



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK
FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Titulación Previo a la Obtención del Título de:
INGENIERO CIVIL

**“Optimización estructural de puentes simplemente apoyados mediante el uso de
Rhinceros y Grasshopper: un enfoque paramétrico”**

Alan Josué Fiscal Aguilera

Quito, agosto 2024



DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Alan Josué Fiscal Aguilera, portador de la cedula de ciudadanía ecuatoriana con número 172343509-3, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación fue desarrollado en su total por mi persona, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que las referencias bibliográficas presentes en este se aplicaron respetando las Normas Apa y haciendo una revisión necesaria para incluirlas en el documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

D.M. Quito, 2024

Alan Josué Fiscal Aguilera

C.I. 1722348404

ajfiscal.civ@uisek.edu.ec



DECLARATORIA

El presente Trabajo de Titulación titulado:

“Optimización estructural de puentes simplemente apoyados mediante el uso de Rhinoceros y Grasshopper: un enfoque paramétrico”

Realizado por:

FISCAL AGUILERA ALAN JOSUÉ

Como requisito para la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Ha sido dirigido por el profesor

Ing. Hugo Marcelo Otañez Gómez, Msg.

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor.

Ing. Hugo Marcelo Otañez Gómez, Msg.

TUTOR



DECLARATORIA DE PROFESORES INFORMANTES

Los profesores informantes:

Ing. Luis Alberto Soria Núñez, Msc.

Después de revisar el trabajo presentado,
Lo ha calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal
examinador

Ing. Hugo Marcelo Otáñez Gómez, Msg.



“Optimización estructural de puentes simplemente apoyados mediante el uso de Rhinoceros y Grasshopper: un enfoque paramétrico”

Por

FISCAL AGUILERA ALAN JOSUE

Agosto , 2024

Aprobado:

....., Tutor.

..... , Presidente del Tribunal.

....., Miembro del Tribunal

Aceptado y Firmado: _____ , ,2024.

Hugo M. Otañez G. Tutor.

Aceptado y Firmado: _____ , ,2024.

----- . Miembro del Tribunal.

_____ , , 2024.

..... , ... , , ...

Presidente(a) del Tribunal

Universidad Internacional SEK

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a mis padres, Juan Carlos Fiscal y Ana Aguilera, por su incondicional apoyo durante todo este proceso. Su amor, esfuerzo y sacrificio han sido fundamentales tanto en mi desarrollo personal como académico. También quiero agradecer a Camila Solis, quien ha estado a mi lado en los momentos buenos y malos de mi carrera, brindándome palabras de aliento y consejos que me han motivado a mejorar cada día.

A mi hermana Melanny y a toda mi familia, les agradezco por estar siempre presentes y ofrecerme su apoyo constante. Finalmente, agradezco a mi tutor, el Ing. Hugo Otañez, por compartir su tiempo y conocimientos durante la realización de mi

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mis padres, Juan Carlos Fiscal y Ana Aguilera, a mi novia Camila Solis, a mi hermana Melanny y a toda mi familia, quienes han sido la fuerza que me impulsa en la vida. Les agradezco profundamente por su amor incondicional, su apoyo constante y su fe inquebrantable en mí. A través de su ejemplo de esfuerzo y perseverancia, me han enseñado a enfrentar cada desafío con determinación. Ustedes son mi mayor fuente de inspiración y motivación, y sé que sin su presencia, este logro no habría sido posible. Gracias por estar siempre a mi lado. Los amo y admiro con todo mi corazón.

RESUMEN

Este proyecto de desarrollo tiene como objetivo la optimización estructural de puentes simplemente apoyados utilizando el programa Rhinoceros con su complemento Grasshopper, para de esa forma mejorar el proceso de diseño y la eficiencia de los puentes. La intención de este proyecto es aprovechar al máximo la potencia que brindan estas herramientas de modelado paramétrico y optimización para obtener puentes que no pierdan sus bases fundamentales de construcción, manteniendo un su rendimiento estructural y optimizar las secciones metálicas de modelo.

Actualmente, existe un conocimiento considerable sobre la optimización estructural de puentes, pero hay una brecha en cuanto a su aplicación utilizando los programas Rhinoceros y Grasshopper. Esta falta de investigación limita la capacidad de aprovechar plenamente las capacidades de estos programas en el diseño de puentes simplemente apoyados.

Para abordar esta brecha, mi investigación se enfocará en el desarrollo de algoritmos y scripts personalizados en Grasshopper que permitan la optimización estructural de puentes simplemente apoyados. Estos métodos considerarán variables clave como la geometría del puente, los materiales utilizados y las cargas aplicadas, y buscarán encontrar soluciones óptimas que cumplan con los requisitos de seguridad y rendimiento.

Palabras clave: Optimización, puentes simplemente apoyados, Rhino y Grasshopper, algoritmos, modelado paramétrico, geometría del puente, soluciones óptimas.

ABSTRACT

This development project aims to achieve the structural optimization of simply supported bridges using the Rhinoceros and Grasshopper programs, thereby enhancing the design process and the efficiency of the bridges. The intention of this project is to harness the full potential of these parametric modeling and optimization tools to obtain bridges that maintain their fundamental construction principles while improving their economic performance and material implementation.

Currently, there is considerable knowledge about the structural optimization of bridges, but there is a gap in its application using the Rhinoceros and Grasshopper programs. This lack of research limits the ability to fully exploit the capabilities of these programs in the design of simply supported bridges.

To address this gap, my research will focus on the development of customized algorithms and scripts in Grasshopper that enable the structural optimization of simply supported bridges. These methods will consider key variables such as bridge geometry, materials used, and applied loads, aiming to find optimal solutions that meet safety and performance requirements.

Keywords: Optimization, simply supported bridges, Rhino and Grasshopper, algorithms, parametric modeling, bridge geometry, optimal solutions.

Contenido

1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....	1
1.1 Problema de investigación.....	1
1.1.1 Descripción del problema	1
1.1.2 Formulación del problema	1
1.1.3 Preguntas Accesorias	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Hipótesis.....	3
1.3.1 Hipótesis General.....	3
1.3.2 Hipótesis Específicas	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.5 Metodología.....	4
1.5.1 Área de trabajo	4
1.5.2. Materiales y métodos	5
1.6. Alcance	6
1.7. Limitaciones	6
1.8. Resultados esperados.....	6
2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1 Algoritmo.....	7
2.2 Parámetro.....	8
2.3 Diseño Paramétrico.....	9
2.4 Análisis Estructural.....	11
2.4.1 Análisis de elementos finitos	12
2.4.1.1 Esfuerzo.....	13
2.4.1.2 Deformación.....	14
2.4.1.3 Deflexión	15
2.4.2 Matriz de rigidez	16
2.4.3 Acero Estructural	17
2.4.3.1 Diagrama Esfuerzo-Deformación	18
2.4.4 Estructuras reticuladas y articuladas	20
2.4.4.1 Apoyos.....	22

2.5 Optimización Estructural	23
2.5.1 Tipos de optimización estructural	25
2.5.2 Optimización Heurística y Metaheurística	26
2.5.3 Función Objetivo	28
2.5.4 Algoritmos evolutivos genéticos	29
2.5.5 Aplicaciones actuales de optimización	30
2.6 Herramientas de diseño paramétrico	33
2.6.1 RHINOCEROS 3D	33
2.6.2 GRASSHOPPER	35
2.6.2.1 Interfaz	36
2.6.2.2 Funcionamiento	41
2.6.2.3 Partes del componente	42
2.6.2.4 Ventajas de usar Grasshopper	43
2.7 Herramientas de Análisis Estructural	44
2.7.1 Karamba 3D	44
2.8 Herramientas de Optimización Estructural	47
2.8.1 Galápagos	47
2.8.1.1 Definición de Variables	49
2.8.1.2 Configuración de Galápagos	50
2.8.1.3 Tamaño de Población	52
2.8.1.4 Inicial Boost	52
2.8.1.5 Ejecución de Galápagos	52
2.8.1.6 Obtención de resultados	54
3. CAPÍTULO 3 (CASO DE ESTUDIO)	55
3.1 MODELACIÓN	58
3.1.1 Modelación paramétrica	58
3.1.2 Datos de entrada	67
3.1.3 Datos de Salida	74
3.2 Ensamble de modelo Estructural	75
3.2.1 Líneas a vigas	76
3.2.2 Superficie a losa	77
3.2.3 Apoyos	78
3.2.4 Definición de las cargas	78
3.2.5 Definición de material y catálogo de perfiles	79

3.3 Análisis Estructural.....	81
3.4 DATOS DE MODELACIÓN	84
3.4.1 Descripción	85
3.4.2 Materiales.....	85
3.4.3 Análisis de cargas.....	85
3.4.3.1 Carga Viva.....	86
3.4.3.2 Carga muerta	86
3.4.4 Secciones Utilizadas	86
3.4.5 Transformar unidades de carga de kN/m ² a kN/m	87
3.5 Caso 1	89
3.5.1 Optimización estructural con el Algoritmo Genético	90
3.5.2 Resultados de la primera optimización	94
3.6 Caso 2	96
3.6.1 Optimización de tamaño	96
3.5.2 Resultados de la segunda optimización	97
3.7 Caso 3	99
3.7.1 Optimización Topológica.....	99
3.7.1 Resultados de la tercera optimización.....	99
3.8 Bloque para exportar el modelo a Etabs/Sap2000.....	102
4. CAPITULO 4 (RESULTADOS Y ANÁLISIS).....	103
5. CAPITULO 5 (CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES).....	110
6. BIBLIOGRAFÍA.....	113
7. ANEXOS.....	122
7.1 Anexo 1. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de Carga Trapezoidal	122
7.2 Anexo 2. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de Carga Triangular	122
7.3 Anexo 3. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de “Límite de desplazamiento”	122
7.4 Anexo 4. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de “Radios de utilización no mayor a 0.80”	122
7.5 Anexo 5. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de “Convertir toda la lista de radios de utilización a mil, si sobrepasa un valor 0,80”	123

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Fórmula básica de Esfuerzo	14
Ecuación 2. Deformación unitaria.....	15
Ecuación 3 Deflexión máxima permitida según norma AASTHO	16
Ecuación 4. Fórmula para encontrar el esfuerzo axial en el material	19
Ecuación 5. Formula de optimización general	24
Ecuación 6. Fórmula para distribución trapezoidal.....	87
Ecuación 7. Fórmula para distribución triangular	87

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Diseño paramétrico de Jockey Club Innovation Tower (Hong Kong). Diseño: Zaha Hadid Architects	10
Ilustración 2 Diseño Paramétrico Fuente: (ARCUX, 2020)	11
Ilustración 3 Simulación de un puente aplicando elementos finitos	13
Ilustración 4. Gráfica de esfuerzo-deformación Fuente: (McCormac J., 2012).....	18
Ilustración 5. Diagrama esfuerzo-deformación para acero A36, A572 Y A514.....	19
Ilustración 6. Tipos de geometría para cerchas (Estructuras articuladas)	21
Ilustración 7. Tipos de apoyos Fuente: (Diaz, Ruiz, & Suárez, 2008)	23
Ilustración 8. Tipos de optimizació Fuente: (Cuitláhuac, 2011)	26
Ilustración 9. Viaducto de Millau Fuente: (Viprocosa, 2018)	30
Ilustración 10. Serpentine Pavilion 2000 Fuente: (Admagazine, 2020)	31
Ilustración 11. Biblioteca Central de Seattle Fuente: (Expocihac media, 2023).....	32
Ilustración 12. Centro de Investigación y Desarrollo de BMW en Múnich Fuente: (Wiki Arquitectura, 2009)	33
Ilustración 13. Logo programa de Rhinoceros 3D Fuente: (McNeel & Associates, 2019).....	34
Ilustración 14. Logo complemento Grasshopper Fuente: (McNeel & Associates, 2019).....	35
Ilustración 15. Barra de herramientas Rhinoceros 3D Fuente: Captura de pantalla del programa.....	37
Ilustración 16. Interfaz Grasshopper Fuente: (Payne & Issa, 2009)	37
Ilustración 17. Componentes de Grasshopper Fuente: (Payne & Issa, 2009)	38
Ilustración 18. Ejemplo de cómo ingresar complementos al área de trabajo Fuente: (Payne & Issa, 2009)	39
Ilustración 19. Como añadir complementos al lienzo Fuente: Captura de pantalla del programa.....	39

Ilustración 20. Boxes y su respectivo color informativo Fuente: (Payne & Issa, 2009).....	40
Ilustración 21. Área trabajo Grasshopper.....	41
Ilustración 22. Partes del componente Fuente (Payne & Issa, 2009).....	42
Ilustración 23. Etiquetas informativas de componentes.....	43
Ilustración 24. Logo de Karamba 3D.....	44
Ilustración 25. Complementos dentro de la herramienta Karamba 3D Fuente: Captura de pantalla del programa.....	45
Ilustración 26. Complemento de Optimización " Optimize Cross Section" Fuente: Captura de pantalla del programa.....	47
Ilustración 27. Logo de Galápagos.....	48
Ilustración 28. Box Galápagos Fuente: Captura de pantalla del programa.....	50
Ilustración 29. Interfaz de configuración.....	51
Ilustración 30. Interfaz ejecución Galápagos Fuente: https://mt-grasshopper.blog.jp/archives/9106044.html	54
Ilustración 31. Esquema de procesos para algoritmo paramétrico y análisis estructural.....	56
Ilustración 32. Esquema de procesos para la optimización estructural.....	57
Ilustración 33. Creación de Punto inicial.....	58
Ilustración 34. Bloques de comando para creación de puntos para dibujar los cordones a partir del primer punto (Puntos para cordón inferior).....	59
Ilustración 35. Puntos para cordón superior.....	59
Ilustración 36. Bloques de comando para creación de los puntos de partida de la Geometría	60
Ilustración 37. Box "LINE".....	60
Ilustración 38. Creación de líneas base para cordones del puente.....	61
Ilustración 39. Creación de las divisiones del puente.....	62
Ilustración 40. Creación de montantes y diagonales.....	62

Ilustración 41. Creación de los tipos de cercha	63
Ilustración 42. Bloque Stream Filter para escoger el tipo de cercha para el análisis y optimización.	63
Ilustración 43. Boxes para duplicar montantes y diagonales.	64
Ilustración 44. Bloques para creación de la cercha 3D	64
Ilustración 45. Boxes para creación de los pilares	65
Ilustración 46. Boxes para creación del tablero	65
Ilustración 47. Algoritmo Visual Grasshopper	66
Ilustración 48. Modelo visual en Rhinoceros 3D	66
Ilustración 49. Parámetros modificables	67
Ilustración 50. Cerchas programadas en el lienzo de Grasshopper	68
Ilustración 51. Tipo de carga axial sobre el tablero.....	69
Ilustración 52. Tipo de carga axial sobre las vigas transversales	69
Ilustración 53. Slider para cambiar la luz del puente	70
Ilustración 54. Slider para cambiar altura de pilares	70
Ilustración 55. Slider para cambiar la altura de los montantes externos	71
Ilustración 56. Slider para cambiar la altura de inclinación.....	71
Ilustración 57. Slider para cambiar ancho del puente	72
Ilustración 58. Slider para escoger el número de divisiones	72
Ilustración 59. Parámetro para definir la dirección del arriostramiento longitudinal (Vista superior)	73
Ilustración 60. Parámetro para definir Carga Viva y Carga Muerta.....	74
Ilustración 61. Datos de salida de los elementos del puente	74
Ilustración 62. "Assamble Model" componente para ensamblar el modelo estructural.....	75
Ilustración 63. Complemento para cambiar las propiedades líneas a elementos estructurales	76

