt} = (1 + K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^2 \quad (\text{B.11})$$

Finalmente, para determinar el cálculo de la presión dinámica del viento " q_z " en la ecuación (B.9) se consiguió un valor de $q_z = 39.156 \text{ kgf}/\text{m}^2$

B.6.2. Cálculo de presión de diseño del viento "p"

Según el acápite 7.2 de la norma *APNB 1225003-1*, nos proporciona la ecuación (B.13) la cual se expresa como:

$$p = q \cdot G \cdot C_p - q_i \cdot (GC_{pi}) \quad (\text{B.10})$$

Donde: " p " es la presión de diseño del viento; " q " es el valor del barlovento o sotavento; " G " es el factor del efecto de ráfaga equivalente a 1.00; " C_p " es el coeficiente de presión externa; " GC_{pi} " es el coeficiente de presión interna.

Para la determinación de los coeficientes ($G = 1.00$), debido a que no se presentan ráfagas de gran magnitud en la ciudad de Sucre; y la para ($GC_{pi} = 0$) valor sacado de la tabla B.8.

Tabla B.8. Coeficientes de la presión interna GC_{pi}

Clasificación de cerramiento	GC_{pi}
Edificios abiertos	0.00
Edificios parcialmente cerrados	+0.55
	-0.55
Edificios cerrados	+0.18
	-0.18

Nota: Esta tabla fue sacada de la tabla sacada de la norma *APNB 1225003-1*, tabla 7.2.1-1

Para determinar el valor " C_p ", se usó la tabla de la norma *ASCE 7-16*, cuyo valor varía en función del ángulo de la pendiente de la cubierta, como se muestra a continuación:

Tabla B.9. Coeficientes de la presión externa " C_p "

Roof Angle (θ)	Load Case	Clear Wind Flow	Clear Wind Flow	Obstructed Wind Flow	Obstructed Wind Flow
7.50°	A	1.10	-0.30	-1.60	-1.00
	B	0.20	-1.20	-0.90	-1.70
15.00°	A	1.10	-0.40	-1.20	-1.00
	B	0.10	-1.10	-0.60	-1.60
22.50°	A	1.10	0.10	-1.20	-1.20
	B	-0.10	-0.80	-0.80	-1.70
30.00°	A	1.30	0.30	-0.70	-0.70
	B	-0.10	-0.90	-0.20	-1.10
37.50°	A	1.30	0.60	-0.60	-0.60
	B	-0.20	-0.60	-0.30	-0.90
45.00°	A	1.10	0.90	-0.50	-0.50
	B	-0.30	-0.50	-0.30	-0.70

Nota: Esta tabla fue sacada de la norma *ASCE 7-16*, para la presión externa.

Después de la realización de una interpolación de los valores entre 7.50° y 15.00° se obtuvieron los valores que se muestran en la tabla B.10.

Tabla B.10. Coeficientes de presión externa calculados para el caso de estudio, C_p

Dirección del viento	Caso "A"	Caso "B"
Barlovento	1.10	-0.38
Sotavento	0.12	-1.12

Nota: Estos valores fueron sacados de los procesos de interpolación realizados para un ángulo de 13.50° .

Finalmente, para el cálculo de las presiones de diseño " p " se usó la ecuación (B.10), llegando determinar los valores de la tabla B.11

Tabla B.11. Cargas de la presión de diseño producidas por el viento.

Casos	Carga de viento (kgf/m^2)
Caso +1	43.072
Caso +1	4.669
Caso -1	4.669
Caso -1	43.072
Caso +2	-14.879
Caso +2	-43.855
Caso -2	-43.855
Caso -2	-14.879

Nota: Esta tabla fue sacada del cálculo usando la ecuación (B.10)

El proceso de cálculo suele ser extenso al usar muchas tablas y ecuaciones, más aún si se usan interpolaciones de las tablas motivo por el cual se elaboró una plantilla en MathCad para la estimación de cargas, para poder reducir el tiempo de cálculo, la cual se encuentra en medio magnético del presente trabajo de investigación

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN (CEPI)
U.M.A.P.S.S.A.D.I.
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL V.7
PLANILLA: DETERMINACIÓN DE CARGAS DE LA CUBIERTA
NOMBRE: JESÚS LUIS ARRIAGA MORALES
AÑO: 2025

DETERMINACIÓN DE CARGAS DE LA CUBIERTA

1. DETERMINACIÓN DE CARGAS

1.1. Carga propia
 $P_p = \text{"propio del programa"}$

1.2. Carga muerta
La carga muerta es la suma de la columna, paredes, pintura, etc. cuyo valor varía de $(5-15) \text{ kgf/m}^2$
 $C_{12} = 15 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$

1.3. Carga viva de mantenimiento
La carga de mantenimiento para las personas que hacen el mantenimiento $(40-50) \text{ kgf/m}^2$
 $C_{13} = 50 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$

1.4. Carga de nieve
a) La carga de nieve en el suelo " $P_g = \mu \cdot h$ "
El " μ " de la nieve varía de $(400-450) \text{ kg/m}^3$, y " h " la altura de la nieve $(15-20) \text{ cm}$
 $\mu = 450 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$
 $h = 20 \text{ cm}$
 $P_g = \mu \cdot h = 90 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$
b) La carga de nieve en techos planos " P_F "
La fórmula sacada de la ASCE 7-16, de la ecuación (7.3.1)
 $P_F = 0.70 \cdot C_e \cdot C_d \cdot I_e \cdot P_g$
donde
 C_e Coeficiente de exposición
 C_d Coeficiente térmico
 I_e Importancia
 P_g Carga de nieve en el suelo
Para el cálculo del valor de " C_e " se saca de la tabla 7.3.1 de la ASCE 7-16

Superficie Expuesta	Exposición		
	Exposición	Exposición	Exposición
Exposición	Exposición	Exposición	Exposición
Exposición	Exposición	Exposición	Exposición

Página 1 de 7

Figura B.3. Hoja de cálculo de las cargas de cubiertas (Elaboración propia).

A continuación, se presenta la tabla de resumen de los valores de las cargas aplicados a la ciudad de Sucre, descartando la carga de nieve debido a que nunca se ha presentado ese evento climatológico, presentado en la **Tabla B.12**

Tabla B.12. Modelo de tabla.

Nudo	C. MUERTA		C. MANT.		C. GRANIZO		C VIENTO 1 (+)		C VIENTO 1 (-)		C VIENTO 2 (+)		C VIENTO 2 (-)	
	x(kN)	y(kN)	x(kN)	y(kN)	x(kN)	y(kN)	x(kN)	y(kN)	x(kN)	y(kN)	x(kN)	y(kN)	x(kN)	y(kN)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	- 0.402	0.543	- 0.044	0.590	0.139	- 0.188	0.409	- 0.553
4	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	- 0.402	0.543	- 0.044	0.590	0.139	- 0.188	0.409	- 0.553
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	- 0.402	0.543	- 0.044	0.590	0.139	- 0.188	0.409	- 0.553
7	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	- 0.402	0.543	- 0.044	0.590	0.139	- 0.188	0.409	- 0.553
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	- 0.402	0.543	- 0.044	0.590	0.139	- 0.188	0.409	- 0.553
10	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	- 0.402	0.543	- 0.044	0.590	0.139	- 0.188	0.409	- 0.553
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	- 0.402	0.543	- 0.044	0.590	0.139	- 0.188	0.409	- 0.553
13	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	- 0.358	1.133	0.358	1.133	- 0.270	- 0.741	0.270	- 0.741
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	0.044	0.590	0.402	0.543	- 0.409	- 0.553	- 0.139	- 0.188
16	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	0.044	0.590	0.402	0.543	- 0.409	- 0.553	- 0.139	- 0.188
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	0.044	0.590	0.402	0.543	- 0.409	- 0.553	- 0.139	- 0.188
19	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	0.044	0.590	0.402	0.543	- 0.409	- 0.553	- 0.139	- 0.188
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	0.044	0.590	0.402	0.543	- 0.409	- 0.553	- 0.139	- 0.188
22	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	0.044	0.590	0.402	0.543	- 0.409	- 0.553	- 0.139	- 0.188
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	- 1.610	-	- 0.785	-	- 1.726	0.044	0.590	0.402	0.543	- 0.409	- 0.553	- 0.139	- 0.188
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Esta tabla fue sacada para el cálculo de las cargas de para el desarrollo del ejemplo

C. Archivo de datos

Uno de los archivos importantes para el desarrollo de la investigación es el archivo de la introducción de datos, motivo por el cual se hará una breve introducción antes de iniciar de cada pestaña del libro de *.xls*.

C.1. Restricciones

La parte fundamental para el cálculo de la cercha de cualquier configuración o disposición es relevante para poder determinar, los nodos y las restricciones en el eje “x” y en el eje “y” para poder determinar los *apoyos fijos o móviles*; como se muestra en la **Tabla C.1**.

Tabla C.1. Restricciones de los nodos

Nudo	Restricción "x"	Restricción "y"
1	1.00	1.00
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-
6	-	-
7	-	-
8	-	-
9	-	-
10	-	-
11	-	-
12	-	-
13	-	-
14	-	-
15	-	-
16	-	-
17	-	-
18	-	-
19	-	-
20	-	-
21	-	-
22	-	-
23	-	-
24	-	-
25	-	1.00

Nota: Esta tabla fue sacado del modelo a ser analizado.

C.2. Estructura

Esta parte de la hoja de cálculo se determinan las relaciones de esbeltez máxima, las coordenadas de los nodos y la conectividad. Cabe mencionar que los datos deben ser colocados en forma adecuada para obtener buenos resultados.

Tabla C.2. Relaciones de esbeltez máxima y factor de longitud efectiva

Descripción	Valor
Relación de esbeltez máxima a tracción	300.00
Relación de esbeltez máxima a compresión	200.00
Factor de longitud efectiva (K)	1.00

Nota: Esta tabla fue sacada en función de lo descrito en la parte teoría del presente documento de investigación.

Tabla C.3. Coordenada de los nodos

Nudo	Coordenadas X Fija o Variable	Coordenadas "x"				Coordenadas Y Fija o Variable	Coordenadas "y"			
		X (Fijo) (m)	Xmin (m)	Xmax (m)	Costraint "x"		Y (Fijo) (m)	Ymin (m)	Ymax (m)	Costraint "y"
1	-	-12.50	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-10.94	-	-	-	1.00	-	-	0.175	1.000
3	-	-10.94	-	-	-	-	0.375	-	-	-
4	-	-9.38	-	-	-	-	0.750	-	-	-
5	-	-7.81	-	-	-	1.00	-	-	0.925	2.000
6	-	-7.81	-	-	-	-	1.125	-	-	-
7	-	-6.25	-	-	-	-	1.500	-	-	-
8	-	-4.69	-	-	-	1.00	-	-	1.675	3.000
9	-	-4.69	-	-	-	-	1.875	-	-	-
10	-	-3.13	-	-	-	-	2.250	-	-	-
11	-	-1.56	-	-	-	1.00	-	-	2.425	4.000
12	-	-1.56	-	-	-	-	2.625	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	3.000	-	-	-
14	-	1.56	-	-	-	1.00	-	-	2.425	4.000
15	-	1.56	-	-	-	-	2.625	-	-	-
16	-	3.13	-	-	-	-	2.250	-	-	-
17	-	4.69	-	-	-	1.00	-	-	1.675	3.000
18	-	4.69	-	-	-	-	1.875	-	-	-
19	-	6.25	-	-	-	-	1.500	-	-	-
20	-	7.81	-	-	-	1.00	-	-	0.925	2.000
21	-	7.81	-	-	-	-	1.125	-	-	-
22	-	9.38	-	-	-	-	0.750	-	-	-
23	-	10.94	-	-	-	1.00	-	-	0.175	1.000
24	-	10.94	-	-	-	-	0.375	-	-	-
25	-	12.50	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Esta tabla fue sacada de la introducción de datos, donde se hace la introducción de los nodos fijos o variables y de igual manera se hace la introducción del desplazamiento máximo permitido.

Tabla C.4. Conectividad de nudos

Elementos	Nudo "i"	Nudo "j"
1	1.00	2.00
2	1.00	3.00
3	2.00	3.00
4	2.00	5.00
5	2.00	4.00
6	3.00	4.00
7	4.00	5.00
8	4.00	6.00
9	5.00	6.00

Tabla C.1. Conectividad de nudos (continuación)

Elementos	Nudo "i"	Nudo "j"
10	5.00	8.00
11	5.00	7.00
12	6.00	7.00
13	7.00	8.00
14	7.00	9.00
15	8.00	9.00
16	8.00	11.00
17	8.00	10.00
18	9.00	10.00
19	10.00	11.00
20	10.00	12.00
21	11.00	12.00
22	11.00	14.00
23	11.00	13.00
24	12.00	13.00
25	13.00	14.00
26	13.00	15.00
27	14.00	15.00
28	14.00	17.00
29	14.00	16.00
30	15.00	16.00
31	16.00	17.00
32	16.00	18.00
33	17.00	18.00
34	17.00	20.00
35	17.00	19.00
36	18.00	19.00
37	19.00	20.00
38	19.00	21.00
39	20.00	21.00
40	20.00	23.00
41	20.00	22.00
42	21.00	22.00
43	22.00	23.00
44	22.00	24.00
45	23.00	24.00
46	23.00	25.00
47	24.00	25.00

Nota: Esta tabla es la representación de los 47 nudos y sus respectivas ubicaciones en “x” y en “y”.

C.3. Librería de perfiles

Para la siguiente tabla de datos, se usará lo descrito en el **Anexo A**, realizando la descripción que se hizo la introducción de perfiles de sección “C”, “2C” o sección cajón y los perfiles “2C+pletinas”, para tal cálculo fue necesario la utilización de una platilla de Mathcad Prime v10 para poder realizar el cálculo de manera más rápida y precisa; además cabe mencionar que la lista de los perfiles son los más comerciales que existen en Bolivia y en las fábricas o tiendas de comercialización.

Tabla C.5. Tabla de la librería de perfiles comerciales

PERFIL	NOMBRE	As (m ²)	E (kN/m ²)	r2 (m)	r3 (m)	PERFIL ESTABLE	Q	W (Kg/m)
1	50x25x10x2	0.000214	200,000,000.00	0.019251	0.009129	-	-	1.6775
2	50x30x10x2	0.000234	200,000,000.00	0.019702	0.010948	-	-	1.8345
3	60x40x10x0.8	0.000124	200,000,000.00	0.024923	0.015120	-	-	0.9718
4	80x40x15x2	0.000354	200,000,000.00	0.031571	0.015106	-	-	2.7765
5	80x40x15x3	0.000511	200,000,000.00	0.030987	0.014573	-	-	4.0100
6	100x50x15x2	0.000434	200,000,000.00	0.039957	0.018585	-	-	3.4045
7	100x50x15x3	0.000631	200,000,000.00	0.039373	0.018034	-	-	4.9520
8	100x50x15x4	0.000815	200,000,000.00	0.038771	0.017466	-	-	6.3962
9	120x50x15x3	0.000691	200,000,000.00	0.046638	0.017789	-	-	5.4230
10	125x50x15x2	0.000484	200,000,000.00	0.049060	0.018281	-	-	3.7970
11	125x50x15x3	0.000706	200,000,000.00	0.048421	0.017720	-	-	5.5407
12	125x50x15x4	0.000915	200,000,000.00	0.047763	0.017143	-	-	7.1812
13	125x50x15x6	0.001293	200,000,000.00	0.046381	0.015935	-	-	10.1523
14	150x50x15x2	0.000534	200,000,000.00	0.057868	0.017914	-	-	4.1895
15	150x50x15x3	0.000781	200,000,000.00	0.057175	0.017346	-	-	6.1295
16	150x50x15x4	0.001015	200,000,000.00	0.056462	0.016763	-	-	7.9662
17	200x50x20x4.76	0.001469	200,000,000.00	0.072934	0.016500	-	-	11.5350
18	2C50x25x10x2	0.000427	200,000,000.00	0.019251	0.018186	-	-	3.3551
19	2C50x30x10x2	0.000467	200,000,000.00	0.019702	0.021578	-	-	3.6691
20	2C60x40x10x0.8	0.000248	200,000,000.00	0.024923	0.029274	-	-	1.9435
21	2C80x40x15x2	0.000707	200,000,000.00	0.031571	0.029528	-	-	5.5531
22	2C80x40x15x3	0.001022	200,000,000.00	0.030987	0.029312	-	-	8.0199
23	2C100x50x15x2	0.000867	200,000,000.00	0.039957	0.037654	-	-	6.8091
24	2C100x50x15x3	0.001262	200,000,000.00	0.039373	0.037451	-	-	9.9039
25	2C100x50x15x4	0.001630	200,000,000.00	0.038771	0.037252	-	-	12.7923
26	2C120x50x15x3	0.001382	200,000,000.00	0.046638	0.038536	-	-	10.8459
27	2C125x50x15x2	0.000967	200,000,000.00	0.049060	0.038980	-	-	7.5941
28	2C125x50x15x3	0.001412	200,000,000.00	0.048421	0.038775	-	-	11.0814
29	2C125x50x15x4	0.001830	200,000,000.00	0.047763	0.038573	-	-	14.3623
30	2C125x50x15x6	0.002587	200,000,000.00	0.046381	0.038180	-	-	20.3047
31	2C150x50x15x2	0.001067	200,000,000.00	0.057868	0.040025	-	-	8.3791
32	2C150x50x15x3	0.001562	200,000,000.00	0.057175	0.039812	-	-	12.2589
33	2C150x50x15x4	0.002030	200,000,000.00	0.056462	0.039602	-	-	15.9323
34	2C200x50x20x4.76	0.002939	200,000,000.00	0.072934	0.040260	-	-	23.0699
35	2C100x50x15x2_P88x2	0.001219	200,000,000.00	0.036359	0.041946	-	-	9.7520
36	2C100x50x15x3_P88x2	0.001614	200,000,000.00	0.036781	0.040793	-	-	12.6671

Nota: Esta tabla fue calculada usando las propiedades geométricas.

C.4. Cargas

Para la realización de la presente tabla se usó todo lo descrito en el **Anexo B**.

Tabla C.6. Tabla de las cargas en los nodos de la cercha

[illegible]

C.5. Combinaciones de carga

Para el cálculo de las combinaciones de las cargas se usarán las combinaciones de carga de la norma AISI 96, como se muestran la figura:

Tabla C.7. Combinaciones de carga de diseño.

COMBINACION	MUERTA	VIVA	VIVA MANT.	NIEVE	GRANIZO	VIENTO DIRECCION 1 (+)	VIENTO DIRECCION 1 (-)	VIENTO DIRECCION 2 (+)	VIENTO DIRECCION 2 (-)
1	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1.40	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1.20	1.60	-	-	0.50	-	-	-	-
4	1.20	0.50	-	-	1.60	-	-	-	-
5	1.20	0.50	-	-	0.50	1.30	-	-	-
6	1.20	0.50	-	-	0.50	-	1.30	-	-
7	1.20	0.50	-	-	0.50	-	-	1.30	-
8	1.20	0.50	-	-	0.50	-	-	-	1.30
9	0.90	-	-	-	-	1.30	-	-	-
10	0.90	-	-	-	-	-	1.30	-	-
11	0.90	-	-	-	-	-	-	1.30	-
12	0.90	-	-	-	-	-	-	-	1.30

Nota: Esta fue sacada en función de los factores de mayoración para las cargas de diseño.

C.6. Combinaciones de carga de servicio

Para la realización y la verificación del desplazamiento máximo admisible $L/300$, se usará la combinación de la carga de servicio, para lo cual se usó la tabla:

Tabla C.8. Combinaciones de carga de servicio

COMBINACION	MUERTA	VIVA	VIVA MANT.	NIEVE	GRANIZO	VIENTO DIRECCION 1 (+)	VIENTO DIRECCION 1 (-)	VIENTO DIRECCION 2 (+)	VIENTO DIRECCION 2 (-)
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	1.00	-

Nota: Esta tabla fue sacada en función de las cargas que intervienen en la combinación de servicio.

C.7. Eje local 2

Para la determinación de los ejes locales en la dirección 2 se realizó la tabla donde por cada nodo se muestran *Número máximo de elementos sumados por longitud no arriostrada*, dado que no todos los nodos de la estructura se encuentran arriostrados.