Ilustración 64. Clasificación de cada elemento estructural	77
Ilustración 65. Complemento para convertir una superficie en losa tipo tablero.....	77
Ilustración 66. Apoyos en la base de los pilares.....	78
Ilustración 67. Bloques para el cambio de unidades de KN/m ² a KN/m (Carga en vigas transversales y cordones inferiores)	79
Ilustración 68. Algoritmo que define la carga sobre el tablero del puente.....	79
Ilustración 69. Definición y selección del material.....	80
Ilustración 70. Bloques para definir y seleccionar los perfiles de los elemntos.....	81
Ilustración 71. Bloques de comando para el Análisis Estructural (Karamba3d).....	82
Ilustración 72. Algoritmo Final	83
Ilustración 73. Algoritmo de la geometría dentro de clúster	84
Ilustración 74. Puente "La Independencia "	84
Ilustración 75. Carga Muerta.....	86
Ilustración 76 Área tributaria	87
Ilustración 77. Algoritmo de automatización para distribución trapezoidal y triangular.....	88
Ilustración 78. Script Distribución Trapezoidal	88
Ilustración 79. Script Distribución Triangular.....	89
Ilustración 80. Valores iniciales de masa y desplazamiento.....	90
Ilustración 81. Bloque de comando Galápagos	90
Ilustración 82. Variables conectadas a “Genome”.....	91
Ilustración 83. Componente Evaluate para generar un objetivo simple.....	92
Ilustración 84. Fórmula para la función objetivo	93
Ilustración 85. Código para delimitar desplazamiento.....	93
Ilustración 86. Código de programación para radio de utilización	93
Ilustración 87. Código de programación para iterar el el radio de utilización	94

Ilustración 88. Resultados de función objetivo	94
Ilustración 89. Algoritmo genético Galápagos Optimización estructural	95
Ilustración 90. Valores obtenidos de Masa y desplazamiento de la optimización	96
Ilustración 91. Perfiles obtenidos de la segunda optimización	98
Ilustración 92. Masa y desplazamiento obtenido luego de la optimización.....	98
Ilustración 93. Sliders que el parámetro Genomas cambia hasta encontrar la mejor solución	99
Ilustración 94. Perfiles obtenidos en la tercera optimización.....	100
Ilustración 95. Optimización Topológica	101
Ilustración 96. Resultados de Masa y desplazamiento	101
Ilustración 97. Algoritmo genético evolucionando hasta encontrar la solución más optima.	102
Ilustración 98. Complemento GeometryGym para exportar de Karamba a Etabs/Sap2000..	102
Ilustración 99. Tabla comparativa de las optimizaciones realizadas	105
Ilustración 100. Modelo optimizado vs Modelo adaptado a su construcción	106
Ilustración 101. Comparación de deflexiones obtenidas.....	107
Ilustración 102. Etabs vs Karamba3D, comparación de fuerzas axiales (pilares).....	107
Ilustración 103. Etabs vs Karamba3D, comparación de fuerzas axiales (cordón inf)	107
Ilustración 104. Etabs vs Karamba3D, comparación de fuerzas axiales (cordón sup)	108
Ilustración 105. Etabs vs Karamba3D, comparación de fuerzas axiales (montantes).....	108
Ilustración 106. Etabs vs Karamba 3D, comparación de fuerzas axiales (arriostamientos y vigas)	109
Ilustración 107. Etabs vs Karamba 3D, comparación de fuerzas axiales (diagonales)	109
Ilustración 108. Fuerzas axiales obtenidas del algoritmo (kN).....	110
Ilustración 109, Fuerzas axiales obtenidas del programa Etabs (kN)	110

1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 Problema de investigación

1.1.1 Descripción del problema

El entorno de la construcción se encuentra en constante avance, de modo que es imperativo adoptar nuevas herramientas para optimizar y mantener la eficiencia estructural de obras civiles como puentes simplemente apoyados. Con este antecedente, se presenta la exigencia de crear un modelo paramétrico con ayuda de herramientas computacionales como Rhinoceros y Grasshopper para obtener soluciones óptimas evaluando cierta cantidad de variables de diseño, como la forma, la organización de los elementos estructurales, los materiales utilizados y las cargas aplicadas.

1.1.2 Formulación del problema

¿Cómo puede el proceso de optimización utilizando Rhinoceros y Grasshopper abordar las restricciones estructurales y de materiales, aplicar algoritmos de optimización para explorar el espacio de diseño y encontrar la configuración óptima del puente simplemente apoyado, y superar las limitaciones o desventajas tradicionales de este tipo de puentes en términos de geometría?

1.1.3 Preguntas Accesorias

- ¿Cómo se seleccionan los parámetros de diseño que serán optimizados en el proceso?
¿Existen parámetros que tengan un impacto significativo en el rendimiento del puente?
- ¿Qué aspectos del diseño de puentes simplemente apoyados se consideran más críticos para la optimización, y por qué?

- ¿En qué medida se consideran aspectos estéticos y de sostenibilidad en el proceso de optimización de los puentes simplemente apoyados? ¿Se busca encontrar un equilibrio entre la eficiencia estructural y la estética del puente?

1.2 Antecedentes

En la actualidad, el avance tecnológico se encuentra acompañado por la necesidad de mejorar y optimizar la construcción de puentes. La optimización estructural busca encontrar las características más eficientes de una estructura, minimizando el uso de material sin comprometer la estructura ni su rendimiento funcional. Tradicionalmente, este proceso ha sido desafiante en términos de tiempo y recursos, por lo que el uso del programa Rhinoceros por medio de su extensión Grasshopper los cuales son ampliamente utilizados en diseño arquitectónico y modelado 3D, sin embargo, su aplicación específica en la optimización de puentes simplemente apoyados es relativamente nueva. Esto abre las puertas a nuevas posibilidades para la exploración de formas y la optimización de estructuras de manera iterativa y automatizada.

A pesar de la existencia de varios métodos de diseño y optimización de puentes, el uso de estos programas en la optimización de puentes simplemente apoyados no ha sido ampliamente explorado. Esta investigación nos ayudara a entender cómo la optimización mediante un algoritmo paramétrico puede afectar en la geometría y la eficiencia de los puentes simplemente apoyados en términos de peso, desplazamiento y estabilidad.

Por lo tanto, este proyecto ofrecerá un enfoque novedoso en el campo de la optimización de puentes simplemente apoyados al emplear Rhinoceros y Grasshopper como herramientas principales en el proceso de diseño y optimización. Los resultados provenientes de este proyecto proporcionarán datos específicos para el diseño eficiente de puentes

simplemente apoyados, aprovechando las capacidades de modelado 3D y algoritmos visuales de Rhinoceros y Grasshopper.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis General

La utilización de un modelo paramétrico junto con algoritmos genéticos permite resolver de manera eficiente el análisis y la optimización de puentes simplemente apoyados con una estructura metálica. Esto nos permitirá obtener soluciones que minimicen el peso total de la estructura y los materiales para su armadura, cumpliendo con las restricciones de carga, rigidez y desplazamiento máximos.

1.3.2 Hipótesis Específicas

- La optimización de puentes nos ayudará a identificar configuraciones estructurales de puentes simplemente apoyados que reduzcan el peso total sin afectar la capacidad de carga ni la estabilidad.
- La incorporación de parámetros de diseño variables en Rhinoceros y Grasshopper permitirá explorar un amplio espacio de diseño y encontrar soluciones óptimas que garanticen la eficiencia estructural de los puentes simplemente apoyados.
- Al considerar diferentes materiales y distribuciones de carga en el proceso de optimización, se podrán obtener puentes simplemente apoyados que sean más resistentes y rígidos, mejorando así su comportamiento estructural en comparación con los diseños convencionales.
- La aplicación de métodos como algoritmos genéticos, algoritmos de búsqueda y otros métodos de optimización en Rhino y Grasshopper permitirá encontrar soluciones de diseño que superen las limitaciones y restricciones impuestas por los enfoques de diseño tradicionales de puentes simplemente apoyados.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Elaborar un modelo paramétrico que ayude a crear la geometría de un puente en el cual se pueda explorar la configuración estructural, la distribución de cargas, la elección del material y perfiles, así como la realización del análisis estructural utilizando el método de elementos finitos. Para posteriormente llevar a la optimización estructural mediante un algoritmo genético para garantizar la eficiencia frente a las cargas mientras se reduce su peso.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo paramétrico inicial de un puente simplemente apoyado que posibilite la modificación de variables geométricas, como la longitud, altura, anchura, tipo de cercha, entre otras, utilizando el software de modelado 3D Rhinoceros y su complemento Grasshopper.
- Realizar el análisis estructural utilizando el método de elementos finitos (FEM) para evaluar la respuesta del modelo ante diferentes condiciones de carga, determinando desplazamientos, esfuerzos y deformaciones.
- Definir los parámetros y las funciones de fitness que el algoritmo genético utilizará para evaluar las soluciones candidatas.
- Utilizar un algoritmo genético que optimice la configuración estructural del puente, con énfasis en la reducción del peso.

1.5 Metodología

1.5.1 Área de trabajo

El área de trabajo para esta tesis está enfocada en el análisis estructural y la optimización de puentes simplemente apoyados que mejoren la eficiencia y geometría de la

misma. Para esto se utilizará el programa de modelación 3D Rhinoceros y su plug-in Grasshopper.

1.5.2. Materiales y métodos

Recopilación de información: Investigación y búsqueda bibliográfica con el propósito de recopilar información relevante y relacionada con técnicas de optimización mediante el programa Rhinoceros, la optimización mediante algoritmos genéticos y conceptos relacionados con el diseño paramétrico.

Definición de Parámetros y Variables: Definición e identificación de parámetros para la modelación paramétrica del puente, estableciendo variables de diseño como secciones utilizadas, la luz del puente, carga viva, carga muerta, etc.

Modelado en Rhinoceros y Grasshopper: Creación del modelo en el programa Rhinoceros con la ayuda de Grasshopper para realizar el análisis estructural y su optimización.

Análisis Estructural: Realización del análisis estructural empleando el plug-in Karamba 3D, que utiliza el análisis de elementos finitos (FEA) para determinar el comportamiento del puente bajo ciertas cargas externas.

Optimización estructural: Realización de la optimización estructural usando Galapagos, un complemento de Karamba 3D y una combinación de ambos. Par conseguir una solución adecuada del problema planteado.

Verificación resultados: Verificación de los datos extraídos mediante la comparación de los 3 casos de optimización propuestos para el modelo. Se corroborará los resultados de los esfuerzos axiales del caso más óptimo pasando el modelo mediante un bloque del componente GeometryGym que permite exportar a ETABS.

Conclusiones y recomendaciones: A partir de los resultados y el análisis al cual serán sometidos nuestros modelos, se formularán conclusiones precisas que nos presenten lo

ocurrido con nuestros modelos y la eficiencia del proceso de optimización. Con base en estos hallazgos, se ofrecerán recomendaciones claras de lo que los algoritmos paramétricos y genéticos pueden hacer en el ámbito de la ingeniería civil.

1.6. Alcance

Esta tesis se centra en la aplicación de técnicas de optimización estructural en el diseño de puentes simplemente apoyados, utilizando los programas Rhinoceros y Grasshopper, con un énfasis particular en el diseño paramétrico. El propósito es desarrollar un método basado en un algoritmo genético que simplifique el proceso de diseño y mejore la eficiencia de los puentes, garantizando su estabilidad, seguridad y funcionalidad.

1.7. Limitaciones

Debido a la complejidad y diversidad de los puentes y sus condiciones de carga, algunos aspectos específicos de puentes simplemente apoyados no se aborden en este trabajo. En esta tesis, se incluirá una membrana que simulara el tablero donde se colocaran cargas, así como en la estructura tipo cercha. Se analizarán tres tipos de cerchas: Howe, Pratt y Warren. Además, las cargas consideradas son carga viva y carga muerta, no incluirán las cargas de viento, cargas sísmicas, fuerza de frenado ni gradiente de temperatura. El empuje que genere el suelo sobre la estructura no será considerado, se tomara en cuenta las restricciones para sus apoyos de un puente simplemente apoyado. Estas limitaciones permitirán focalizar el estudio al algoritmo que se encarga de analizar el comportamiento estructural y la optimización de las cerchas seleccionadas bajo condiciones específicas.

1.8. Resultados esperados

Los resultados que se esperan de esta tesis de optimización estructural de puentes simplemente apoyados mediante el uso de Rhinoceros y Grasshopper son los siguientes:

- Se espera que el modelo muestre una reducción del peso total del puente en un porcentaje significativo, por ejemplo, una disminución del 10-20% del peso total. Estos resultados pueden variar aumentando el porcentaje de disminución.
- Optimización en la distribución de perfiles, mostrando cómo se ha reducido el uso de perfiles en áreas menos críticas.
- Soluciones adecuadas del modelo propuesto, donde se puede realizar una comparativa acerca de los 3 casos y tipo de optimización a la que se someterá la estructura.
- Recomendaciones basadas en los hallazgos de la tesis para la implementación de técnicas de optimización en futuros trabajos de investigación y proyectos de ingeniería civil.

2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Algoritmo

Alan Turing, un renombrado científico que es considerado uno de los pioneros de la informática, realizó una publicación en 1936 en la que introduce el concepto de una máquina abstracta de cálculo, conocida como la Máquina de Turing. Esta máquina, capaz de ejecutar cualquier cálculo mediante un programa (algoritmo), representó una idea revolucionaria en su época construyendo los cimientos para el desarrollo de la computación en años posteriores. Como lo expresan (Caiafa & Lew, 2020), un algoritmo emerge como una nueva manera de razonar, generando secuencias de modificaciones a una idea o a la información relacionada con un problema específico.

Es así que la definición de un algoritmo se entiende como un conjunto finito de instrucciones o pasos bien definidos que se siguen un orden específico para resolver un problema. Estos pasos detallados representan un método específico para abordar problemas particulares y permiten procesar información, realizar cálculos y tomar decisiones sistemáticas y lógicas

para alcanzar un resultado deseado. a una idea o a la información relacionada con un problema.

La creación de un algoritmo empieza con la conceptualización de ideas, esto nos permite definir el algoritmo y poder establecer los parámetros, los cuales el diseñador puede cambiar o volver a definir según la idea que tenga en mente.

Los algoritmos están presentes en muchas disciplinas y profesiones como son la informática, las matemáticas e incluso el diseño y la optimización estructural, proporcionando una metodología estructurada para resolver problemas de forma eficiente. Se han llevado a cabo múltiples investigaciones utilizando diversos algoritmos para optimizar estructuras. Aunque cada uno de estos algoritmos presenta cierta complejidad en la identificación de la información necesaria, tienen el potencial de ser aplicados a una amplia gama de sistemas estructurales (Orozco & Ospino, 2019).

2.2 Parámetro

Un parámetro se entiende como una variable o un conjunto de variables que pueden ser modificadas y gestionadas dentro de un modelo para investigar diversas alternativas de diseño. "Un parámetro es un dato que se considera un elemento crucial para analizar o evaluar una situación"; (Navarrete, 2014). Según Hudson, un parámetro se puede definir como cualquier factor cuantificable que caracteriza un sistema o establece sus límites. En el diseño paramétrico, los parámetros facilitan la construcción de un modelo computacional del problema de diseño, permitiendo la generación de soluciones alternativas al ajustarlos (p. 19-21).