Tabla C.9. Longitud no arriostrada en el “eje local 2”

Elementos	Elementos que suman la longitud no arriostrada								
1	1.00	4.00	10.00	16.00	22.00	28.00	34.00	40.00	46.00
2	2.00	6.00	8.00	12.00	-	-	-	-	-
3	3.00	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1.00	4.00	10.00	16.00	22.00	28.00	34.00	40.00	46.00
5	5.00	-	-	-	-	-	-	-	-
6	2.00	6.00	8.00	12.00	-	-	-	-	-
7	7.00	-	-	-	-	-	-	-	-
8	2.00	6.00	8.00	12.00	-	-	-	-	-
9	9.00	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1.00	4.00	10.00	16.00	22.00	28.00	34.00	40.00	46.00

Tabla C.9. Longitud no arriostrada en el “eje local 2” *(Continuación)*

Elementos		Elementos que suman la longitud no arriostrada							
11	11.00	-	-	-	-	-	-	-	-
12	2.00	6.00	8.00	12.00	-	-	-	-	-
13	13.00	-	-	-	-	-	-	-	-
14	14.00	18.00	20.00	24.00	-	-	-	-	-
15	15.00	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1.00	4.00	10.00	16.00	22.00	28.00	34.00	40.00	46.00
17	17.00	-	-	-	-	-	-	-	-
18	14.00	18.00	20.00	24.00	-	-	-	-	-
19	19.00	-	-	-	-	-	-	-	-
20	14.00	18.00	20.00	24.00	-	-	-	-	-
21	21.00	-	-	-	-	-	-	-	-
22	1.00	4.00	10.00	16.00	22.00	28.00	34.00	40.00	46.00
23	23.00	-	-	-	-	-	-	-	-
24	14.00	18.00	20.00	24.00	-	-	-	-	-
25	25.00	-	-	-	-	-	-	-	-
26	26.00	30.00	32.00	36.00	-	-	-	-	-
27	27.00	-	-	-	-	-	-	-	-
28	1.00	4.00	10.00	16.00	22.00	28.00	34.00	40.00	46.00
29	29.00	-	-	-	-	-	-	-	-
30	26.00	30.00	32.00	36.00	-	-	-	-	-
31	31.00	-	-	-	-	-	-	-	-
32	26.00	30.00	32.00	36.00	-	-	-	-	-
33	33.00	-	-	-	-	-	-	-	-
34	1.00	4.00	10.00	16.00	22.00	28.00	34.00	40.00	46.00
35	35.00	-	-	-	-	-	-	-	-
36	26.00	30.00	32.00	36.00	-	-	-	-	-
37	37.00	-	-	-	-	-	-	-	-
38	38.00	42.00	44.00	47.00	-	-	-	-	-
39	39.00	-	-	-	-	-	-	-	-
40	1.00	4.00	10.00	16.00	22.00	28.00	34.00	40.00	46.00
41	41.00	-	-	-	-	-	-	-	-
42	38.00	42.00	44.00	47.00	-	-	-	-	-
43	43.00	-	-	-	-	-	-	-	-
44	38.00	42.00	44.00	47.00	-	-	-	-	-
45	45.00	-	-	-	-	-	-	-	-
46	1.00	4.00	10.00	16.00	22.00	28.00	34.00	40.00	46.00
47	38.00	42.00	44.00	47.00	-	-	-	-	-

Nota: Esta tabla fue sacada en función de las barras arriostradas.

C.8. Eje local 3

Para determinar la longitud máxima de elementos que suman la longitud no arriostrada en el “eje 3”; fue sacada en función de la disposición de las barras de la cercha.

Tabla C.10. Longitud no arriostrada en el “eje local 3”

Elementos	Elementos que suman la longitud no arriostrada
1	1.00
2	2.00
3	3.00
4	1.00
5	5.00
6	2.00
7	7.00
8	2.00
9	9.00
10	1.00

Tabla C.10. Longitud no arriostrada en el “*eje local 3*” (continuación)

Elementos	Elementos que suman la longitud no arriostrada
11	11.00
12	2.00
13	13.00
14	14.00
15	15.00
16	1.00
17	17.00
18	14.00
19	19.00
20	14.00
21	21.00
22	1.00
23	23.00
24	14.00
25	25.00
26	26.00
27	27.00
28	1.00
29	29.00
30	26.00
31	31.00
32	26.00
33	33.00
34	1.00
35	35.00
36	26.00
37	37.00
38	38.00
39	39.00
40	1.00
41	41.00
42	38.00
43	43.00
44	38.00
45	45.00
46	1.00
47	38.00

Nota: Esta tabla fue sacada en función de la disposición de los nodos de las barras

C.9. Límites de desplazamiento

Para el análisis del desplazamiento de los nodos, se realizó la verificación de 2 nodos, siendo los principales para la verificación del desplazamiento, siendo la condición de $L/300 = L25.0m/300 = 0.0833m$, motivo por el cual el valor límite para el desplazamiento de los nodos, expresado en la **Tabla C.11**

Tabla C.11. Modelo de tabla.

Criterio	Combinación de carga de servicio	Nodo de control	Dirección de control	Nodo de referencia 1	Nodo de referencia 2	Límite de desplazamiento (m)
1	1.00	11.00	-2.000	1.000	25.000	0.0833
2	1.00	14.00	-2.000	1.000	25.000	0.0833

Nota: Esta tabla fue llenada en función del análisis realizado del modelo estructural que será analizado.

C.10. Datos del algoritmo genético

Para un correcto funcionamiento del algoritmo se usarán los siguientes datos, toda vez que estos pueden ser modificados y se pueden cambiar dependiendo del análisis que se desee realizar y el tipo de resultados que se pretende obtener, para lo cual se usó la tabla C.12

Tabla C.12. Datos del algoritmo	
Descripción	Valores
Número de individuos genéticos de la población n_{pob}	80.00
Elitismo E	1.00
Probabilidad de cruce P_c	1.00
Probabilidad de mutación P_m	0.05
Rango de mutación R_m	1.00
Porcentaje de finalización $\%f_m$	0.95
Tolerancia $Tolerancia$	0.00004
Número máximo de generaciones N_{GEN}	30.00

Nota: Esta tabla fue sacada del análisis realizado para el desarrollo del ejemplo (Elaboración propia).

D. Código del programa MATLAB

Para la realización del presente desarrollo del código se usó el software MATLAB r2022b, por tener una similitud y adaptación con las versiones modernas de MATLAB; además para un mejor funcionamiento y el procesamiento de datos se desfragmentó en 2 módulos y el archivo principal; cabe mencionar que todos los programas y el archivo de Excel de datos deben estar en una misma carpeta para el correcto funcionamiento.

D.1. Módulo de “ANÁLISIS_ESTRUCTURAL.m”

A continuación, se describe el código hecho en MATLAB utilizado para el análisis estructural de la cercha 2D; debido a que el programa es muy extenso y con múltiples funcionalidades, se ha dividido en módulos para facilitar su comprensión y evitar la acumulación de líneas de código. El módulo cumple las siguientes funciones:

- Realiza el análisis estructural mediante el método de la rigidez para estructuras 2D.
- Evalúa los desplazamientos, reacciones y esfuerzos internos como parte del proceso de optimización dentro del algoritmo genético.
- Recibe como datos de entrada el número de elementos, la librería de perfiles, la conectividad, restricciones, etc.
- Calcula como datos de salida las áreas efectivas, el módulo de elasticidad por barra, vector de desplazamientos nodales, fuerzas internas axiales.
- Realiza el cálculo en forma iterativa dentro del algoritmo para ver la factibilidad de cada solución.

```
%% ANALISIS_ESTRUCTURAL.m
function [Areas, E, D, P_r, p_i] = ANALISIS_ESTRUCTURAL(nde, lib, per, le, Te,
... ngdl, g, a, b, P)
% ANALISIS_ESTRUCTURAL Calcula desplazamientos, reacciones y esfuerzos
```

```

% internos de una armadura plana 2D mediante el método de la rigidez.
%
% Entradas:
%   nde   : número de elementos
%   lib   : matriz de propiedades de perfiles (Índice, Área, E, r2, r3, ...)
%   per   : vector de índices de perfil asignado a cada elemento
%   le    : vector de longitudes de elementos (m)
%   Te    : matriz de transformación local-global 4x4xnde
%   ngdl  : grados de libertad totales (2·n_nodos)
%   g     : conectividad de grados de libertad de cada barra [ndex4]
%   a     : índices de gdl restringidos (apoyos)
%   b     : índices de gdl libres
%   P     : vector de cargas nodales global (ngdl×1)
%
% Salidas:
%   Areas : área transversal por elemento (m²)
%   E     : módulo de elasticidad por elemento (Pa)
%   D     : vector de desplazamientos nodales global (ngdl×1)
%   P_r   : vector de reacciones en apoyos (ngdl×1)
%   p_i   : fuerza axial interna en cada barra (kN) signo (+) tracción
%% PROPIEDADES POR ELEMENTO
Areas = lib(per,3); % área en m²
E     = lib(per,4); % módulo de elasticidad en Pa
%% RIGIDEZ LOCAL DE CADA BARRA (4×4)
k_local = zeros(4,4,nde);
for e = 1:nde
    A = Areas(e);
    Ec = E(e);
    L = le(e);
    k_local(:,:,e) = Ec*A/L * [ 1  0 -1  0;
                                0  0  0  0;
                                -1 0  1  0;
                                0  0  0  0];
end
%% TRANSFORMACIÓN A COORDENADAS GLOBALES
K_elem = zeros(4,4,nde);
for e = 1:nde
    T = Te(:,:,e);
    K_elem(:,:,e) = T' * k_local(:,:,e) * T;
end
%% ENSAMBLAJE DE MATRIZ GLOBAL (SPARSE PARA RENDIMIENTO)
K = sparse(ngdl,ngdl);
for e = 1:nde
    idx = g(e,:);
    K(idx,idx) = K(idx,idx) + K_elem(:,:,e);
end
%% PARTICIÓN Y SOLUCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS
K_bb = K(b,b);
P_b = P(b);
D = zeros(ngdl,1);
D(b) = K_bb \ P_b; % desplazamientos
%% REACCIONES
P_r = K * D - P; % R = K·D - P
P_r(b) = 0; % solo en apoyos
%% FUERZAS INTERNAS

```

```

pe = zeros(nde,1);
for e = 1:nde
    d_e_global = D(g(e,:));
    d_e_local = Te(:, :, e) * d_e_global; % pasa a coord. locales
    pe(e)      = k_local(3, :, e) * d_e_local; % componente axial
end
p_i = pe; % vector columna
end

```

D.2. Módulo de “DISEÑO_ESTRUCTURAL.m”

En el presente módulo, implementado en MATLAB, forma parte del núcleo del proceso de predimensionamiento, la verificación y al ajuste iterativo de los perfiles estructurales para una estructura metálica en 2D; con el fin de poder mejorar la funcionalidad, se ha realizado bloques definidos con comentarios, como las variables de entrada y salida. Dentro de cada sección del código se desarrolla:

- Se indique claramente la función del bloque, como el cálculo de longitudes, la evaluación de esfuerzos y la revisión de los desplazamientos.
- Realiza la función principal de predimensionar los perfiles según criterios iniciales de esbeltez; verifica esfuerzos internos (tracción y compresión) bajo combinaciones de carga mayoradas; reasigna perfiles iterativamente si no cumplen con los criterios de resistencia o esbeltez; calcula el peso total de la estructura resultante; evalúa los desplazamientos nodales bajo cargas de servicio para verificar criterios de servicio.
- Se vincula la ejecución con los objetivos del algoritmo genético, ya que esta función se utiliza dentro de cada ciclo de evaluación de soluciones para comprobar su factibilidad estructural.

```

%% DISEÑO_ESTRUCTURAL MARVALL
function [D, PESO_TOTAL, P_int_TC, per, peso_elem, res_desp] =
DISEÑO_ESTRUCTURAL(nde, XY, IJ, archivo, lib, ncomb, ngdl, g, a, b, ndp, Fy,
...
    P_MAYORADA, nce2, nce3, TAB_LNA_EJE2, TAB_LNA_EJE3, esbelt_ini,
esbelc, fk, num_criterios_desp, P_SERV_COMB, Tabla_criterios_desp)
% DISEÑO_ESTRUCTURAL Predimensiona y verifica perfiles de una armadura.
%
% 1) Predimensiona por esbeltez inicial.
% 2) Itera verificando: esbeltez -> tracción -> compresión.
% 3) Sale cuando todos los elementos cumplen o se acaban los perfiles.
% 4) Incluye chequeos de índice y mensajes de error descriptivos.
% 5) Todo en **un solo archivo** (subfunciones incluidas al final).

%% LONGITUDES DE ELEMENTOS Y NO-ARRIOSTRADAS

```

```

le = sqrt(sum((XY(IJ(:,2),:) - XY(IJ(:,1),:)).^2, 2));

lna = zeros(nde,2);
for e = 1:nde
    % --- Eje 2 ---
    idx2 = TAB_LNA_EJE2(e,2:nce2+1);
    idx2 = idx2(idx2>0 & idx2<=nde & ~isnan(idx2));
    lna(e,1) = sum(le(idx2));
    % --- Eje 3 ---
    idx3 = TAB_LNA_EJE3(e,2:nce3+1);
    idx3 = idx3(idx3>0 & idx3<=nde & ~isnan(idx3));
    lna(e,2) = sum(le(idx3));
end
%% PREDIMENSIONAMIENTO INICIAL POR ESBELTEZ
per = ones(nde,1);
for e = 1:nde
    per(e) = seleccionar_perfil_esbeltez(lib, ndp, lna(e,:), esbelt_ini);
end
%% MATRICES DE TRANSFORMACIÓN (una sola vez)
Te = calcular_transformaciones(XY,IJ,le);
%% CICLO DE DISEÑO
STATUS = zeros(nde,1);
ITER = 0;
while any(~STATUS)
    ITER = ITER + 1;

    % Esfuerzos mayorados
    P_int_TC = esfuerzos_combinados(nde, ncomb, lib, per, le, Te, ngdl, g, a,
b, P_MAYORADA);

    % Verificar elemento por elemento
    for e = 1:nde
        [nuevo_perfil, ok] = verificar_elemento(e, per(e), lib, ndp, lna(e,:),
...
                                esbelt_ini, esbelc, fk, Fy, P_int_TC(e,:));
        per(e) = nuevo_perfil;
        STATUS(e)= ok;
    end

    if ITER>50
        warning('Se alcanzaron 50 iteraciones sin convergencia.');
```

break

```

    end
end
%% PESO TOTAL
[peso_elem, PESO_TOTAL] = calcular_peso(le, lib, per);
%% DESPLAZAMIENTOS DE SERVICIO
[D, res_desp] = verificar_desplazamientos(num_criterios_desp,
Tabla_criterios_desp, ...
                                nde, lib, per, le, Te, ngdl, g, a, b, P_SERV_COMB, ...
                                PESO_TOTAL, peso_elem, ndp);

fprintf(' → Diseño convergió en %d iteraciones.\n', ITER);
end
%% SUBFUNCIONES
```



```

function perfil = seleccionar_perfil_esbeltez(lib, ndp, lna_elem, esbelt_ini)
    rdg2 = lna_elem(1) / esbelt_ini;
    rdg3 = lna_elem(2) / esbelt_ini;

    idx2 = find(lib(:,5) >= rdg2, 1, 'first');
    idx3 = find(lib(:,6) >= rdg3, 1, 'first');

    if isempty(idx2) || isempty(idx3)
        perfil = ndp; % Asigna el último perfil de la librería
    else
        perfil = max(idx2, idx3);
    end
end

% -----
function Te = calcular_transformaciones(XY,IJ,le)
    nde = size(IJ,1);
    Te = zeros(4,4,nde);
    for e = 1:nde
        dx = XY(IJ(e,2),1) - XY(IJ(e,1),1);
        dy = XY(IJ(e,2),2) - XY(IJ(e,1),2);
        L = le(e);
        c = dx/L; s = dy/L;
        Te(:,:,e) = [ c s 0 0;
                     -s c 0 0;
                     0 0 c s;
                     0 0 -s c];
    end
end

% -----
function P_int_TC =
esfuerzos_combinados(nde,ncomb,lib,per,le,Te,ngdl,g,a,b,P_MAYORADA)
    P_int_comb = zeros(nde,ncomb);
    for i = 1:ncomb
        P = P_MAYORADA(:,i);
        [~,~,~,p_i] = ANALISIS_ESTRUCTURAL(nde,lib,per,le,Te,ngdl,g,a,b,P);
        P_int_comb(:,i) = p_i;
    end
    T = max(P_int_comb,[],2); % tracción mayorada (+)
    C = min(P_int_comb,[],2); % compresión mayorada (-)
    P_int_TC = [max(T,0) min(C,0)];
end

% -----
function [nuevo_perfil, ok] = verificar_elemento(idx_elem, perfil_actual, lib,
ndp, lna_elem, ...
                                esbelt_ini, esbelc, fk, Fy, P_int_elem)
    Areas = lib(:,3); E_mod = lib(:,4); r2 = lib(:,5); r3 = lib(:,6);

    c = perfil_actual; actualizado = false;

    %% ESBELTEZ SECUNDARIA (DURANTE LAS ITERACIONES)
    if P_int_elem(2) < 0 % sólo si hay compresión apreciable
        rdg2 = fk*lna_elem(1)/esbelc;
        rdg3 = fk*lna_elem(2)/esbelc;
        while (rdg2 > r2(c) || rdg3 > r3(c)) && c < ndp
            c = c+1; actualizado = true; end
    end
end

```

```

end
%% RESISTENCIA A TRACCIÓN
Rdt = 0.90*Fy*Areas(c);
if Rdt < P_int_elem(1) && c < ndp
    c = c+1; actualizado = true; end
%% RESISTENCIA A COMPRESIÓN
Lam2 = fk*lna_elem(1)/(r2(c)*pi) * sqrt(Fy/E_mod(c));
Lam3 = fk*lna_elem(2)/(r3(c)*pi) * sqrt(Fy/E_mod(c));
Lam = max(Lam2,Lam3);
if Lam<=1.5
    Fcr = (0.658^(Lam^2))*Fy;
else
    Fcr = (0.877/Lam^2)*Fy;
end
Rdc = 0.85*Fcr*Areas(c);
if Rdc < abs(P_int_elem(2)) && c < ndp
    c = c+1; actualizado = true; end

if c>ndp
    error('Elemento %d: no hay perfiles suficientes en la
librería.',idx_elem);
end
nuevo_perfil = c; ok = ~actualizado;
end
% -----
function [peso_elem, PESO] = calcular_peso(le, lib, per)
    dens = lib(per,9); % kg/m (columna 9 de la librería)
    peso_elem = le .* dens;
    PESO = sum(peso_elem);
end
% -----
function [D,res_desp] =
verificar_desplazamientos(ncrit,tabla,nde,lib,per,le,Te,ngdl,g,a,b,P_SERV,PESO
_ACT,peso_elem,ndp)
    res_desp = zeros(ncrit,2);
    D = zeros(ngdl,1);
    for i = 1:ncrit
        P = P_SERV(:, tabla(i,2));
        [~,~,D_tmp,~,~] =
ANALISIS_ESTRUCTURAL(nde,lib,per,le,Te,ngdl,g,a,b,P);
        signo = tabla(i,4); abs_s = abs(signo);
        d0 = D_tmp((tabla(i,3)-1)*2 + abs_s);
        d1 = D_tmp((tabla(i,5)-1)*2 + abs_s);
        d2 = D_tmp((tabla(i,6)-1)*2 + abs_s);
        desplaz = (d0 - (d1+d2)/2)*signo/abs_s;
        res_desp(i,:) = [i, desplaz];
        if desplaz > tabla(i,7)
            warning('Criterio desplazamiento %d excedido (%.3f > %.3f).', ...
                i, desplaz, tabla(i,7));
        end
        D = D_tmp; % devuelve el último estado de servicio analizado
    end
end
end

```

D.3. Código principal “ALGEN.m”

El código principal es el código completo del algoritmo de optimización estructural, orientado al diseño eficiente de las estructuras metálicas en 2D; sin usar de las cajas de herramientas automáticas. Este desarrollo usa los fundamentos teóricos sacados de la bibliografía, a pesar de que existen herramientas como *Optimization Toolbox – MATLAB*, que permiten acelerar el proceso de cálculo porque está compuesto por funciones ya empaquetadas; no obstante, se optó por la codificación tradicional, para poder mejorar la comprensión de cada etapa. El script principal está estructurado en bloques lógicos diferenciados, donde se resalta:

- El ingreso y procesamiento de datos de entrada desde archivos Excel estructurados.
- El inicio de la población genética, con variables geométricas de los nodos.
- La evaluación estructural de individuos, a través del llamado a la función `DISEÑO_ESTRUCTURAL`, que simula y verifica la viabilidad estructural de cada configuración propuesta.
- Los bucles de evolución genética, con operadores de selección, cruce y mutación para iterar generaciones.
- La visualización de resultados, mediante gráficas de convergencia, configuraciones estructurales iniciales y optimizadas, y la impresión tabular de los datos finales de diseño.

```

%% OPTIMIZACION ARMADURA MARVALL
clear all;
clc;
clearvars;
close all;
%% -----*****DATOS INICIALES*****-----
clc;
disp('*****')
disp('*          MAESTRÍA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL V7 (CEPI-USFX)          *')
disp('*          OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE ARMADURAS                      *')
disp('*          PROGRAMA MARVALL                                           *')
disp('*  AUTOR: ING. LUIS ARIEL MARCA MATIAS                               *')
disp('*  FECHA: 29/04/2024 – 27/05/2025                                     *')
disp('*****')
%% INGRESO DE DATOS
disp('_____')
disp('_____INGRESO DE DATOS INICIALES_____')
disp('_____')
format short g

```

```
archivo = input('Digite el nombre del archivo de datos de entrada: ', 's');
disp('Procesando datos...')
%% CONECTIVIDAD
hojande = 'ESTRUCTURA';
rnde = 'S10:S10';
nde = xlsread(archivo, hojande, rnde);

hojacon = 'ESTRUCTURA';
rcon1 = 'R13:S';
rcon2 = 12 + nde;
rcon = ['R13:S' num2str(rcon2)];
IJ = xlsread(archivo, hojacon, rcon);
%% LIBRERIA DE PERFILES
hojandp = 'LIBRERIA DE PERFILES';
rndp = 'C3:C3';
ndp = xlsread(archivo, hojandp, rndp);

hojalib = 'LIBRERIA DE PERFILES';
rlib1 = 'A6:I';
rlib2 = 5 + ndp;
rlib = ['A6:I' num2str(rlib2)];
lib = xlsread(archivo, hojalib, rlib);
%% ESFUERZO DE FLUENCIA
hojaFy = 'LIBRERIA DE PERFILES';
rFy = 'F3:F3';
Fy = xlsread(archivo, hojaFy, rFy);
%% NUMERO DE NODOS
hojandn = 'ESTRUCTURA';
rndn = 'C9:C9';
ndn = xlsread(archivo, hojandn, rndn);
%% NUMERO DE GRADOS DE LIBERTAD
ngdl=ndn*2;
%grados de libertad de elementos
g = zeros(nde,4);
    for e = 1:nde
        g(e,:) = [IJ(e,1)*2-1, IJ(e,1)*2, IJ(e,2)*2-1, IJ(e,2)*2];
    end
%% GRADOS DE LIBERTAD RESTRINGIDOS (a) Y LIBRES (b)
a = zeros(1, 2);
b = zeros(1, 2);
ca = 0;
cb = 0;
hojares = 'RESTRICCIONES'; % CAMBIO: hoja correcta
for e = 1:ndn
    fila = 3 + e; % CAMBIO: comienza en fila 4 (porque la 1,2,3 son títulos y
encabezados)
    filacar = num2str(fila);

    % Restricción en X (Columna B)
    rrx = ['B' filacar];
    vrax = xlsread(archivo, hojares, rrx);
    if isempty(vrax)
        vrax = 0; % Si está vacío, se considera libre
    end
end
```

```

        if vrx == 1
            ca = ca + 1;
            a(1,ca) = 2*e-1;
        elseif vrx == 0
            cb = cb + 1;
            b(1,cb) = 2*e-1;
        else
            disp(['Error en restricción X del nudo ' num2str(e)]);
        end

% Restricción en Y (Columna C)
rry = ['C' filacar];
vry = xlsread(archivo, hojares, rry);
if isempty(vry)
    vry = 0; % Si está vacío, se considera libre
end

if vry == 1
    ca = ca + 1;
    a(1,ca) = 2*e;
elseif vry == 0
    cb = cb + 1;
    b(1,cb) = 2*e;
else
    disp(['Error en restricción Y del nudo ' num2str(e)]);
end
end

%% CASOS DE CARGA
hojancdc='CARGAS';
rncdc='C3:C3';
eval(['ncdc = xlsread(' 'char(archivo)' ',' 'char(hojancdc)' ',' 'char(rncdc)'
');']);
P_CDC=zeros(ngdl,ncdc);
for d=1:ncdc
    colx=65+d*2-1;
    coly=65+d*2;

    for e=1:ndn
        fila=6+e;
        filacar=num2str(fila);
        hojavpx='CARGAS';

        if colx>90
            col2x=colx-26;
            columna1x='A';
            columna2x=': ';
            columna3x=char(col2x);

rpx=strcat(columna1x,columna3x,filacar,columna2x,columna1x,columna3x,filacar);
        else
            columna1x=char(colx);
            columna2x=': ';
            rpx=strcat(columna1x,filacar,columna2x,columna1x,filacar);
        end
    end
end

```

```
        end

        eval(['vpx = xlsread(' 'char(archivo)' ',' 'char(hojavpx)' ',' 'char(rpx)'
        ');']);
        ubx=e*2-1;
        P_CDC(ubx,d)=vpx;
        hojavpy='CARGAS';

        if coly>90
            col2y=coly-26;
            columna1y='A';
            columna2y=': ';
            columna3y=char(col2y);

rpy=strcat(columna1y,columna3y,filacar,columna2y,columna1y,columna3y,filacar);
        else

            columna1y=char(coly);
            columna2y=': ';
            rpy=strcat(columna1y,filacar,columna2y,columna1y,filacar);
        end

        eval(['vpy = xlsread(' 'char(archivo)' ',' 'char(hojavpy)' ',' 'char(rpy)'
        ');']);
        uby=e*2;
        P_CDC(uby,d)=vpy;
    end
end
%% COMBINACIONES DE CARGA
hojacomb = 'COMBINACIONES DE CARGA';
rncomb = 'D3:D3';
ncomb = xlsread(archivo, hojacomb, rncomb);
% Columna final basada en número de cargas
columna_final = char(65 + ncdc);
% Fila final basada en número de combinaciones
fila_final = 5 + ncomb;
rcombinaciones = ['B6:' columna_final num2str(fila_final)];
P_COMB = xlsread(archivo, hojacomb, rcombinaciones);
%% CARGAS MAYORADAS
P_MAYORADA = P_CDC*P_COMB';
%% COMBINACIONES DE CARGA DE SERVICIO
hojacombserv='COMBINACIONES CARGA SERVICIO';
rncombserv='D3:D3';
eval(['ncombserv = xlsread(' 'char(archivo)' ',' 'char(hojacombserv)' ','
'char(rncombserv)' ');']);
part1='B6:';
col4=65+ncdc;
columna4=char(col4);
fila4=5+ncomb;
filacar4=num2str(fila4);
rcombinaciones=strcat(part1,columna4,filacar4);
eval(['P_COMBSERV = xlsread(' 'char(archivo)' ',' 'char(hojacombserv)' ','
'rcombinaciones' ');']);
%% CARGAS DE SERVICIO COMBINADAS
P_SERV_COMB = P_CDC*P_COMBSERV';
```

```

%% TABLA_COORDENADAS FIJAS Y VARIABLES DE NUDOS
hojatabcoor = 'ESTRUCTURA';
fila_inicio = 13;
fila_final = 12 + ndn;
rango_tabla_coor = ['A' num2str(fila_inicio) ':K' num2str(fila_final)];
Tabla_coordenadas = xlsread(archivo, hojatabcoor, rango_tabla_coor);

% Inicialización
XY_inicial = zeros(ndn,2);
Limites_coor_variables = zeros(1,6);
n_genes = 0;

% Procesar coordenadas fijas y variables
for e = 1:ndn
    % Coordenada X
    if Tabla_coordenadas(e,2) == 0
        XY_inicial(e,1) = Tabla_coordenadas(e,3);
    elseif Tabla_coordenadas(e,2) == 1
        n_genes = n_genes + 1;
        Limites_coor_variables(n_genes,1) = Tabla_coordenadas(e,4);
        Limites_coor_variables(n_genes,2) = Tabla_coordenadas(e,5);
        Limites_coor_variables(n_genes,3) = e;
        Limites_coor_variables(n_genes,4) = 1; % Eje X
        Limites_coor_variables(n_genes,5) = Tabla_coordenadas(e,6);
        Limites_coor_variables(n_genes,6) = abs(Tabla_coordenadas(e,6));
    else
        error('Error: Colocar 0 o 1 en el control de coordenadas X (columna
2).');
    end
    % Coordenada Y
    if Tabla_coordenadas(e,7) == 0
        XY_inicial(e,2) = Tabla_coordenadas(e,8);
    elseif Tabla_coordenadas(e,7) == 1
        n_genes = n_genes + 1;
        Limites_coor_variables(n_genes,1) = Tabla_coordenadas(e,9);
        Limites_coor_variables(n_genes,2) = Tabla_coordenadas(e,10);
        Limites_coor_variables(n_genes,3) = e;
        Limites_coor_variables(n_genes,4) = 2; % Eje Y
        Limites_coor_variables(n_genes,5) = Tabla_coordenadas(e,11);
        Limites_coor_variables(n_genes,6) = abs(Tabla_coordenadas(e,11));
    else
        error('Error: Colocar 0 o 1 en el control de coordenadas Y (columna
7).');
    end
end
%% TABLA LONGITUD NO ARRIOSTRADA EJE 2
hojance2 = 'LNA EJE LOCAL 2';
rnce2 = 'B4:B4';
nce2 = xlsread(archivo, hojance2, rnce2);

columnaelna2 = char(65 + nce2); % 'A' es 65 en ASCII
filaelna2 = 6 + nde;
rTAB2 = ['A7:' columnaelna2 num2str(filaelna2)];
TAB_LNA_EJE2 = xlsread(archivo, hojance2, rTAB2);
%% TABLA LONGITUD NO ARRIOSTRADA EJE 3