Por medio de estos parámetros se nos permite modificar características específicas, en este caso de un puente, como es la longitud, ancho, altura, tipos de cercha, divisiones, materiales y condiciones de carga, sin necesidad de redefinir completamente el modelo.

Los parámetros actúan como entradas en el proceso de optimización y son fundamentales para el enfoque paramétrico. Este enfoque implica el uso de software como Rhinoceros y Grasshopper para crear modelos flexibles y dinámicos que pueden ser fácilmente ajustados mediante la manipulación de estos parámetros. De esta manera, se pueden generar múltiples variaciones del diseño del puente, evaluar su desempeño estructural y optimizar su configuración para cumplir con criterios específicos, como la minimización del peso, cumplir con la deflexión máxima permitida y encuentre la mejor configuración de secciones.

2.3 Diseño Paramétrico

El diseño o modelo paramétrico es una metodología avanzada de diseño asistido por computadora que utiliza parámetros y fórmulas matemáticas para crear y modificar objetos geométricos. Este enfoque permite crear modelos complejos y personalizados de manera eficiente. Gonzales (2018) describe el diseño o modelado como la representación o idealización de objetos, ya sean reales o imaginarios. Por otro lado, la parametrización implica definir un sistema basado en ciertos parámetros. Por lo tanto, el modelado paramétrico se entiende como la representación de una idea utilizando estos parámetros como base. El diseño paramétrico no es más que definir un grupo de parámetros que controlan las propiedades y la forma de un objeto. Estos parámetros pueden ser valores numéricos, fórmulas matemáticas o relaciones geométricas, que se utilizan para generar y modificar el modelo de manera dinámica. Según Woodbury (2010), "el diseño paramétrico es una forma de pensar y trabajar que permite al diseñador explorar y generar múltiples soluciones a partir de un conjunto de reglas o parámetros".



Ilustración 1. Diseño paramétrico de Jockey Club Innovation Tower (Hong Kong). Diseño: Zaha Hadid Architects

La modelación paramétrica se ha convertido en una nueva forma de crear estructuras con un aspecto futurista y de geometrías poco convencionales, esta nueva forma de modelar las estructuras tiene una gran capacidad de adaptarse con facilidad y rapidez a los cambios, ya que al modificar un parámetro todo el modelo se actualiza al instante lo que ahorra tiempo a diferencia de un modelo tradicional donde se debe empezar desde cero con la geometría.

Al permitir la generación de múltiples iteraciones de un diseño, el enfoque paramétrico fomenta la creatividad y la exploración de nuevas formas y estructuras. Como menciona Jabi (2013), "el diseño paramétrico abre nuevas posibilidades para la innovación y la experimentación en el diseño". Así mismo permite realizar optimizaciones evaluando múltiples variables y escenarios. Simulando diferentes condiciones y ajustes según lo requerido por el diseñador.

diseño paramétrico

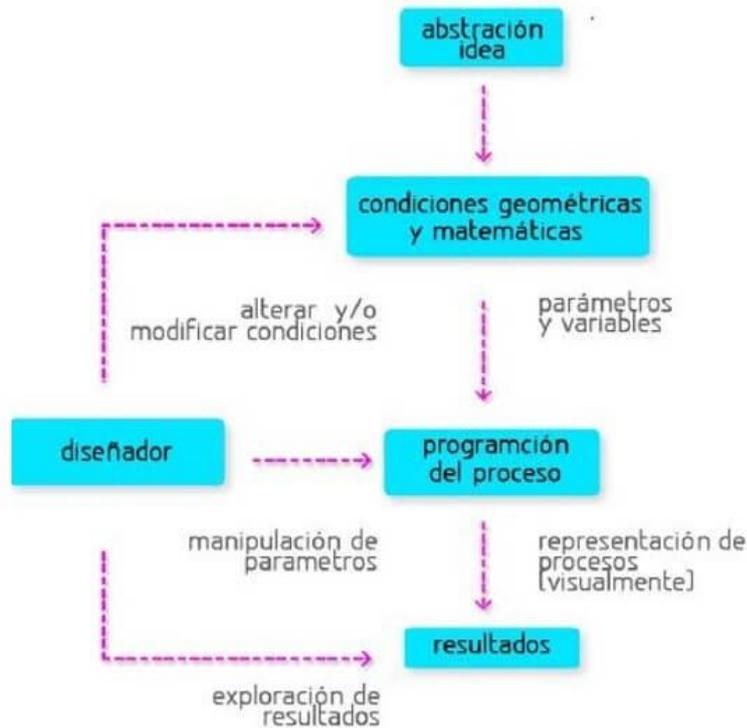


Ilustración 2 Diseño Paramétrico

Fuente: (ARCUX, 2020)

2.4 Análisis Estructural

“El análisis estructural es esencial en todo proyecto de ingeniería estructural, iniciando con la predicción de cómo se comportará la estructura” (Aslam, 2015). Se determinará como el cálculo de deformaciones, fuerzas internas y desplazamientos en estructuras sometidas a diversas cargas, incluyendo cargas estáticas, dinámicas, térmicas, y sísmicas. Este análisis permite conocer el comportamiento de una estructura sometida a condiciones específicas de carga, asegurando su seguridad y eficiencia. Según Hibbeler (2012), "el análisis estructural es fundamental para diseñar estructuras que capaces de resistir cargas y deformaciones sin fallar". En obras civiles se pueden usar una gran variedad de métodos de análisis estructural, para esta investigación se usa un complemento conocido como KARAMBA 3D el cual aplica el análisis mediante elementos finitos para realizar los cálculos estructurales en el modelo.

2.4.1 Análisis de elementos finitos

El análisis de Elementos Finitos (FEA) es un método numérico que permite descomponer una estructura compleja en una serie de elementos más simples, facilitando su análisis y resolución. Este enfoque considera la estructura como un conjunto de elementos finitos interconectados en nodos, formando una malla que representa el dominio continuo del problema. El proceso de dividir en elementos más pequeños se denomina discretización, y es fundamental para la precisión del análisis, ya que un mayor número de elementos y nodos suele conducir a resultados más precisos (Logan, 2016).

El MEF es ampliamente utilizado en la ingeniería para analizar desplazamientos, deformaciones y esfuerzos en estructuras sometidas a diversas cargas. Cada elemento finito se comporta de acuerdo con ciertas funciones de forma que aproximan la solución en su interior, mientras que las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del sistema completo se ensamblan en un sistema de ecuaciones algebraicas (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Este sistema de ecuaciones, que es generalmente de gran tamaño y complejidad, se resuelve utilizando métodos numéricos para obtener las variables de interés, como los desplazamientos y esfuerzos en cada nodo.

El proceso de discretización no solo implica la selección adecuada de elementos y nodos, sino también la configuración de las condiciones de contorno y la aplicación de las cargas pertinentes. Según Cook et al. (2002), "la precisión y la eficiencia del análisis mediante el FEA (Análisis de elementos finitos) dependen de la calidad de la malla que tenga y de la correcta implementación de las condiciones de contorno". Un mayor refinamiento de la malla, es decir, un mayor número de elementos y nodos, generalmente mejora la precisión del análisis.

Una de las grandes ventajas de este método es su habilidad para gestionar geometrías complejas y condiciones de contorno complicadas, lo que lo hace esencial para el análisis estructural avanzado. Por ejemplo, en el diseño y análisis de puentes, permite modelar con precisión la distribución de esfuerzos y deformaciones en diferentes partes de la estructura bajo diversas cargas, garantizando un diseño seguro y eficiente.

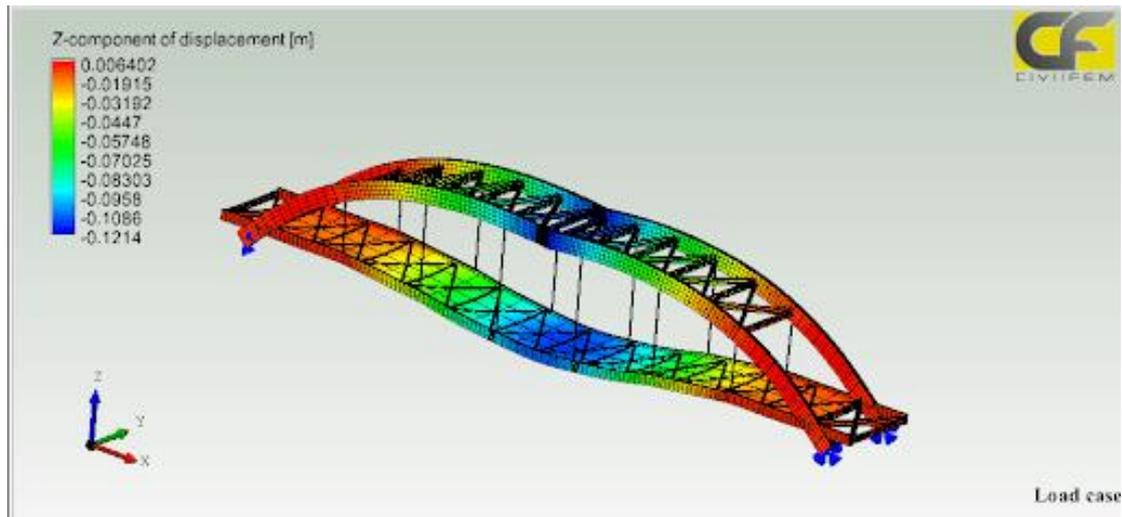


Ilustración 3 Simulación de un puente aplicando elementos finitos

2.4.1.1 Esfuerzo

El esfuerzo en el análisis estructural se refiere a las fuerzas internas que actúan en un material cuando es sometido a una carga externa. Este aspecto es fundamental para evaluar la resistencia y la estabilidad de una estructura. Hay diversos tipos de esfuerzos, como el normal, el cortante y el de flexión, que deben considerarse según la naturaleza de las cargas aplicadas. Según Hibbeler (2012), el esfuerzo se refiere a la magnitud de las fuerzas internas dentro de una estructura, y su cálculo es crucial para garantizar que la estructura pueda resistir las cargas aplicadas sin fallar.

El esfuerzo (σ) no es más que la fuerza (F) aplicada sobre un área (A) específica de un material. La fórmula conocida para calcular el esfuerzo normal es:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ecuación 1. Fórmula básica de Esfuerzo

Donde:

- σ es el esfuerzo normal o tensión,
- F es la fuerza aplicada,
- A es el área sobre la que se aplica la fuerza, en metros.

El análisis de los esfuerzos normales, también conocidos como esfuerzos uniaxiales, se clasifica como un tipo de esfuerzo estático y permite prever cómo se comporta la relación entre una carga aplicada perpendicularmente a una superficie y el área de la sección transversal sobre la que actúa (Solaguren-Beascoa, 2016). Esta relación es fundamental en el análisis estructural, ya que permite determinar si un material podrá resistir las cargas sin fallar. En el contexto del Método de Elementos Finitos (MEF), se calcula el esfuerzo en cada elemento de la malla para identificar las regiones de mayor tensión dentro de la estructura, permitiendo conocer los puntos de fallo que se pueden dar sobre determinada área.

2.4.1.2 Deformación

La deformación en una estructura se considera como el cambio de forma o tamaño a causa de la acción que genera las cargas sobre estas. En términos simples, se refiere a la respuesta física de la estructura a las fuerzas aplicadas. Las deformaciones pueden ser elásticas, donde la estructura regresa a su forma original cuando se retira la carga, o plásticas, donde la estructura experimenta deformaciones permanentes. Como explica Megson (2019), "las deformaciones en una estructura son indicativas de la resistencia y rigidez del material, y son clave para el diseño seguro de estructuras". En el método de elementos finitos, este fenómeno se evalúa en cada nodo de la malla, lo que permite observar cómo se deformará la

estructura bajo diversas condiciones de carga. Este análisis es fundamental para asegurar que las deformaciones se mantengan dentro de los límites aceptables, evitando fallos estructurales.

Para determinar la deformación se calcula como la relación entre el cambio en longitud (ΔL) y la longitud original (L_0) del material:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0}$$

Ecuación 2. Deformación unitaria

2.4.1.3 Deflexión

La deflexión se refiere al desplazamiento de un punto en una estructura desde su posición original debido a la aplicación de cargas. Este concepto es muy diferente al de a deformación ya que como se explicó anteriormente la deformación es como cambia internamente el material bajo la acción de las cargas. La deflexión se considera una medida crítica en el diseño de estructuras, ya que una deflexión excesiva puede comprometer tanto la seguridad como la funcionalidad de la estructura. En términos de puentes, la deflexión máxima permitida es un parámetro clave, generalmente definido por normativas de diseño. Según Gere & Timoshenko (2004), "la deflexión es un factor crucial en el diseño de puentes, ya que debe mantenerse dentro de límites estrictos para garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios".

Para determinar la deflexión máxima de las estructuras se debe tomar en cuenta el tipo y la longitud del vano que esta tenga, en el diseño de puentes, la deflexión máxima permitida según la norma de la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO) especifica que para puentes no debe exceder la longitud del vano sobre un valor de 800 para cargas de servicio. Esta restricción es crucial para garantizar tanto la seguridad

estructural como la comodidad de los usuarios, evitando excesivas deformaciones que puedan afectar la funcionalidad del puente.

$$\frac{L}{800}$$

Ecuación 3 Deflexión máxima permitida según norma AASTHO

2.4.2 Matriz de rigidez

La matriz de rigidez es una herramienta fundamental en el método de elementos finitos debido a su capacidad para describir cómo un sistema estructural responde a las cargas aplicadas. Esta matriz relaciona directamente las fuerzas nodales aplicadas a un elemento con los desplazamientos resultantes, permitiendo un análisis preciso de la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura. Reddy (2019) señala que "la matriz de rigidez es una representación matemática clave que permite descomponer un problema estructural complejo en elementos manejables, proporcionando una solución numérica eficiente y precisa en el análisis de estructuras bajo diversas condiciones de carga".

Además, la importancia de la matriz de rigidez radica en su capacidad para resolver problemas complejos en estructuras grandes o irregulares, donde los cálculos manuales serían impracticables. Tal como señalan Zienkiewicz y Taylor (2005), "el uso de computadoras para resolver las matrices de rigidez permite realizar simulaciones rápidas y precisas del comportamiento estructural, lo que hace que el MEF sea una herramienta indispensable en la ingeniería moderna".

Por otro lado, Cook et al. (2002) destacan que "la matriz de rigidez no solo facilita el análisis estructural, sino que también es clave para encontrar una solución de equilibrio en sistemas complejos, lo que es particularmente importante en el diseño y análisis de edificaciones de acero y concreto". Este enfoque permite que los ingenieros obtengan

soluciones rápidas y precisas, optimizando el diseño estructural y garantizando la seguridad y eficiencia de las construcciones.

2.4.3 Acero Estructural

El acero estructural es una de las aleaciones más empleadas en la construcción, gracias a sus propiedades sobresalientes, que lo convierten en una opción ideal para soportar grandes cargas y resistir fuerzas externas. Compuesto predominantemente por hierro, con un contenido superior al 98%, el acero está conformado de cantidades pequeñas de otros elementos como silicio, manganeso, fósforo, carbono y azufre, los cuales influyen en sus características mecánicas y físicas (McCormac, 2012).