```

```
hojance3 = 'LNA EJE LOCAL 3';
rnce3 = 'B4:B4';
nce3 = xlsread(archivo, hojance3, rnce3);

columnaelna3 = char(65 + nce3);
filaelna3 = 6 + nde;
rTAB3 = ['A7:' columnaelna3 num2str(filaelna3)];
TAB_LNA_EJE3 = xlsread(archivo, hojance3, rTAB3);
%% LÍMITE DE ESBELTEZ EN TRACCIÓN
hojaesbelt = 'ESTRUCTURA';
resbelt = 'M3:M3';
esbelt = xlsread(archivo, hojaesbelt, resbelt);
%% LÍMITE DE ESBELTEZ EN COMPRESIÓN
hojaesbelc = 'ESTRUCTURA';
resbelc = 'M4:M4';
esbelc = xlsread(archivo, hojaesbelc, resbelc);
%% FACTOR k
hojafk = 'ESTRUCTURA';
rfk = 'M5:M5';
fk = xlsread(archivo, hojafk, rfk);
%% DATOS_LÍMITES DE DESPLAZAMIENTO
hoja_desplazamientos = 'LIMITES DE DESPLAZAMIENTO';
% Número de criterios de desplazamiento
r_num_criterios_desp = 'E3:E3';
num_criterios_desp = xlsread(archivo, hoja_desplazamientos,
r_num_criterios_desp);
% Tabla de criterios de desplazamiento
fila_inicio = 6;
fila_fin = 5 + num_criterios_desp;
rango_tabla = ['A' num2str(fila_inicio) ':G' num2str(fila_fin)];
Tabla_criterios_desp = xlsread(archivo, hoja_desplazamientos, rango_tabla);
% Máxima dimensión
maximas_coordenadas = max(XY_inicial);
minimas_coordenadas = min(XY_inicial);
maximas_dimesiones = maximas_coordenadas - minimas_coordenadas;
maxima_dimension = max(maximas_dimesiones);
%% DATOS DEL ALGORITMO
% Número de individuos genéticos de la población
hojanigp = 'DATOS ALGORITMO GENETICO';
rnigp = 'E2:E2';
nigp = xlsread(archivo, hojanigp, rnigp);
%Elitismo
rel = 'E3:E3';
Elitismo = xlsread(archivo, hojanigp, rel);
%Probabilidad de cruce
rPc = 'E4:E4';
Pc = xlsread(archivo, hojanigp, rPc);
%Probabilidad de mutación
rPm = 'E5:E5';
Pm = xlsread(archivo, hojanigp, rPm);
%Porcentaje de mutación
rPor_mut = 'E6:E6';
Por_mut = xlsread(archivo, hojanigp, rPor_mut);
%Porcentaje_finalización
rpf = 'E7:E7';
```



```

Porcentaje_finalizacion = xlsread(archivo, hojanigp, rpf);
%Tolerancia
rtolerancia = 'E8:E8';
tolerancia = xlsread(archivo, hojanigp, rtolerancia);
%Número máximo de generaciones
rnmg = 'E9:E9';
NUMERO_MAXIMO_GENERACIONES = xlsread(archivo, hojanigp, rnmg);
%% CREACIÓN DE LA POBLACIÓN VACIA TEMPORAL
num_genes=max(Limites_coor_variables(:,6));
POBLACION_TEMPORAL=zeros(nigp,num_genes);
%% CREACIÓN DE POBLACIÓN INICIAL
POBLACION_ACTUAL = zeros(nigp, num_genes);
for d = 1:nigp
    for e = 1:num_genes
        cont = 1;
        while e ~= Limites_coor_variables(cont,6)
            cont = cont + 1;
        end
        POBLACION_ACTUAL(d,e) = Limites_coor_variables(cont,1) +
rand()*(Limites_coor_variables(cont,2) - Limites_coor_variables(cont,1));
    end
end
%% VARIABLES INICIALES PARA EL ALGORITMO GENÉTICO
generacion = 1;
TAB_PROGRESO = zeros(NUMERO_MAXIMO_GENERACIONES,2);
maxima_diferencia = Inf;
% Crear Grafica de Convergencia
figure(1);
hold on;
xlabel('Generación');
ylabel('Peso mínimo (Kg)');
title('Grafica de Convergencia de la Optimización');
grid on;
peso_minimo_historial = [];
%% BUCLE PRINCIPAL DEL ALGORITMO GENÉTICO
while generacion <= NUMERO_MAXIMO_GENERACIONES && maxima_diferencia >
tolerancia
    % Evaluación de la población
    APTITUD_INDIVIDUOS = zeros(nigp,1);
    for d = 1:nigp
        XY=XY_inicial;
        for e=1:n_genes
            if Limites_coor_variables(e,5)>0

XY(Limites_coor_variables(e,3),Limites_coor_variables(e,4))=POBLACION_ACTUAL(d
,Limites_coor_variables(e,6));
                else

XY(Limites_coor_variables(e,3),Limites_coor_variables(e,4))=-
POBLACION_ACTUAL(d,Limites_coor_variables(e,6))
                end
            end
        % Calculo del peso
        [~, PESO_TOTAL] = DISENO_ESTRUCTURAL(nde, XY, IJ, archivo, lib, ncomb,
ngdl, g, a, b, ...

```

```

                                ndp, Fy, P_MAYORADA, nce2, nce3, TAB_LNA_EJE2,
TAB_LNA_EJE3, ...
                                esbelt, esbelc, fk, num_criterios_desp, P_SERV_COMB,
Tabla_criterios_desp);
    APTITUD_INDIVIDUOS(d) = PESO_TOTAL;
end
% Ordenamiento por aptitud
[APTITUD_ORDENADA, idx] = sort(APTITUD_INDIVIDUOS);
POBLACION_ORDENADA = POBLACION_ACTUAL(idx,:);

% Actualización de la grafica de convergencia
peso_minimo_historial(end+1) = APTITUD_ORDENADA(1);
figure(1);
plot(1:generacion, peso_minimo_historial, '-b*', 'LineWidth', 0.5);
drawnow;
% Mostrar generación y progreso
disp(['_____ GENERACIÓN ', num2str(generacion), ' _____']);
disp(['Peso mínimo actual (Kg): ', num2str(APTITUD_ORDENADA(1))]);
% Verificación de convergencia
diferencia = abs(POBLACION_ORDENADA(1,:) - POBLACION_ORDENADA(2,:));
maxima_diferencia = max(diferencia)/maxima_dimension;
disp(['Máxima diferencia entre mejores individuos: ',
num2str(maxima_diferencia)]);

% Registro progreso
TAB_PROGRESO(generacion,:) = [generacion, APTITUD_ORDENADA(1)];
% Nueva generación
nueva_poblacion = zeros(nigp, num_genes);
% Elitismo
nueva_poblacion(1:Elitismo,:) = POBLACION_ORDENADA(1:Elitismo,:);
% Reproducción
for i = (Elitismo+1):nigp
    r = seleccionar_ruleta(APTITUD_ORDENADA);
    s = seleccionar_ruleta(APTITUD_ORDENADA);
    while s == r
        s = seleccionar_ruleta(APTITUD_ORDENADA);
    end
    % Cruce promedio
    hijo = (POBLACION_ORDENADA(r,:) + POBLACION_ORDENADA(s,:)) / 2;
    % Mutación
    if rand < Pm
        gen_mutado = randi(num_genes);
        hijo(gen_mutado) = hijo(gen_mutado) + (rand-0.5)*2*Por_mut;
        % Corrección a límites
        hijo(gen_mutado) = max(Limites_coor_variables(gen_mutado,1),
min(Limites_coor_variables(gen_mutado,2), hijo(gen_mutado)));
    end
    nueva_poblacion(i,:) = hijo;
end
% Actualizar población
POBLACION_ACTUAL = nueva_poblacion;
generacion = generacion + 1;
end
%% RESULTADOS FINALES
disp('.....');

```

```

disp('¡OPTIMIZACIÓN FINALIZADA!');
mejor_individuo = POBLACION_ORDENADA(1,:);
XY = XY_inicial;
for e = 1:n_genes
    if Limites_coor_variables(e,5) > 0
        XY(Limites_coor_variables(e,3), Limites_coor_variables(e,4)) =
mejor_individuo(Limites_coor_variables(e,6));
    else
        XY(Limites_coor_variables(e,3), Limites_coor_variables(e,4)) = -
mejor_individuo(Limites_coor_variables(e,6));
    end
end
% Cálculo final
[D,PESO_TOTAL,P_int_TC,per,peso,res_desp] = DISEÑO_ESTRUCTURAL(nde, XY, IJ,
archivo, lib, ncomb, ngdl, g, a, b, ...
                        ndp, Fy, P_MAYORADA, nce2, nce3, TAB_LNA_EJE2,
TAB_LNA_EJE3, ...
                        esbelt, esbelc, fk, num_criterios_desp, P_SERV_COMB,
Tabla_criterios_desp);
% Mostrar resultados
disp('_____')
disp('*');
disp('_____ TABLA DE RESULTADOS DE DISEÑO _____');
disp('*');
resultados_diseno = table((1:nde)', P_int_TC(:,1), P_int_TC(:,2), per, peso,
...
    'VariableNames', {'Elemento', 'TRAC MAX (kN)', 'COMP MAX (kN)', 'PERFIL',
    'PESO(Kg)'});
disp(resultados_diseno);

disp(['Peso total de la estructura (Kg): ', num2str(PESO_TOTAL)]);
disp('_____')
disp('*');
disp('_____ TABLA DE RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS _____');
disp(res_desp);
%% GRÁFICA DE LA ESTRUCTURA
figure;
subplot(2,1,1); % Cercha inicial
hold on;
for e = 1:nde
    plot([XY_inicial(IJ(e,1),1) XY_inicial(IJ(e,2),1)],
[XY_inicial(IJ(e,1),2) XY_inicial(IJ(e,2),2)], '-r', 'LineWidth', 1.5);
end
title('CERCHA INICIAL');
xlabel('X (m)');
ylabel('Y (m)');
axis equal; grid on;
hold off;
subplot(2,1,2); % Cercha optimizada
hold on;
for e = 1:nde
    plot([XY(IJ(e,1),1) XY(IJ(e,2),1)], [XY(IJ(e,1),2) XY(IJ(e,2),2)], '-
b', 'LineWidth', 1.5);
end
title('CERCHA OPTIMIZADA');

```

```
xlabel('X (m)');
ylabel('Y (m)');
axis equal; grid on;
hold off;
saveas(gcf, 'estructura_optimizada.png');
%% FUNCIÓN AUXILIAR DE SELECCIÓN
function idx = seleccionar_ruleta(APTITUD_ORDENADA)
    inversa = 1 ./ APTITUD_ORDENADA;
    ruleta = inversa / sum(inversa);
    r = rand;
    acumulado = cumsum(ruleta);
    idx = find(r <= acumulado, 1, 'first');
end
```

E. Diagrama de flujo

Para que el código de los módulos y del archivo principal tengan una mejor apreciación y sea mejor entendible, es que se realizan los diagramas de flujo para que cualquier persona pueda entender y poder apreciar lo que el código realiza.

E.1. Diagrama de flujo “ANALISIS_ESTRUCTURAL.m”

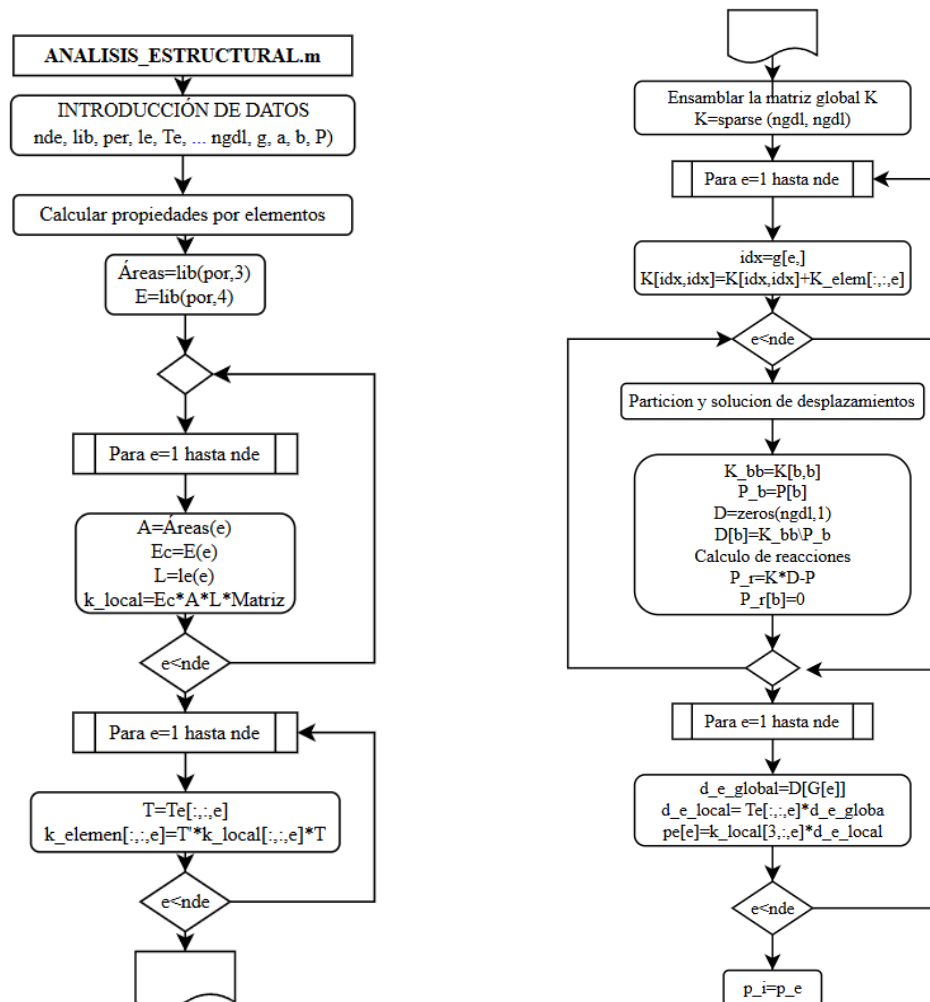


Figura E.1. Diagrama de flujo del módulo de análisis estructural (Elaboración propia).

E.2. Diagrama de flujo “DISENO_ESTRUCTURAL.m”

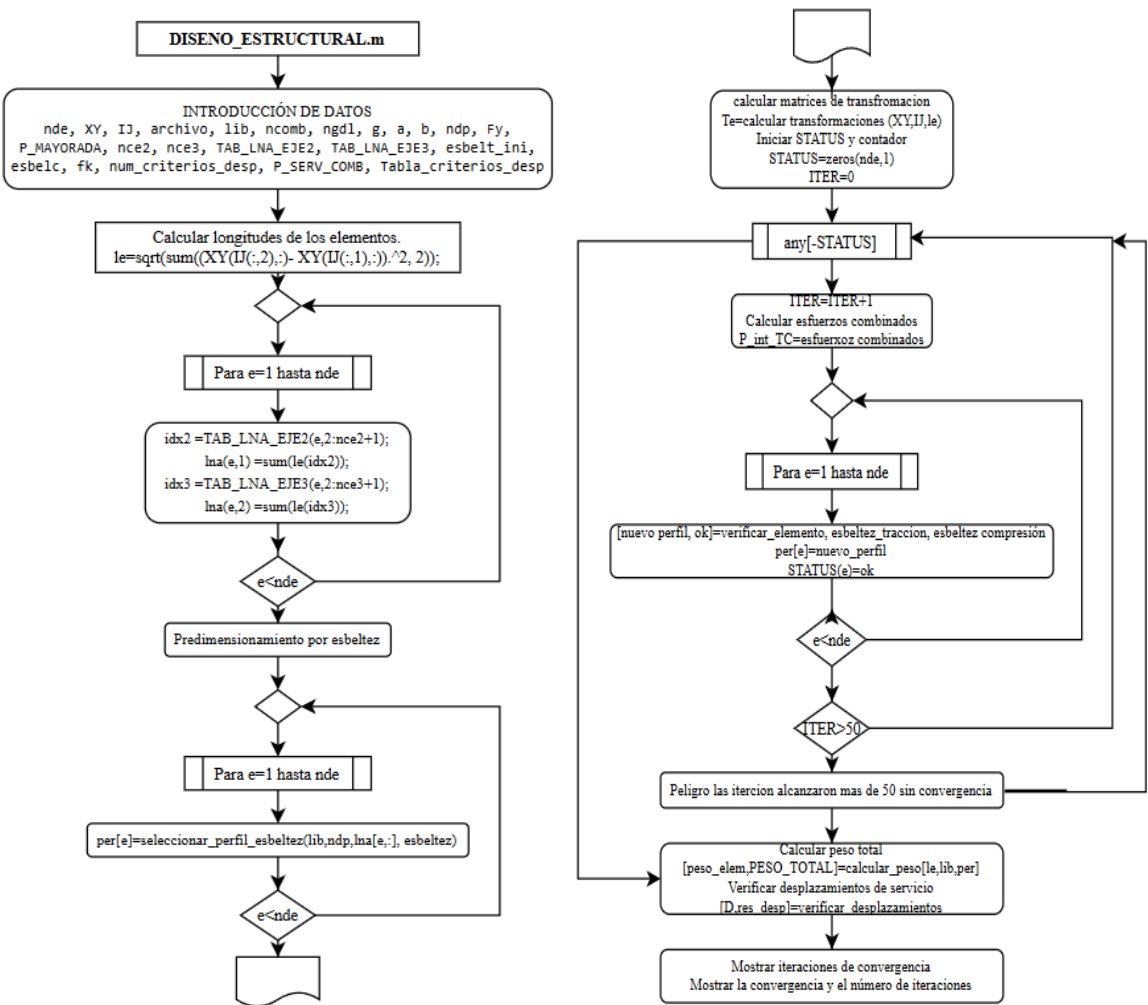


Figura E.2. Diagrama de flujo del módulo de diseño (Elaboración propia).

E.3. Diagrama de flujo “ALGEN.m”

Para la realización del funcionamiento del código del algoritmo es imprescindible que estén en una misma carpeta, el archivo de datos de Excel, los módulos de análisis y diseño estructural y el código principal.

Recurso:	Fecha de modificación	Tipo	Usuario
ALGEN.m	12/06/2025 22:27	MAIN Alg Code	16/KB
ANALISIS ESTRUCTURAL.m	12/06/2025 22:08	MAIN Alg Code	3/KB
DISEÑO ESTRUCTURAL.m	12/06/2025 22:02	MAIN Alg Code	7/KB
FILEINFO.xlsx	22/06/2025 22:28	Ficha de cálculo de Mien...	22/KB

Figura E.3. Archivos para el funcionamiento del algoritmo (Elaboración propia).