Para comprender las propiedades mecánicas del acero estructural este se somete a una prueba de esfuerzo/deformación, esta prueba nos ayuda a medir la resistencia, ductilidad y resistencia. Esta prueba nos entrega un diagrama el cual, mediante ensayos de tracción, donde una probeta de acero se somete a una carga axial hasta su punto de fractura. A través de este proceso, se puede observar cómo el acero responde a las fuerzas aplicadas, permitiendo la identificación de puntos críticos como el límite elástico, la resistencia máxima y la ductilidad del material (Duggal, 2014). Este tipo de análisis es esencial para asegurar que el acero utilizado en la construcción cumpla con los estándares requeridos para soportar las cargas y condiciones a las que estará sometido.

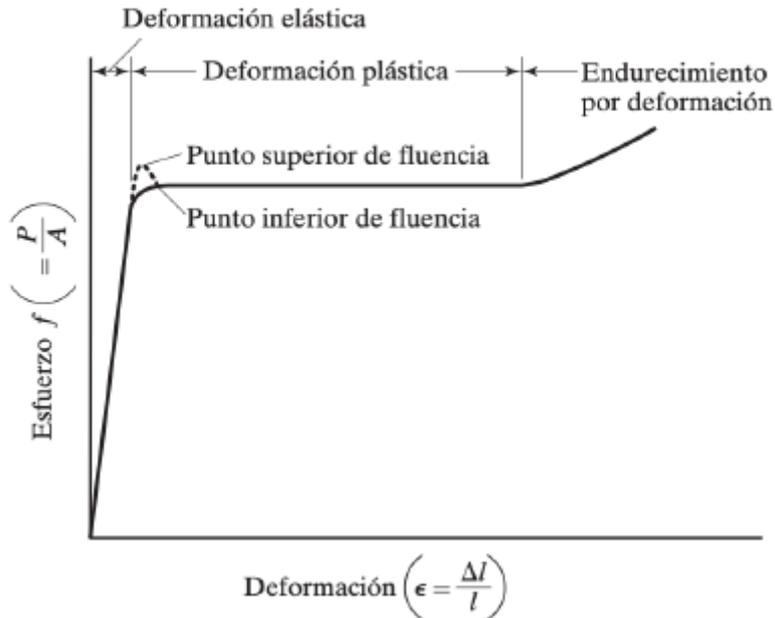


Ilustración 4. Gráfica de esfuerzo-deformación

Fuente: (McCormac J., 2012)

2.4.3.1 Diagrama Esfuerzo-Deformación

El diagrama de esfuerzo-deformación es esencial para entender cómo se comporta el acero estructural bajo distintas cargas. Este gráfico ilustra la relación entre el esfuerzo (la fuerza aplicada por unidad de área) y la deformación (el cambio en la longitud en relación con la original) que experimenta un material al ser sometido a una carga axial. Dado que el acero estructural posee propiedades como alta resistencia y ductilidad, exhibe un comportamiento característico en este tipo de análisis.

Inicialmente, el diagrama muestra una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, lo que indica que el material se encuentra en su fase elástica. En esta región, las deformaciones son reversibles; es decir, al retirar la carga, el acero vuelve a su forma original. Esta fase es crucial porque permite que las estructuras soporten cargas sin sufrir daños permanentes. Según Gere y Goodno (2012), "en la región elástica, la relación esfuerzo-deformación se mantiene constante hasta que se alcanza el límite elástico". Es en esta región

donde se aplica la ley de Hooke, que establece que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación, según la fórmula

$$\sigma = E * \varepsilon,$$

Ecuación 4. Fórmula para encontrar el esfuerzo axial en el material

Esta relación lineal se mantiene hasta que el material alcanza su límite elástico, momento en el cual la curva del diagrama comienza a desviarse, señalando el inicio de la fase plástica.

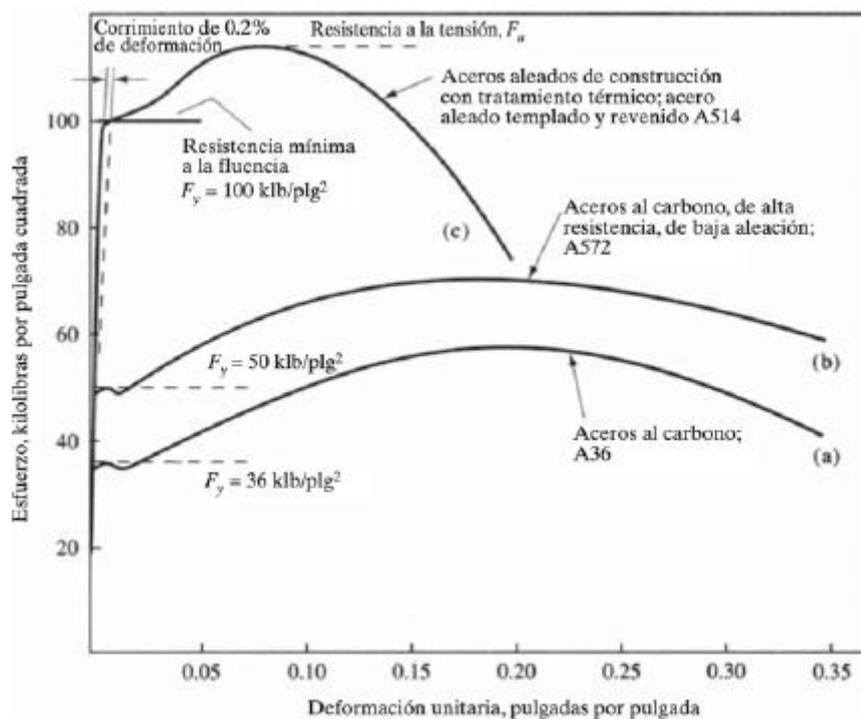


Ilustración 5. Diagrama esfuerzo-deformación para acero A36, A572 Y A514

Fuente: (McCormac J., 2012)

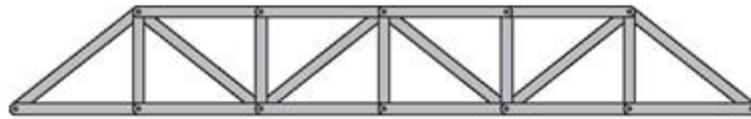
Al superar el límite elástico, el acero entra en la región plástica, donde las deformaciones ya no son reversibles. Aquí, cualquier carga adicional provoca deformaciones permanentes en el material, lo cual es vital para los diseñadores de estructuras, ya que permite

prever el comportamiento del acero antes de que falle catastróficamente. Este comportamiento plástico es lo que le otorga al acero su gran capacidad para absorber energía, una característica fundamental en situaciones como terremotos, donde las estructuras deben soportar deformaciones significativas sin colapsar (McCormac & Brown, 2015).

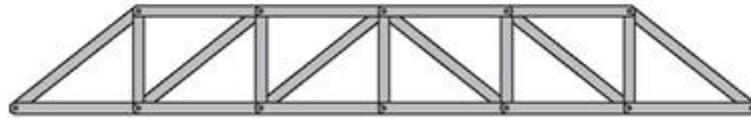
Finalmente, el diagrama alcanza un punto máximo conocido como el límite de resistencia máxima, después del cual cualquier aumento en la deformación lleva a la fractura del material. Este punto es crucial para entender la capacidad última del acero estructural en condiciones extremas. Como lo mencionan Callister y Rethwisch (2020), "el análisis del diagrama de esfuerzo-deformación permite determinar las propiedades mecánicas críticas del acero, como su resistencia a la tracción, su ductilidad y su módulo de elasticidad".

2.4.4 Estructuras reticuladas y articuladas

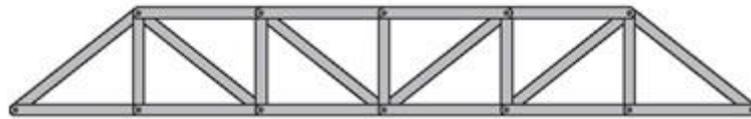
El diseño de puentes simplemente apoyados se beneficia de la combinación de estructuras articuladas y reticuladas debido a las características complementarias que ofrecen ambos tipos de estructuras. Las estructuras articuladas, con su capacidad para permitir rotaciones en las uniones, son esenciales en situaciones donde es necesario acomodar desplazamientos debido a variaciones térmicas o asentamientos del terreno. Estas estructuras ofrecen una mayor flexibilidad en la adaptación a diferentes condiciones de carga sin generar esfuerzos adicionales en los elementos estructurales (García, 2013).



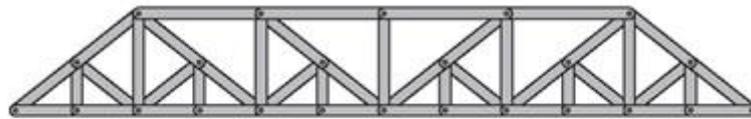
(a) Warren Truss



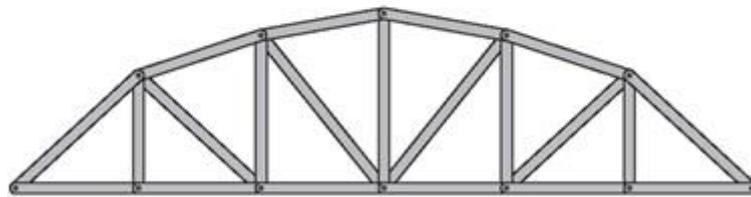
(b) Howe Truss



(c) Pratt Truss



(d) Baltimore Truss



(e) Parker Truss

Ilustración 6. Tipos de geometría para cerchas (Estructuras articuladas)

Fuente: (McCormac J., 2010)

Por su parte, las estructuras reticuladas, que se componen de una red de elementos dispuestos en forma triangular, distribuyen de manera eficiente las cargas aplicadas, minimizando la deformación y maximizando la rigidez global del sistema. Esta característica resulta crucial en el diseño de puentes, ya que la capacidad para soportar cargas axiales y transversales es esencial para garantizar la estabilidad de la estructura (Pérez, 2011). "La combinación de estos sistemas estructurales en los puentes simplemente apoyados permite no

solo una mayor eficiencia en la distribución de cargas, sino también una optimización del proceso constructivo, facilitando el montaje y reduciendo el tiempo de ejecución" (López, 2014).

2.4.4.1 Apoyos

Los apoyos en puentes simplemente apoyados son elementos fundamentales que influyen directamente en el comportamiento estructural de la obra. Estos apoyos, al ser los puntos donde las cargas del puente se transfieren al suelo, deben estar diseñados para soportar tanto las fuerzas verticales como las horizontales, además de acomodar posibles movimientos del puente causados por factores como la dilatación térmica o los asentamientos del terreno.

Hay diferentes tipos de soportes que se emplean frecuentemente en puentes simplemente apoyados. Uno de los más básicos y tradicionales es el apoyo fijo, que resiste movimientos tanto verticales como horizontales en un punto específico, permitiendo que las fuerzas se transfieran directamente al terreno. Este tipo de apoyo es esencial en situaciones donde es necesario restringir el movimiento para garantizar la estabilidad del puente (López & Ramírez, 2010).

Por otro lado, el apoyo móvil o deslizante permite el desplazamiento horizontal del puente, facilitando la adaptación a los cambios de longitud que se producen por variaciones térmicas. Este tipo de apoyo es crucial en puentes largos, donde los cambios de temperatura pueden provocar dilataciones significativas en la estructura. "El uso de apoyos móviles en los extremos de los puentes permite reducir las tensiones internas causadas por los cambios de temperatura, mejorando la durabilidad y la vida útil de la estructura" (Gómez, 2015).

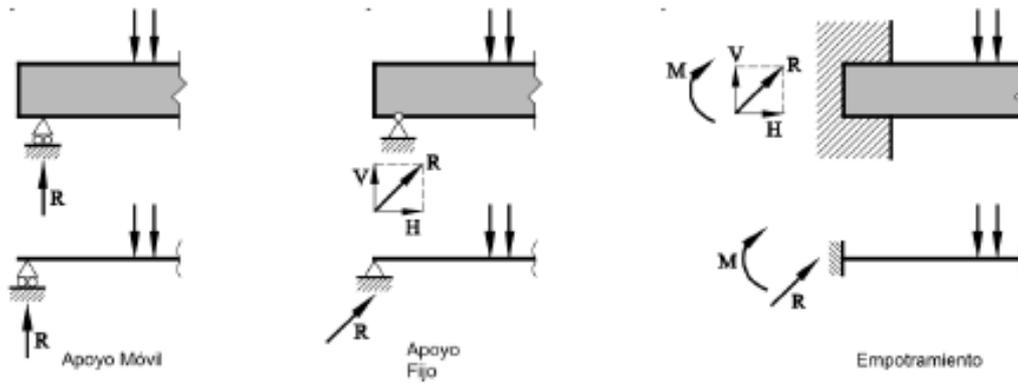


Ilustración 7. Tipos de apoyos

Fuente: (Díaz, Ruiz, & Suárez, 2008)

2.5 Optimización Estructural

La optimización estructural es un método que se basa en la distribución de esfuerzos dentro de una estructura, con el objetivo de encontrar la mejor solución que cumpla con los límites impuestos, como minimizar el peso, el costo o facilitar la construcción (Cerrolaza & Annicchiarico, 1996). Este enfoque es crucial en la ingeniería moderna, donde se busca no solo que la estructura soporte las cargas impuestas, sino que también se ajuste a criterios específicos propuestos por el diseñador. Definir las cargas y restricciones es un paso esencial, ya que éstas servirán como punto de partida para el diseño óptimo del sistema estructural.

La aplicación de técnicas de optimización estructural se ha vuelto cada vez más común gracias al avance de las herramientas computacionales, que permiten analizar múltiples variables y opciones de diseño en un tiempo reducido. "El uso de algoritmos avanzados en la optimización estructural facilita la búsqueda de soluciones óptimas que serían imposibles de encontrar mediante métodos tradicionales" (Bendsoe & Sigmund, 2003). La tecnología moderna permite la simulación de múltiples escenarios, lo que facilita la búsqueda de una solución que no solo sea factible, sino que también sea la más eficiente y económica.

La optimización estructural implica restringir el diseño del sistema para obtener un resultado óptimo. Para lograr esto, es necesario manejar diversos parámetros que definen lo que se desea optimizar, como la resistencia, la rigidez o la estabilidad. Estos parámetros varían dependiendo del elemento a optimizar y del tipo de estructura involucrada.

Matemáticamente, la optimización estructural puede representarse mediante la función objetivo $f(x)$, que es minimizada o maximizada sujeta a una serie de restricciones $g_i(x) \leq 0$ y $h_j(x) = 0$, donde x es un vector de variables de diseño que pueden incluir dimensiones, materiales o fuerzas aplicadas. La formulación general es:

$$\min_x f(x) \quad \text{sujeto a} \quad g_i(x) \leq 0, h_j(x) = 0$$

Ecuación 5. Formula de optimización general

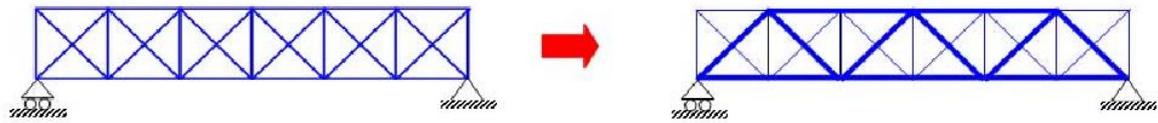
Este modelo permite abordar el problema de optimización bajo diferentes enfoques, dependiendo de los objetivos específicos y las restricciones del proyecto.