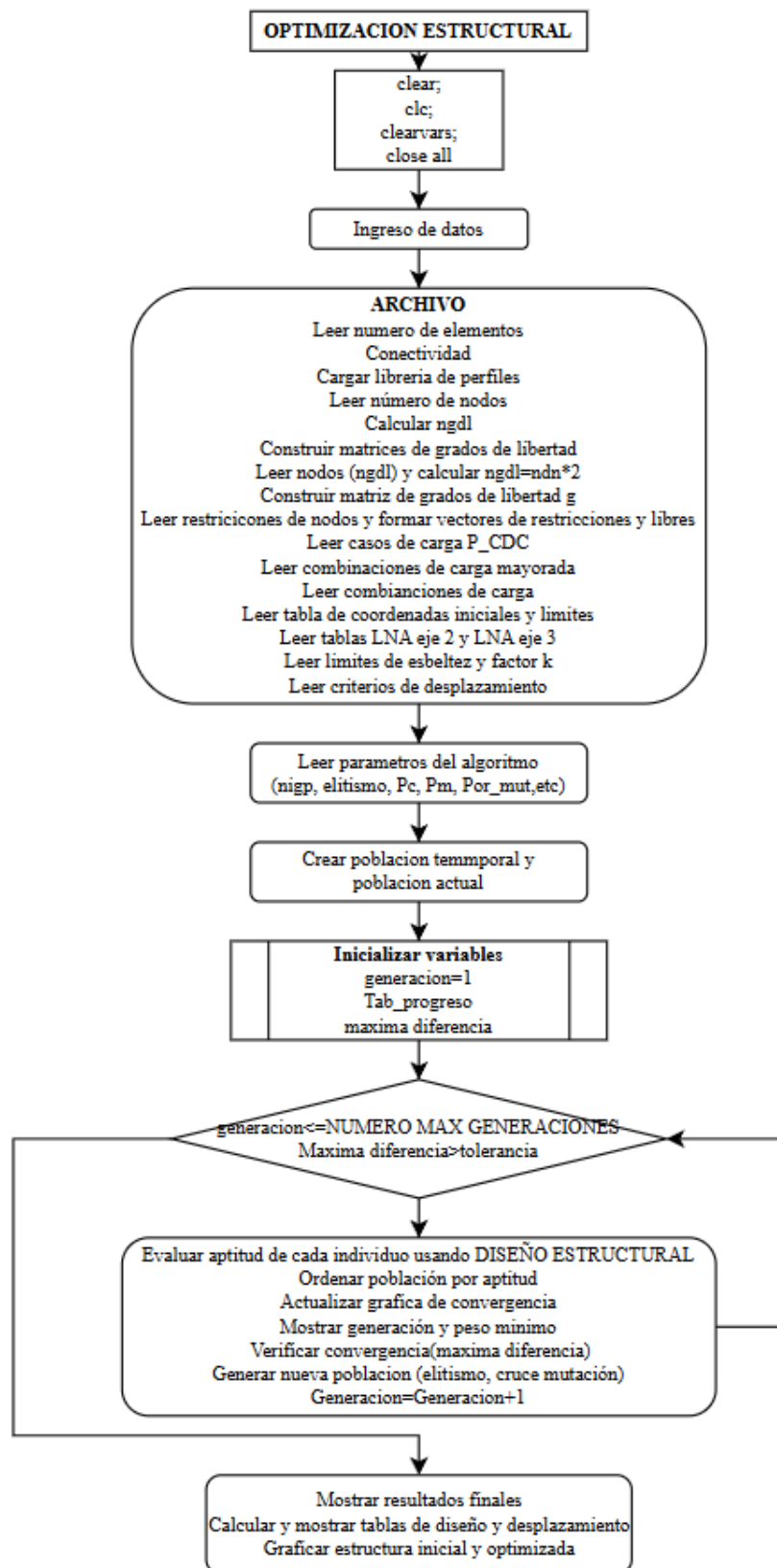


Figura E.4. Diagrama de flujo del algoritmo genético (Elaboración propia).

F. Propiedades y características de los materiales

En esta parte se presentan las características y propiedades de los perfiles conformado en frío CFS, que se emplean en las cerchas 2D, siendo los parámetros son muy importantes para el cálculo, diseño del modelo, para poder determinar la *capacidad resistente* (tracción/compresión), *diseño en servicio* (desplazamientos) de acuerdo a normativa.

F.1. Clasificación de perfiles conformados en frío

En esta parte se hace se muestran la clasificación de los perfiles conformados en frío, de acuerdo a la sección y de acuerdo a su funcionalidad.

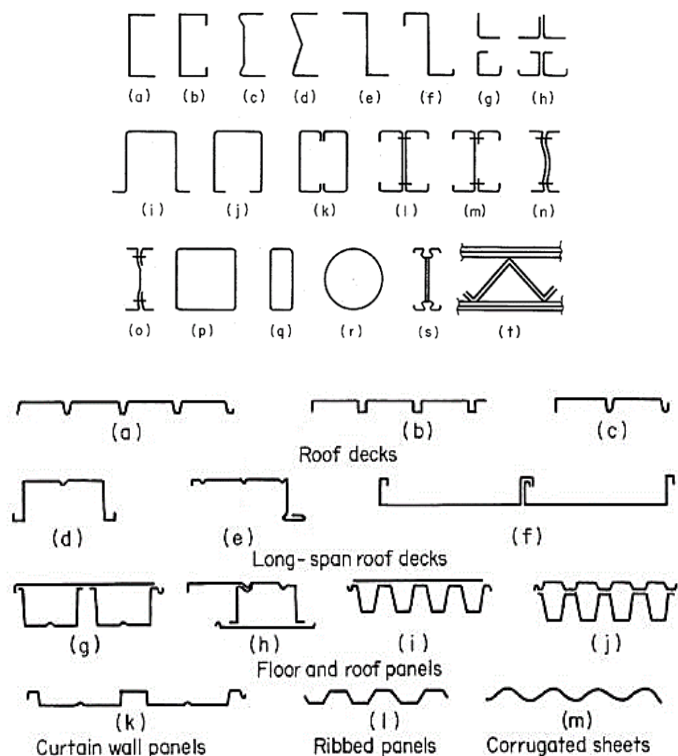


Figura F.1. En la imagen superior se muestran los tipos de miembros estructurales individuales; en la imagen inferior se muestran los Paneles y decks laminados en frío (Yu, LaBoube, y Chen 2019).

F.2. Propiedades mecánicas de los perfiles conformado en frío

A continuación, se hace el desarrollo de las principales propiedades mecánicas de los perfiles CFS; la cuales fueron extraídas de bibliografías y normas de diseño.

Tabla F.1. Propiedades mecánicas de los perfiles conformado en frío

PROPIEDAD MECÁNICA	DESCRIPCIÓN	VALORES TÍPICOS	REFERENCIA	PROPIEDAD MECÁNICA
Resistencia a la tracción	Capacidad del material para resistir cargas de tensión sin fallar.	250 - 300 MPa (36 – 43 ksi), según el tipo de acero.	(Grandon Alborno 2011)	Resistencia a la tracción
Esfuerzo de fluencia	Tensión máxima antes de que el material se deforme plásticamente.	≥ 248.211 MPa (36 ksi) para ASTM A572 Grado 33	(AISI 1996)	Esfuerzo de fluencia
Resistencia última	Máxima tensión soportada antes de la falla del material.	≥ 400 MPa (58 ksi) en ASTM A992.	Grandón Alborno (2011).	Resistencia última
Ductilidad	Capacidad del material de deformarse sin fracturarse.	Elongación $> 20\%$.	(AISI 1996)	Ductilidad
Curva de esfuerzo-deformación	Relación entre esfuerzo aplicado y deformación en la fase elástica e inelástica.	Módulo de elasticidad: ≈ 200 GPa (29,000 ksi).	(Grandon Alborno 2011)	Curva de esfuerzo-deformación
Módulo de elasticidad (E)	Medida de la rigidez del material.	200 - 210 GPa (29,000 - 30,000 ksi).	(AISI 1996)	Módulo de elasticidad (E)
Análisis de pandeo	Evaluación de los perfiles bajo carga axial para prevenir fallos por pandeo.	Depende de la esbeltez y del tipo de soporte estructural.	(Li et al. 2023)	Análisis de pandeo
Tenacidad	Capacidad de absorber energía antes de la fractura.	> 200 J en ensayos de impacto.	(Grandon Alborno 2011)	Tenacidad
Resistencia a la fatiga	Capacidad del material para resistir cargas cíclicas sin fallar.	≈ 0.50 de la resistencia última (F_u).	(AISI 1996)	Resistencia a la fatiga
Durabilidad	Resistencia del material a la corrosión y factores ambientales.	Tratamiento superficial (galvanización, pintura).	(AISI 1996)	Durabilidad

Nota: La siguiente tabla fue sacada de las referencias bibliográficas.

F.3. Ventajas y limitaciones de los perfiles CFS

Tabla F.2. Ventajas y limitaciones de los perfiles conformados en frío

Descripción	Ventajas	Limitaciones
Estructural	Alta relación resistencia-peso. Capacidad portante superior a 200 MPa. Geometrías eficientes.	Baja resistencia a cargas de impacto Riesgo de fatiga estructural bajo cargas cíclica.
Económica	Reducción de costos de producción Transporte y montaje más económicos.	Costo inicial elevado en comparación con soluciones tradicionales.
Constructiva	Rápido ensamblaje y ejecución en obra. Producción automatizada con alta precisión.	Limitaciones en formas y espesores disponibles, necesidad de recubrimientos.
Ambiental y durabilidad	Reciclabilidad superior al 90.00 %. Requiere menor cantidad de material.	Vulnerabilidad a la corrosión. Alta conductividad térmica.

Nota: Esta tabla fue saca de las referencias bibliográficas de los Anexos.

F.4. Normas nacionales e internacionales de diseño

Tabla F.3. Normas nacionales e internacionales que se aplican en el diseño de estructuras metálicas.

NORMATIVA	PAÍS / REGIÓN	DESCRIPCIÓN
NORMATIVAS NACIONALES.		
Guía Boliviana de Construcción de Edificaciones	Bolivia	- Lineamientos municipales para el desarrollo de normativas locales de construcción. - Define requisitos mínimos y responsabilidades en el proceso de construcción.
Guía Boliviana de Diseño Sísmico (GBDS-2020)	Bolivia	- Mejora la resistencia sísmica en estructuras, complementando normativas de hormigón armado. - Establece criterios para mejorar la resistencia sísmica de las construcciones.
Guía Boliviana para Diseño y Presentación de Proyectos (2017)	Bolivia	- Define procedimientos técnicos para mejorar los proyectos de construcción. - Asegura el uso eficiente de recursos y fomenta la optimización del diseño estructural.
Norma Boliviana de Hormigón Estructural NB-1225001-1 (2020)	Bolivia	- Regula el diseño, construcción y control de calidad del hormigón estructural. - Se basa en el código ACI 318-2014, incluyen estándares internacionales de seguridad.
Acciones sobre estructuras-acción del viento parte1 NB 1225003-1 (2022)	Bolivia	Esta norma establece la determinación de los procedimientos y modelos para poder obtener valores de las acciones producidas por el viento sobre las construcciones.
Norma Boliviana de Acción del Granizo sobre las Construcciones (2025)	Bolivia	Es un documento técnico desarrollado para responder a los continuos colapsos de cubiertas metálicas en Bolivia, causados por cargas extremas de granizo (En revisión)
NORMATIVAS INTERNACIONALES		
AISC - American Institute of Steel Construction	EE.UU.	- Proporcionan especificaciones para el diseño de estructuras de acero estructural. - Aplicadas ampliamente en la construcción de edificaciones.
AISI - American Iron and Steel Institute	EE.UU.	Regulan el uso de perfiles conformados en frío en estructuras metálicas. AISI S100 es una referencia para el diseño de elementos de acero en frío.
ASCE 7-16 - Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings	EE.UU.	- Publicadas por la American Society of Civil Engineers (ASCE). - Especifican las cargas mínimas de diseño y criterios asociados para edificios y otras estructuras
ASTM A653	EE.UU.	- Definen especificaciones de calidad para materiales estructurales. - ASTM A653 regula las características del acero en frío

Nota: La siguiente tabla fue extraída de libros y revistas, la cual se adjunta en la bibliografía.