En la ingeniería civil, la optimización estructural es fundamental para el desarrollo de infraestructuras más sostenibles. Por ejemplo, al diseñar puentes, es esencial no solo garantizar que la estructura soporte las cargas esperadas, sino también que el diseño sea lo más eficiente posible en términos de material y costo. Como señala Arora (2004), "la optimización estructural busca minimizar el costo de la estructura al tiempo que satisface las restricciones impuestas por el comportamiento mecánico y normativo". En este sentido, la capacidad de las herramientas computacionales para resolver problemas complejos ha revolucionado la manera en que se aborda el diseño estructural, permitiendo a los ingenieros explorar soluciones innovadoras y eficientes.

2.5.1 Tipos de optimización estructural

En el ámbito de la ingeniería estructural, se pueden clasificar las optimizaciones de la obra en cuatro categorías principales, cada una con un énfasis distinto para mejorar el rendimiento de los edificios.

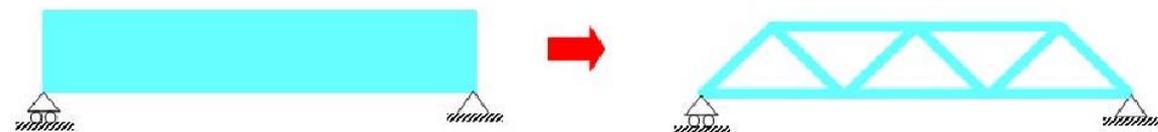
- **Optimización del tamaño:** También conocida como optimización dimensional, esta técnica trata sobre ajustes en las áreas de las secciones transversales del miembro. Este tipo de optimización permite una distribución más eficiente del material y mejora la resistencia estructural que resulta en estructuras más ligeras y menos costosas sin comprometer su integridad (Chong & Zak, 2013).
- **Optimización de la forma:** También llamada optimización configuracional aborda a las coordenadas del nodo como variables diseñables. Al modificar la geometría de una estructura, puede mejorarse su comportamiento bajo carga mediante optimización para maximizar la resistencia y minimizar las tensiones (Bendsoe & Sigmund, 2003).
- **Optimización de la topología:** Esto se enfoca en la disposición y conexión de los nodos o uniones dentro de la estructura. El objetivo es eliminar componentes innecesarios, simplificar la estructura y, en última instancia, lograr un diseño más eficiente y económico. Este tipo de optimización es fundamental en las primeras etapas del diseño estructural para establecer el mejor reparto posible del material (Xiao et al., 2013).
- **Optimización multiobjetivo:** Al mismo tiempo se tienen en cuenta dos o más técnicas anteriores de optimización para obtener un diseño que equilibre diferentes criterios como peso, costo y resistencia. Optimización que involucra tamaño, forma y topología al mismo tiempo también se conoce como optimización de diseño, especialmente útil en problemas complejos con muchas limitaciones en ingeniería civil (Haftka & Gürdal, 1992).



a- **Sizing Optimization**



b- **Shape Optimization**



c- **Topology Optimization**

Ilustración 8. Tipos de optimización

Fuente: (Cuitláhuac, 2011)

2.5.2 Optimización Heurística y Metaheurística

“Etimológicamente la heurística se orienta al estudio del descubrimiento y la invención, (debidos a la reflexión y no al azar)” (De Antonio Suarez, 2011). La optimización heurística utiliza reglas empíricas o intuiciones para dirigir la búsqueda hacia soluciones viables, pero no siempre óptimas. Estas estrategias generalmente son rápidas y sencillas de poner en práctica, lo cual las convierte en herramientas útiles para resolver problemas que necesitan una solución aproximada en un tiempo adecuado. Esta optimización se basa en la clasificación de los métodos heurísticos, que en su mayoría fueron diseñados para problemas concretos donde no se puede generalizar o aplicar en otros que sean similares.

Usando una optimización heurística se puede crear algoritmos simples como la búsqueda aleatoria, el método del gradiente y la búsqueda local. A pesar de que las heurísticas no aseguran encontrar la solución óptima, pueden proporcionar soluciones de gran calidad en distintos problemas prácticos (Haftka & Gürdal, 1992).

Por otro lado “El término metaheurística fue introducido por Fred Glover en 1986 y desde entonces se han presentado muchas propuestas de pautas para diseñar mejores procedimientos de solución a problemas combinatorios” (De Antonio Suarez, 2011).

Los métodos metaheurísticos proporcionan un marco general que facilita el desarrollo de nuevos algoritmos híbridos, combinando conceptos de diferentes disciplinas, como la genética, la biología, la inteligencia artificial, las matemáticas, la física y la neurología, entre otras. Por lo general, ya existe un método heurístico particular para abordar el problema en cuestión. En este sentido, las metaheurísticas pueden considerarse como un enfoque versátil que se adapta a una variedad de problemas de optimización combinatoria con ajustes mínimos. De hecho, las metaheurísticas son ampliamente reconocidas como una de las estrategias más eficaces para tratar problemas de optimización combinatoria. La metaheurística utiliza métodos avanzados de optimización que amplían las técnicas heurísticas para una exploración más eficiente del espacio de soluciones. Frecuentemente, las metaheurísticas se inspiran en fenómenos naturales como la evolución biológica, el comportamiento de colonias de insectos o la física de los sistemas. Algoritmos como, por ejemplo, se encuentran en las metaheurísticas.

- Algoritmos Genéticos (GA)
- Optimización por enjambre de partículas (PSO)
- Algoritmo de recorrido simulado (SA)

2.5.3 Función Objetivo

La función objetivo es esencial en la optimización, ya que es el criterio que se intenta maximizar o minimizar en un problema específico. Esta función se expresa matemáticamente, considerando tanto las variables de diseño como las restricciones impuestas por las condiciones del problema. La optimización se concentra en encontrar el grupo de valores de las variables que llevan al valor óptimo de la función, ya sea reduciendo costos, aumentando la eficiencia estructural o balanceando diversos objetivos (Rao, 2009).

La función objetivo puede tener limitaciones adicionales, restringiendo las opciones de soluciones posibles. Estas limitaciones pueden ser de igual o distinto tipo, y están vinculadas con aspectos físicos, económicos o de diseño del sistema en particular (Deb, 2001). Así que, el planteamiento adecuado de la función objetivo y de las restricciones asociadas es crucial para lograr éxito en una optimización.

Se debe considerar que la dificultad que tenga cada diseño para ser optimizado depende de cuantas variables tengan, por tal motivo existen tipos de función objetivo dependiendo del planteo matemático, sus variables y la eficiencia. Los principales tipos de funciones objetivo según (Landeta, 2021) son:

- Lineal y No Lineal.
- Unimodal y Multimodal.
- Estática y Dinámica.
- Un objetivo y Multi objetivo.

En sí, la función objetivo sirve como un punto de referencia para la toma de decisiones en la optimización, definiendo un criterio claro y medible que debe ser alcanzado, lo cual es vital para lograr resultados óptimos en un contexto de estructura o diseño (Bertsekas, 2016).

2.5.4 Algoritmos evolutivos genéticos

Los algoritmos evolutivos genéticos se basan en la selección natural y la genética para optimizar los procesos. Estos algoritmos emplean una estrategia basada en la evolución biológica para abordar desafíos de optimización de difícil resolución. Los algoritmos genéticos imitan la evolución al representar posibles soluciones como individuos en una población, que mejoran sus adaptaciones a lo largo de varias generaciones para adaptarse a un entorno específico.

En un procedimiento genético común, se parte de un grupo inicial de posibles soluciones que son evaluadas a través de una función de idoneidad. Después, se utilizan operadores genéticos como la selección, cruce (crossover) y mutación para producir una siguiente generación de soluciones. La selección beneficia a los individuos mejor adaptados, incrementando su capacidad de contribución a la descendencia. La reproducción combina características de dos seres para generar descendencia, mientras que la mutación acarrea cambios al azar para descubrir nuevas posibilidades dentro del espectro de soluciones (Mitchell, 1998).

Los algoritmos genéticos son muy útiles en situaciones con un amplio y complicado espacio de posibles soluciones, donde los métodos de optimización tradicionales no son efectivos. Se utilizan en diferentes áreas como la ingeniería, economía y ciencias computacionales para mejorar estructuras, procesos y sistemas con variables interconectadas (Goldberg, 1989).

También, los algoritmos genéticos se destacan por su habilidad para encontrar soluciones aproximadas en situaciones donde no se conoce un método exacto, o donde la complejidad de las exactas es muy elevada. Los algoritmos genéticos son robustos para

diversas aplicaciones debido a su capacidad de explorar múltiples soluciones al mismo tiempo, lo que evita quedar atrapados en óptimos locales (Holland, 1992).

2.5.5 Aplicaciones actuales de optimización

El uso de algoritmos y técnicas paramétricas ha revolucionado la arquitectura y la ingeniería estructural a través de la optimización de la estructura. A continuación, se muestran ejemplos de la aplicación de cómo se han utilizado estos enfoques para crear estructuras innovadoras y eficaces.

El Viaducto de Millau en Francia, creado por el ingeniero Michel Virlogeux y el arquitecto Norman Foster, es un perfecto ejemplo de cómo se aplica la optimización estructural en arquitectura. En este proyecto, se aplicarán técnicas avanzadas para planificar los cables y las torres del puente, mejorando la distribución de las cargas y reduciendo el peso de la estructura sin poner en riesgo la seguridad. La inclusión de algoritmos resultó en una mejora de la eficiencia material y la estabilidad del puente.



Ilustración 9. Viaducto de Millau

Fuente: (Viprocosa, 2018)

El diseño del Pabellón de la Serpiente en Londres, realizado por Zaha Hadid Architects, también muestra el empleo de algoritmos generativos y optimización paramétrica. La disposición funcional y flexible del pabellón fue creada a través de la utilización de

programas como Grasshopper y Rhino, los cuales posibilitaron la evaluación estructural y mejora del diseño, resultando en una forma arquitectónica única con una eficacia estructural mejorada.



Ilustración 10. Serpentine Pavilion 2000

Fuente: (Admagazine, 2020)

El diseño de la Biblioteca Central de Seattle, obra de Rem Koolhaas, ejemplifica la incorporación de optimización estructural en edificios complejos. Se emplearon algoritmos en el diseño de la estructura y las fachadas del edificio para mejorar la eficiencia estructural, optimizar materiales y abordar desafíos funcionales y estéticos, destacando el poder de las herramientas computacionales.



Ilustración 11. Biblioteca Central de Seattle

Fuente: (Expocihac media, 2023)

El Centro de Investigación y Desarrollo de BMW en Múnich, creado por el arquitecto Patrick Schumacher y rediseñado por Zaha Hadid Architects, emplea algoritmos de optimización para desarrollar una estructura innovadora y eficaz. Los métodos paramétricos han contribuido a mejorar la distribución de cargas y optimizar el rendimiento estructural, resaltando la habilidad de los algoritmos para enfrentar retos complicados en el diseño arquitectónico.



Ilustración 12. Centro de Investigación y Desarrollo de BMW en Múnich

Fuente: (Wiki Arquitectura, 2009)

Estos ejemplos muestran cómo la integración de optimización estructural y algoritmos ha ayudado a arquitectos e ingenieros a superar restricciones antiguas y crear estructuras innovadoras en cuanto a su estética y eficiencia funcional.

2.6 Herramientas de diseño paramétrico

Esta investigación utiliza el programa de modelación 3d Rhinoceros junto con su complemento Grasshopper para realizar el diseño paramétrico de un puente simplemente apoyado.

2.6.1 RHINOCEROS 3D

En el ámbito del diseño y modelado 3D, Rhinoceros 3D se destaca como una herramienta fundamental debido a su versatilidad y precisión.

Según Robert McNeel & Associates (2019), “Rhino 3D es un software de modelado 3D utilizado para crear, editar, analizar, documentar, renderizar, animar y traducir curvas, superficies y sólidos NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines).”

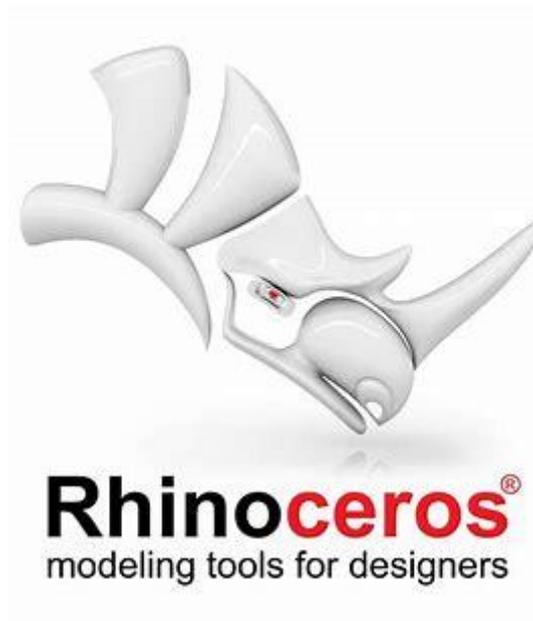


Ilustración 13. Logo programa de Rhinoceros 3D

Fuente: (McNeel & Associates, 2019)

Las NURBS son representaciones matemáticas que permiten representar geometría 3D de manera precisa, abarcando desde formas simples como líneas, círculos y arcos en 2D hasta superficies complejas y sólidos tridimensionales (McNeel & Associates, 2024). Gracias a su versatilidad y exactitud, estos modelos pueden ser aplicados en diversos procesos, tales como la ilustración, la animación y la fabricación.

Aunque Rhino 3D en primera instancia fue concebido como una herramienta de apoyo para AutoCad (Marchante, 2023), Rhino 3D ha evolucionado hasta convertirse en un programa independiente cuya popularidad y eficacia se deben a su escasa complejidad y el tamaño de los dibujos que puede manejar.

Es compatible con los softwares comerciales y su interfaz permite integrar herramientas CAM (Computing Aided Manufacturing) y CAE (Computing Aided Engineering). (Mendoza, 2022). Rhinoceros 3D ofrece un conjunto amplio de herramientas avanzadas para modelado en 3D, facilitando a los diseñadores la creación de formas variadas con alta precisión y detalle. Esto puede ser posible tomando en cuenta un dibujo, bocetos o a partir de un escaneo 3D.

Los complementos para Rhinoceros 3D se pueden escribir en los lenguajes de programación C# y C++ (Belcher, 2021). Estos complementos interactúan con el software mediante su kit de desarrollo de software (SDK), el cual proporciona acceso a gran parte de los datos y funcionalidades de Rhinoceros, lo cual permite a los desarrolladores ampliar y mejorar las herramientas disponibles.

Además, el software admite la creación de scripts a través de RhinoScript, un lenguaje específico basado en VBScript (Fugier 2018), así como Python (Belcher, 2021), lo que facilita la automatización de tareas no soportadas de forma nativa por Rhinoceros 3D.

2.6.2 GRASSHOPPER

Grasshopper, es un plug-in desarrollado en 2007 por David Rutten que utiliza como plataforma de visualización gráfica la aplicación de modelado Rhinoceros, ambas desarrolladas por McNeel & Associated (Mcneel & Associated, 2022).



Ilustración 14. Logo complemento Grasshopper

Fuente: (McNeel & Associates, 2019)

Según el libro *Architectural Geometry* de Helmut Pottmann, Grasshopper ha revolucionado el enfoque del diseño al permitir iteraciones rápidas y el desarrollo de formas complejas mediante la parametrización de elementos geométricos básicos (Pottmann et al., 2015).

Grasshopper se basa en un conjunto de componentes interactivos, cada uno con reglas y parámetros específicos que se pueden ajustar para controlar diversas partes del modelo. Schumacher (2011) destaca que "la gran ventaja de Grasshopper es que traduce gran parte de la sintaxis de los scripts a un lenguaje gráfico de relaciones para cada uno de los componentes que la conforman" (p. 354).

Esta capacidad de traducir código a un formato visual facilita la interacción directa con el modelo y permite realizar cambios en tiempo real, lo que ha llevado a una creciente adopción de Grasshopper, especialmente en América Latina. (Herrera, 2010, 341).

Grasshopper trabaja tanto con el software de modelado BIM "Revit" como con "Archicad", pero opera únicamente desde los plugins específicos "Rhino-inside-Revit" y "Grasshopper-Archicad Live Connection".

Grasshopper es ideal para proyectos que implican geometrías complejas y una gran cantidad de nodos y datos, debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de información sin comprometer el rendimiento. Su arquitectura permite procesar y gestionar extensos conjuntos de datos de manera eficiente. Además, Grasshopper ofrece una amplia variedad de complementos para modelado y análisis, lo que amplía sus posibilidades y facilita la integración con diversas herramientas especializadas, optimizando así el flujo de trabajo y la precisión en el diseño.

2.6.2.1 Interfaz

1. Dialogo Principal

Para acceder al complemento de Grasshopper dentro de Rhino3D, es necesario escribir "Grasshopper" en la barra de comandos de Rhino3D o a su vez se puede ingresar en la barra de herramientas y escoger el logo de "Grasshopper". Al hacerlo, la interfaz de Grasshopper se abrirá automáticamente, proporcionando acceso a todas sus funciones y herramientas.



Ilustración 15. Barra de herramientas Rhinoceros 3D

Fuente: Captura de pantalla del programa

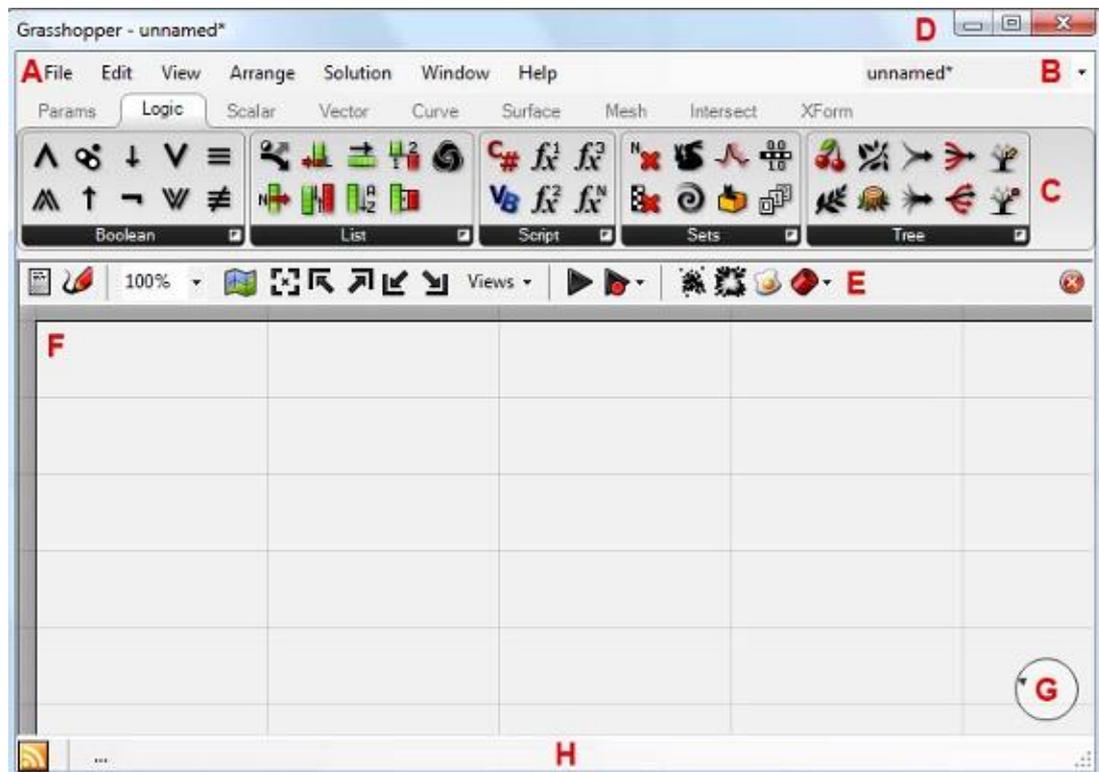


Ilustración 16. Interfaz Grasshopper

Fuente: (Payne & Issa, 2009)

- A. Barra de menú principal
- B. Control de explorador de archivo
- C. Componentes

F. Lienzo

G. Dispositivos e interfaz de usuario

H. Barra de Estado

Fuente: (Payne & Issa, 2009)

- Componentes

En los paneles de componentes se encuentran organizados los distintos elementos categorizados, como los parámetros. Este panel permite acceder a todos los objetos disponibles en Grasshopper. Para añadir cualquier componente al lienzo de trabajo, simplemente se debe arrastrar desde el panel hasta la zona de trabajo.

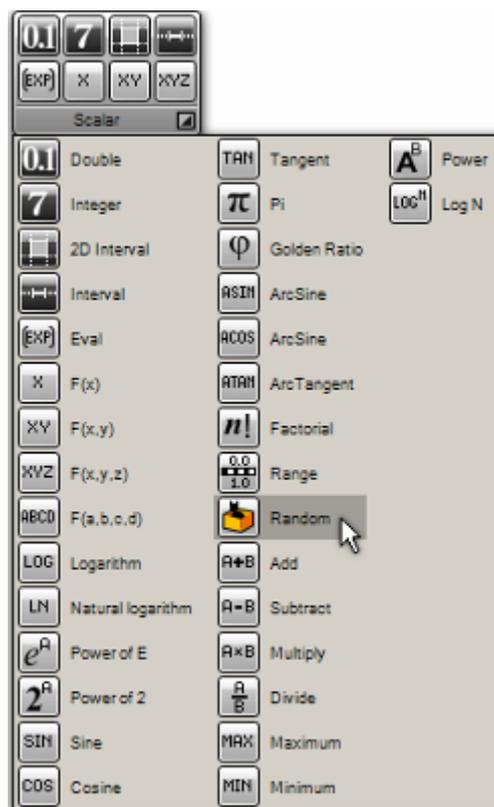


Ilustración 17. Componentes de Grasshopper

Fuente: (Payne & Issa, 2009)

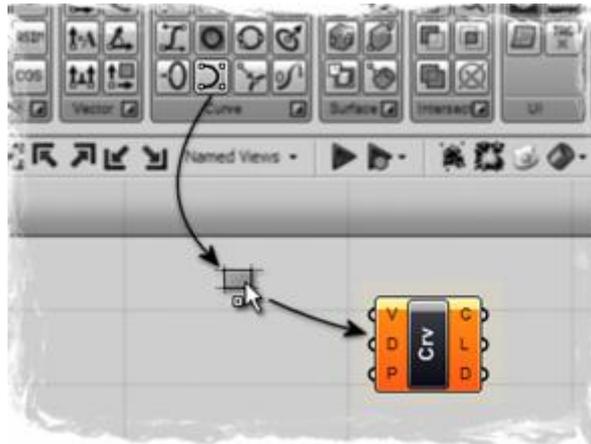


Ilustración 18. Ejemplo de cómo ingresar complementos al área de trabajo

Fuente: (Payne & Issa, 2009)

Existe otra forma de agregar los componentes en el lienzo de Grasshopper, se tiene que dar doble clic derecho sobre el lienzo donde aparecerá una barra de búsqueda en la que se ingresa el nombre del comando que se desea utilizar y este aparecerá en el lienzo sin tener que arrastrarlo.

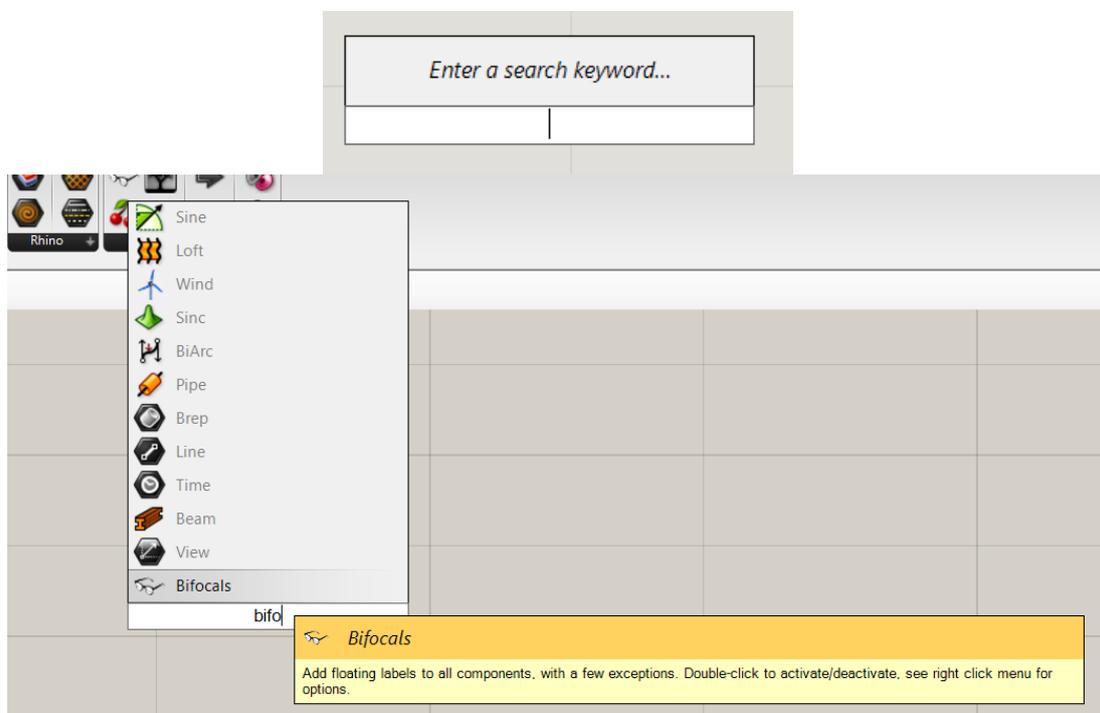


Ilustración 19. Como añadir complementos al lienzo

Fuente: Captura de pantalla del programa

- Lienzo

El lienzo es una parte crucial del entorno de Grasshopper, ya que es donde se definen y editan las redes de historia del proyecto. En este espacio se disponen todos los objetos que componen la definición, junto con algunos dispositivos de interfaz de usuario. Los componentes y parámetros en el lienzo están coloreados de acuerdo a su estado:

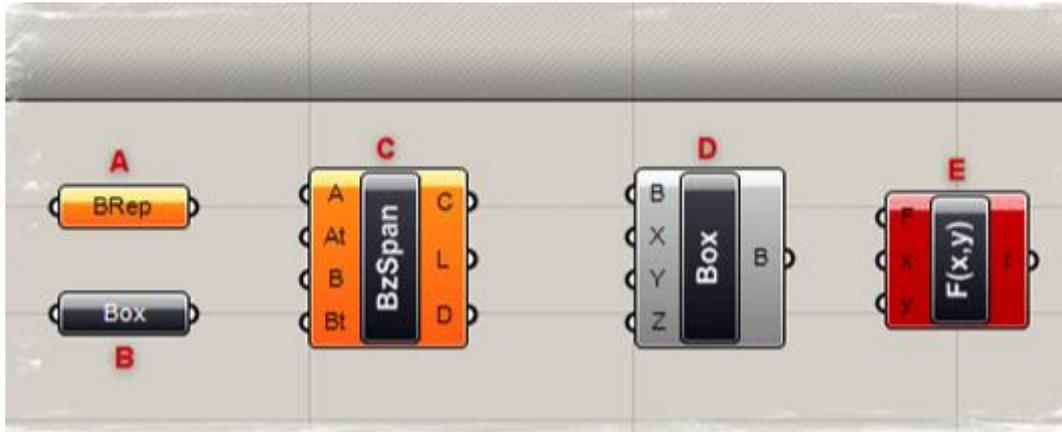


Ilustración 20. Boxes y su respectivo color informativo

Fuente: (Payne & Issa, 2009)

- Parámetro en color naranja: Indica que el parámetro tiene advertencias. Por lo general, cuando un parámetro se añade al lienzo, aparece en color naranja debido a la falta de datos, lo cual se considera una advertencia.
- Parámetro en color negro: Significa que el parámetro está libre de errores.
- Box en color naranja: Este color señala que hay advertencias, las cuales se pueden identificar a través del menú contextual del componente.
- Box en color gris: Indica que el componente no tiene errores.
- Box en color rojo: Un componente rojo sugiere la presencia de uno o varios errores, que pueden ser causados por el propio componente o por los parámetros conectados a él.

Fuente: (Payne & Issa, 2009)

2.6.2.2 Funcionamiento

Grasshopper no funciona como una aplicación independiente, sino que se ejecuta dentro de Rhino3D. Al introducir el comando "Grasshopper" en Rhino, se abre una nueva ventana que contiene una variedad de comandos y objetos diseñados para modificar y asignar propiedades a parámetros y componentes (Rutten, 2020).

En Grasshopper, los parámetros actúan como contenedores de datos, almacenando la información necesaria para el proceso de diseño. Por otro lado, los componentes representan las acciones o funciones que se ejecutan dentro del modelo. Estos elementos, organizados como nodos, se pueden acceder a través de las pestañas o mediante el lienzo de trabajo.

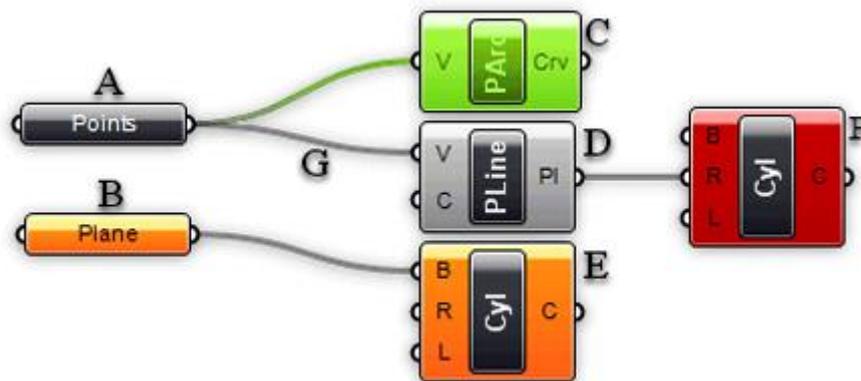


Ilustración 21. Área trabajo Grasshopper

Fuente: (Payne & Issa, 2009)

- A. Parámetro con datos: Se muestra en color negro si no presenta errores.
- B. Parámetro sin datos: Se identifica con un color rojo tomate, indicando que aún no contiene información.
- C. Componente o parámetro seleccionado: Se torna de color verde al ser seleccionado.
- D. Componente en color gris: Indica que no tiene errores ni advertencias.
- E. Componente en color rojo tomate: Señala que existen advertencias.
- F. Componente en color rojo: Indica la presencia de errores en el modelo.

G. Cables tipo Spaghetti: Permiten unir componentes y parámetros se conectan entre sí a través de cables.

Fuente: (Payne & Issa, 2009)

Este sistema de parámetros y componentes, junto con la visualización de posibles errores, asegura que los diseños sean precisos y que cualquier problema sea identificado y corregido rápidamente durante el desarrollo del modelo.

2.6.2.3 Partes del componente



Ilustración 22. Partes del componente

Fuente (Payne & Issa, 2009)

A. Parámetros de entrada: Estos son los puntos donde se conectan los datos o información que el componente necesita para operar. Cada módulo o componente recibe sus datos a través de estos parámetros de entrada.

B. Nombre del componente: Este es el identificador del componente en el lienzo de trabajo, indicando su función o tipo. El nombre del componente ayuda a identificar rápidamente el propósito de cada módulo dentro de la red de diseño.

C. Parámetros de salida: Estos son los puntos donde el componente envía los resultados de sus operaciones, los cuales pueden ser utilizados por otros componentes en la red.

Al interactuar con un componente, las etiquetas que aparecen brindan información adicional sobre el tipo de comando activado o que está por activarse, así como detalles sobre los parámetros individuales que se están utilizando. Esta funcionalidad es clave para entender

cómo los datos se están procesando dentro del componente y cómo se están generando las geometrías correspondientes.

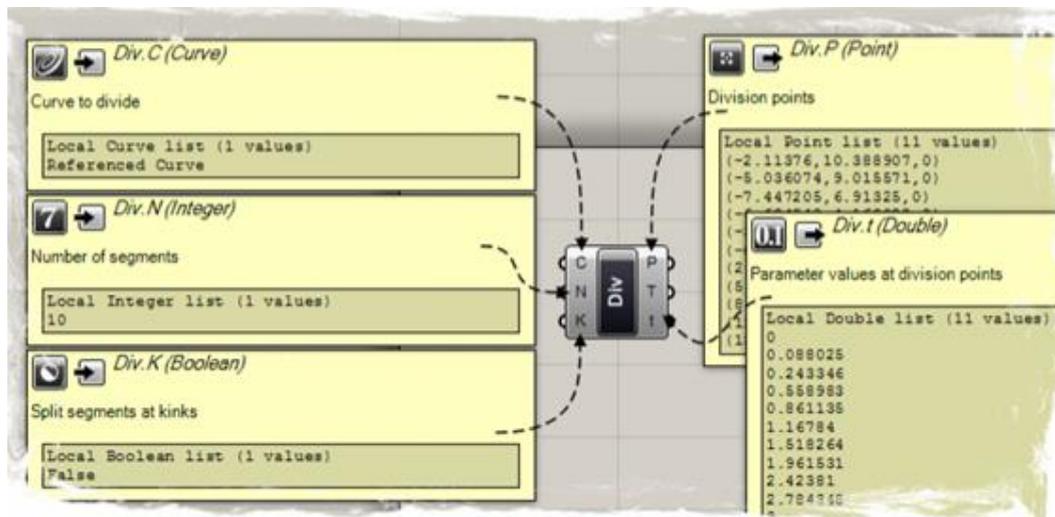


Ilustración 23. Etiquetas informativas de componentes

Fuente: (Payne & Issa, 2009)

2.6.2.4 Ventajas de usar Grasshopper

- **Automatización Mejorada:** El flujo de trabajo en Grasshopper es notablemente distinto al de otros programas de diseño. Gracias a su capacidad de automatización, es posible modelar geometrías complejas de manera más eficiente, reduciendo el tiempo y esfuerzo necesarios para tareas repetitivas.
- **Velocidad y Eficacia:** Grasshopper es considerablemente más rápido que otros programas debido a su automatización. Los cambios en las variables de diseño se pueden implementar de manera rápida y sencilla, lo que permite iterar y ajustar los modelos con mayor agilidad en comparación con otras herramientas.
- **Módulos para Tareas Frecuentes:** Cada módulo funciona como una función que recibe variables de entrada y genera resultados o soluciones como salidas. Esto facilita la reutilización de procesos y la estandarización de tareas comunes en el diseño.

- Código Abierto: Grasshopper es una herramienta de código abierto, lo que significa que los usuarios pueden compartir y modificar el código fuente.

2.7 Herramientas de Análisis Estructural

2.7.1 Karamba 3D

En el presente, el empleo de herramientas paramétricas en la arquitectura y la ingeniería ha facilitado a los diseñadores la exploración de nuevas formas y estructuras de manera más eficiente y precisa. Karamba 3D es una herramienta avanzada que se utiliza en el ámbito del diseño paramétrico para realizar análisis estructurales y simulaciones en Rhinoceros a través de Grasshopper. Preisinger (2013) explicó: “Karamba3D es una herramienta de ingeniería paramétrica interactiva que permite realizar análisis de elementos finitos (FEA) rápidos y precisos. Se ha adaptado especialmente a las necesidades de los profesionales del diseño en las primeras fases de diseño”, este enfoque es especialmente beneficioso en la creación de estructuras de barras, como cerchas, vigas y marcos, donde es posible visualizar de forma dinámica las deformaciones, tensiones y fuerzas internas, lo que ayuda en el proceso de diseño con retroalimentación inmediata.

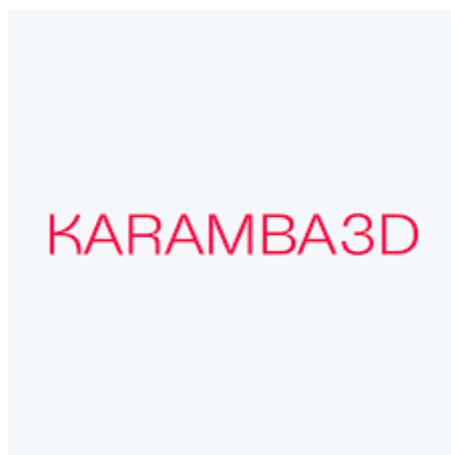


Ilustración 24. Logo de Karamba 3D

Fuente: (Preisinger C, 2024)

El plug in Karamba 3D funciona de tal manera que se puede transformar una geometría compuesta de líneas en un modelo estructura funcional, para esto la herramienta nos brinda ciertos complementos potentes que nos permiten definir las variables de la estructura.

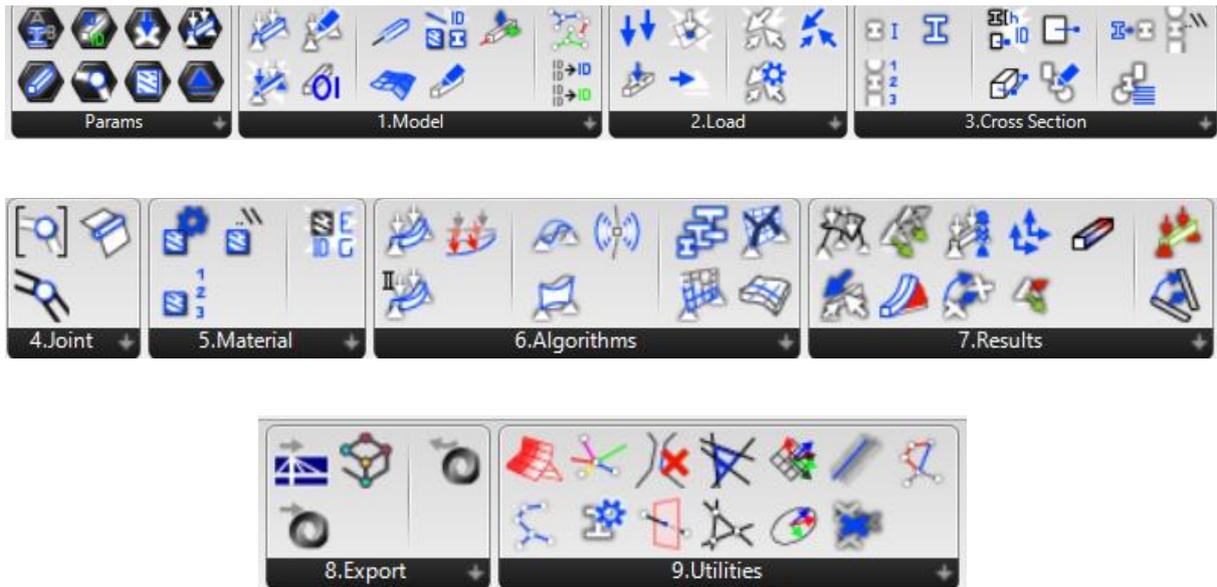


Ilustración 25. Complementos dentro de la herramienta Karamba 3D

Fuente: Captura de pantalla del programa

Cada bloque de complementos cumple una función dentro del modelo estructural. A continuación, se explicará que nos permite realizar cada bloque:

1. **Model:** Permite ensamblar el modelo estructural manteniendo las configuraciones tanto de secciones, materiales, cargas y apoyos.
2. **Load:** Este componente nos ayuda ingresando las cargas sobre los elementos estructurales, se puede ingresar cargas en vigas, membranas y en los nodos.
3. **Cross Section:** Este componente permite seleccionar los perfiles que se van a utilizar en el proyecto, Karamaba 3D cuenta con un amplio catálogo de secciones tanto circulares, rectangulares, tipo I, tipo W, etc.

4. **Support:** Permite colocar las restricciones de apoyos sobre los nodos que actuaran como soporte de la estructura.
5. **Materials:** Este componente nos permite definir el material que se utilizara para el proyecto, cuenta en su catálogo con acero, concreto, madera, etc.
6. **Algorithms:** En este bloque se encuentran todos los componentes para realizar el análisis estructural de la geometría ensamblada.
7. **Results:** Los componentes de este bloque nos permiten observar los resultados del análisis, ya sea en forma de texto o mostrando los diagramas y deformaciones sobre la propia estructura.
8. **Export:** Permite exportar el modelo a otros programas de análisis estructural, lo cual es importante para comparar los resultados haciendo de estos mas confiables.
9. **Utilities:** Contiene funciones geométricas adicionales que facilitan el manejo y la optimización de los modelos.

Karamba 3D también cuenta con un complemento que nos permite realizar una optimización estructural, del componente que estamos hablando es “**Optimize Cross Section**”. Para realizar la optimización este componente tiene en cuenta la capacidad de carga de las secciones transversales (Preisinger 2024), así misma toma en cuenta restricciones que se coloquen según la estructura a analizar, en nuestro mantiene un límite de la flecha máxima de la estructura menor a $\frac{L}{800}$ y la máxima utilidad del radio igual al 80%.

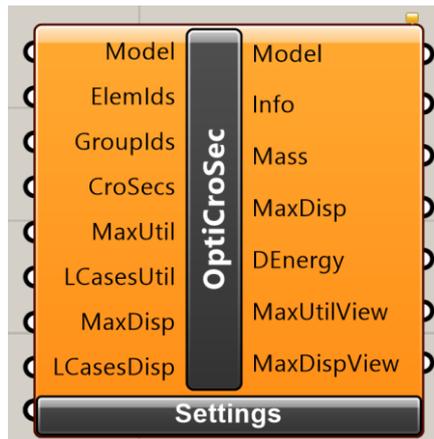


Ilustración 26. Complemento de Optimización "Optimize Cross Section"

Fuente: Captura de pantalla del programa

El componente "OptiCroSec" define el tamaño de la sección transversal de cada elemento para garantizar que pueda soportar todas las cargas posibles. Karamba3D logra esto mediante el siguiente procedimiento:

Preisinger (2013) detallo el siguiente procedimiento:

- Determinación de las fuerzas de sección en los puntos "nMuestras" a lo largo de todas las vigas utilizando la sección transversal inicial.
- Para cada elemento o conjunto dado de elementos: selección de la primera entrada suficiente de la familia a la que pertenece cada sección transversal.
- Si no fue necesario realizar cambios en el paso dos o se alcanzó el número máximo de iteraciones de diseño, el algoritmo se detiene. En caso contrario, vuelve al paso uno utilizando las secciones transversales seleccionadas en el paso dos.

2.8 Herramientas de Optimización Estructural

2.8.1 Galápagos

Galápagos es una herramienta esencial dentro de Grasshopper, diseñada para optimizar algoritmos genéticos. Desarrollado por David Rutten, el mismo creador de Grasshopper,

Galápagos se integra perfectamente en este entorno de programación visual, permitiendo a los usuarios trabajar con algoritmos genéticos de manera intuitiva y eficiente (Kolling, 2015).

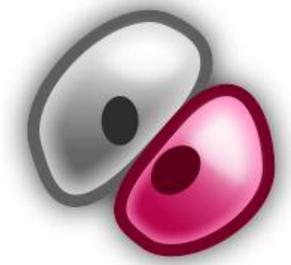


Ilustración 27. Logo de Galápagos

En Grasshopper, los parámetros actúan como contenedores de datos variables, mientras que los componentes son los pasos del proceso, cada uno con una función específica. Una de las características más destacadas de Grasshopper es la inclusión de Galápagos como un componente especializado, que facilita la manipulación de algoritmos genéticos a través de una interfaz gráfica (Loja, 2014).

Galápagos permite a los usuarios ajustar los valores del algoritmo genético mediante campos de texto, donde se pueden especificar el número de generaciones y el número de individuos. Además, ofrece la capacidad de modificar la función de adaptación del algoritmo, lo que incluye maximizar o minimizar los valores de búsqueda y ajustar el porcentaje de mutación. Esto proporciona una gran flexibilidad en la búsqueda de soluciones óptimas dentro de un espacio de diseño dado.

Durante el proceso de optimización, Galápagos proporciona al usuario una serie de datos y gráficos que reflejan el progreso de la optimización. Estos recursos no solo ayudan a monitorear el proceso, sino que también permiten la intervención del usuario en momentos clave, ofreciendo la posibilidad de ajustar el curso de la optimización en tiempo real o simplemente registrar las soluciones generadas para una evaluación posterior.

Como solucionador evolutivo, Galápagos aborda problemas matemáticos complejos, donde es esencial definir claramente una función objetivo y las variables involucradas (Tedeschi, 2014). A partir de estos parámetros y componentes, Galápagos es capaz de transformar y generar resultados optimizados, mejorando la calidad de las soluciones basadas en la función objetivo establecida (Namoncura & Vásquez, 2011).

Este enfoque evolutivo permite a Galápagos encontrar soluciones más precisas y adaptadas a los problemas específicos que se abordan en el diseño paramétrico y la fabricación digital, convirtiéndose en una herramienta invaluable para arquitectos, ingenieros y diseñadores que buscan aprovechar al máximo las capacidades de Grasshopper.

Galápagos se posiciona como una herramienta fundamental dentro de Grasshopper, ofreciendo capacidades avanzadas de optimización que potencian la exploración y desarrollo de soluciones innovadoras en el diseño paramétrico y la fabricación digital.

2.8.1.1 Definición de Variables

Definir las variables y establecer sus límites es un paso crucial para llevar a cabo una optimización. Este proceso implica no solo identificar las variables clave que influyen en la solución, sino también determinar los rangos dentro de los cuales estas variables pueden variar. Establecer límites claros y definir el tamaño de los pasos para cada variable es esencial para garantizar que el proceso de optimización funcione y sea eficaz.

Aunque el tamaño de los conjuntos de soluciones no afecta directamente la velocidad de cálculo de Galápagos, sí tiene un impacto significativo en el proceso de optimización. Un rango de soluciones bien definido permite a Galápagos explorar adecuadamente las opciones disponibles y decidir cuándo ha cubierto un rango razonable de posibles soluciones. Esto, a su vez, ayuda a determinar el momento adecuado para detener la simulación con la confianza de que se ha encontrado la mejor solución posible para el problema planteado.

Por otro lado, si los conjuntos de soluciones definidos son demasiado pequeños, existe el riesgo de que Galápagos pase por alto soluciones críticas que podrían mejorar significativamente el resultado. En contraste, si los conjuntos son demasiado grandes, el algoritmo podría centrarse en variaciones mínimas que, en última instancia, no ofrecen mejoras significativas en el valor de aptitud. Por lo tanto, encontrar un equilibrio adecuado en la definición de las variables y sus límites es fundamental para maximizar la efectividad del proceso de optimización en Galápagos.

2.8.1.2 Configuración de Galápagos

Galápagos es una herramienta de optimización genética que utiliza un algoritmo evolutivo para crear nuevas generaciones de soluciones a un problema dado. Para aprovechar al máximo su potencial, es esencial configurar correctamente varios parámetros clave, empezando por la función objetivo, también conocida como Fitness. Esta función debe definirse en función de las necesidades específicas del proyecto, ya que servirá como criterio principal para evaluar la calidad de las soluciones generadas.

Otro aspecto a tomar en cuenta es la determinación del número de generaciones o componentes que se van a optimizar, también llamados Genome. Estas configuraciones determinan cuántas iteraciones o ciclos de evolución ejecutará el algoritmo, y cuántos componentes están involucrados en el proceso.

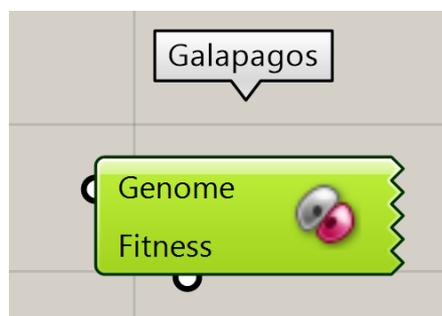


Ilustración 28. Box Galápagos

Fuente: Captura de pantalla del programa

Cuando se hace doble clic en el componente Galápagos en Grasshopper, se accede a su interfaz de usuario, donde es posible ajustar los valores del algoritmo genético mediante campos de texto. En esta interfaz, los usuarios pueden especificar el número de individuos por generación y el número total de generaciones que se desea ejecutar. Además, la interfaz permite modificar la función de adaptabilidad, permitiendo tanto la maximización como la minimización del porcentaje de mutación y los valores de búsqueda, según las necesidades del proyecto.

Una recomendación importante al utilizar el componente de optimización en Galápagos es configurar la aptitud, o Fitness, en modo de maximización. Esto asegura que el algoritmo evolutivo busque constantemente mejorar los resultados, enfocándose en encontrar las soluciones más óptimas posibles dentro del espacio de diseño definido.

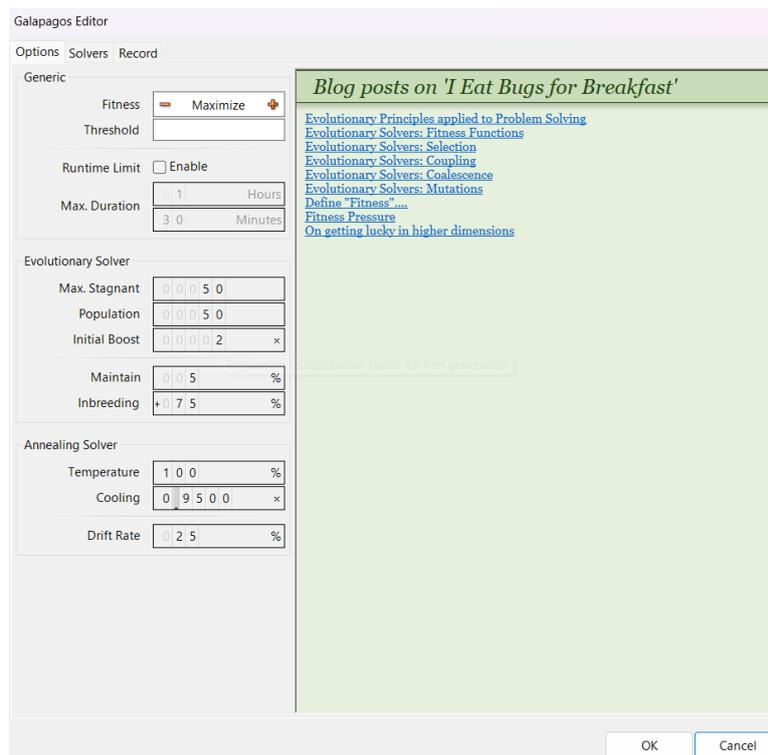


Ilustración 29. Interfaz de configuración

Fuente: Captura de pantalla del programa

2.8.1.3 Tamaño de Población

Después de definir las variables y la función Fitness, el siguiente paso en Galápagos es determinar el tamaño de la población para cada generación. Este tamaño define cuántas soluciones o individuos se evaluarán en cada ciclo de optimización. Un mayor tamaño de población permite a Galápagos explorar una mayor diversidad de soluciones, lo que aumenta las posibilidades de encontrar mejoras significativas en el diseño.

Galápagos utiliza un sistema de colores para indicar la aceptabilidad del tamaño de población: gris (aceptable), bronceado (medio), naranja (alto) y rojo (muy alto). Aunque generalmente es recomendable mantener un tamaño de población bajo o medio para equilibrar la eficiencia, un tamaño mayor puede ser necesario si el conjunto de soluciones es amplio y la variabilidad de los parámetros es alta.

2.8.1.4 Inicial Boost

Galápagos aplica un "Impulso Inicial o Inicial Boost" para aumentar el tamaño de la primera generación multiplicando su tamaño estándar. Aunque esto significa que el cálculo de la primera generación tomará más tiempo, esta inversión inicial puede mejorar la calidad de las soluciones optimizadas que se encuentran posteriormente. Es crucial elegir un impulso inicial que genere suficientes individuos en la primera generación para capturar un amplio rango de soluciones potenciales.

Para el impulso inicial, se recomiendan valores más altos cuando se trabaja con conjuntos de soluciones grandes, ya que, aunque aumenta el tiempo de cálculo, esta inversión es única y puede ser beneficiosa si se cuenta con suficiente tiempo de simulación.

2.8.1.5 Ejecución de Galápagos

Después de definir las variables, establecer un valor de Fitness, asignar un tamaño de población y un impulso inicial, el siguiente paso es iniciar la optimización en Galápagos. Al

ejecutar el componente, Galápagos genera varios resultados visuales que ayudan a monitorear y comprender el progreso de la optimización.

Durante la optimización, se presentan varios gráficos que permiten al usuario analizar el comportamiento del algoritmo evolutivo en cada generación. En la parte superior de la interfaz, se encuentra un gráfico que muestra la distribución de la aptitud de los individuos a lo largo de las generaciones. Este gráfico es fundamental para identificar cómo se están comportando los diferentes individuos en términos de Fitness y para observar cuál de ellos alcanza el mayor valor dentro de la población.

Además del gráfico de distribución, Galápagos también incluye un gráfico de puntos que visualiza cómo se distribuyen los individuos en cada generación. Este gráfico es útil para observar la diversidad dentro de la población y para ver cómo las soluciones evolucionan con el tiempo.

El gráfico de líneas, por otro lado, muestra las mutaciones que se producen en cada ejecución. Este aspecto es crucial para entender cómo las pequeñas variaciones en los individuos pueden influir en el resultado final de la optimización.

Finalmente, el gráfico de barras representa el cruce entre los individuos más aptos, mostrando la estructura genética asociada a cada uno de ellos. Este gráfico ilustra cómo las características de los individuos se combinan para formar nuevas soluciones.

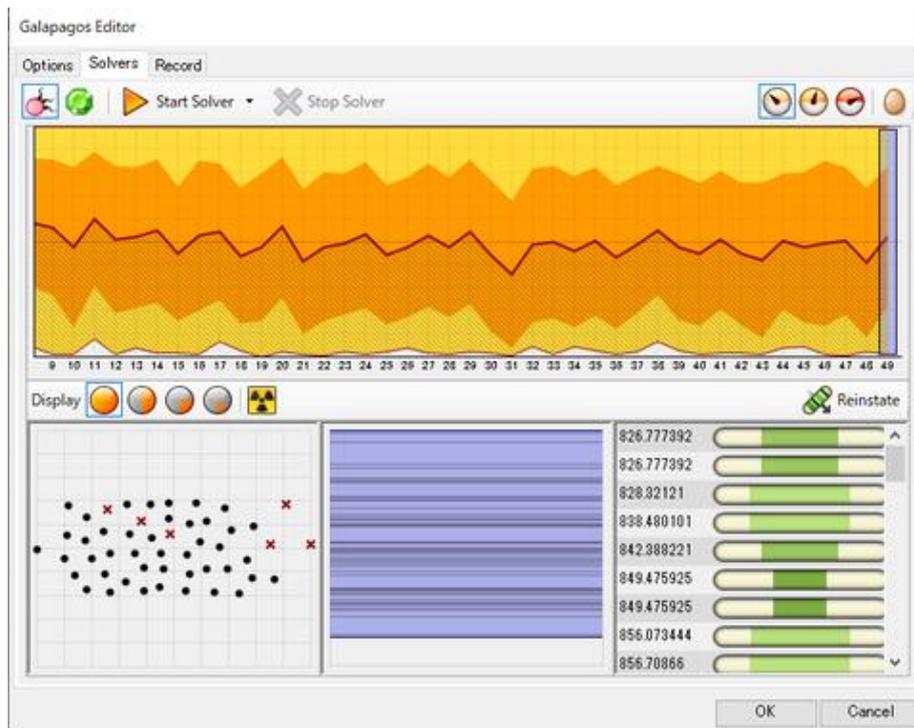


Ilustración 30. Interfaz ejecución Galápagos

Fuente: <https://mt-grasshopper.blog.jp/archives/9106044.html>

2.8.1.6 Obtención de resultados

En Galápagos, cada vez que se encuentra una mejor solución durante el proceso de optimización, esta se marca con una flecha en el gráfico superior, siguiendo la línea naranja que indica el progreso. Este marcador visual permite rastrear las mejoras a lo largo de las generaciones, mostrando cómo las soluciones óptimas se transfieren y evolucionan de una generación a la siguiente en busca de la mejor solución posible dentro del conjunto de soluciones factibles.

Una vez que se completa el proceso de optimización, se puede revisar el conjunto completo de individuos evaluados. Esta revisión abarca detalles como el punto de mutación de cada generación, el nivel de adaptación de cada individuo y el porcentaje de genes que corresponden al problema en estudio (Loja, 2014). Estos datos permiten una evaluación exhaustiva del rendimiento de las soluciones generadas durante la optimización.

Es crucial destacar que Galápagos continuará ejecutándose hasta que se le indique detenerse.

3. CAPÍTULO 3 (CASO DE ESTUDIO)

Se estableció el uso y la función de las herramientas de modelado 3D Rhinoceros junto con su plug-in Grasshopper, con el propósito de desarrollar un algoritmo paramétrico capaz de graficar la estructura a optimizar. Este algoritmo incorpora varios “boxes” o bloques de comandos para construir la geometría en 3D, siendo la creación de esta geometría la etapa más extensa del proceso. Luego de modelar la estructura, se llevó a cabo el análisis estructural utilizando Karamba3D, un complemento que aplica el método de elementos finitos. Para la optimización, se empleó tres casos, en el primer caso se utilizó un complemento de Karamba3D llamado "Optimize Cross Section", para el segundo caso se usó el plug-in Galapagos, que utiliza algoritmos genéticos, y para finalizar se ambos casos con el objetivo de encontrar la mejor solución. Este enfoque junto a una corroboración con el programa Etabs permitió obtener resultados confiables en la optimización estructural.

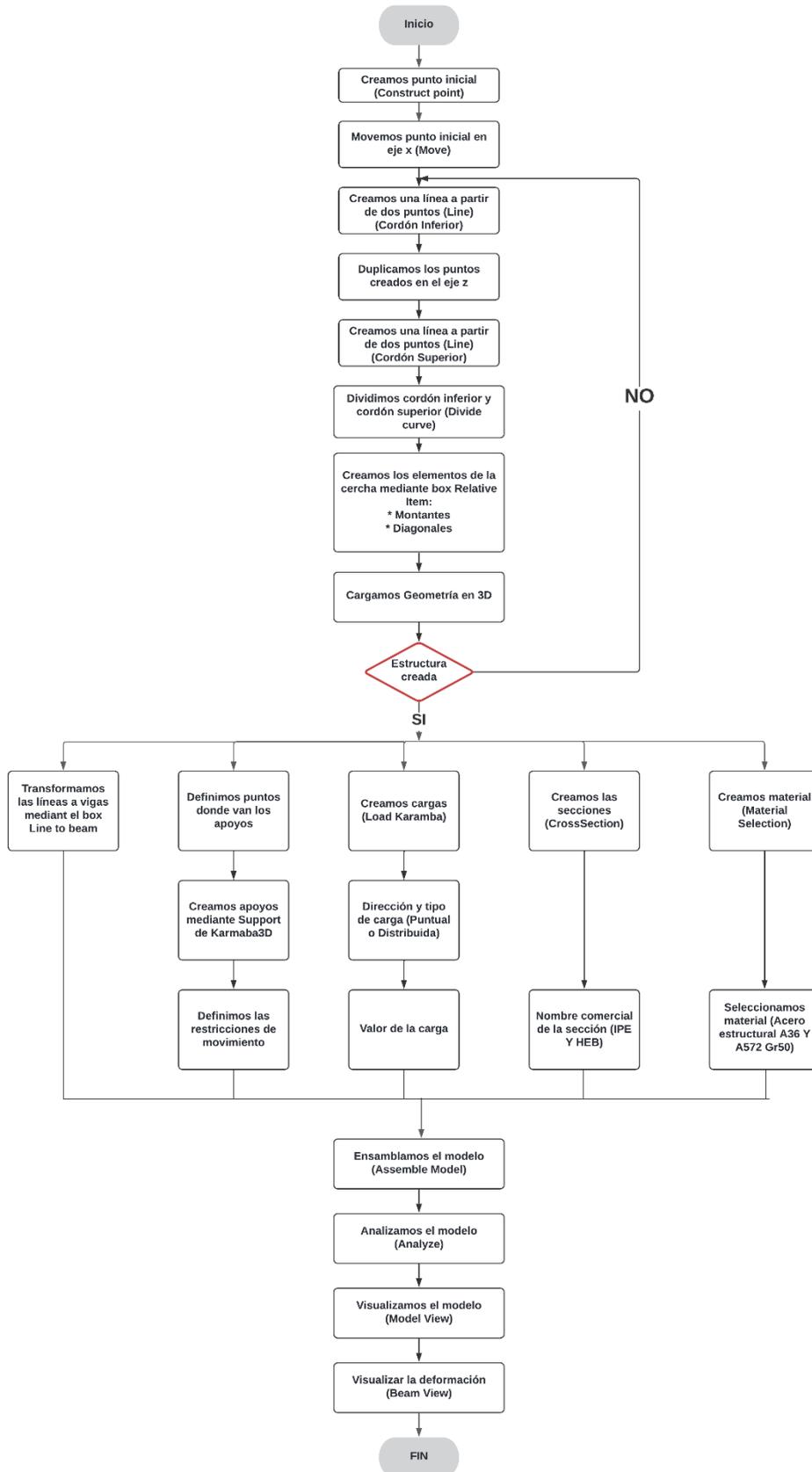


Ilustración 31. Esquema de procesos para algoritmo paramétrico y análisis estructural

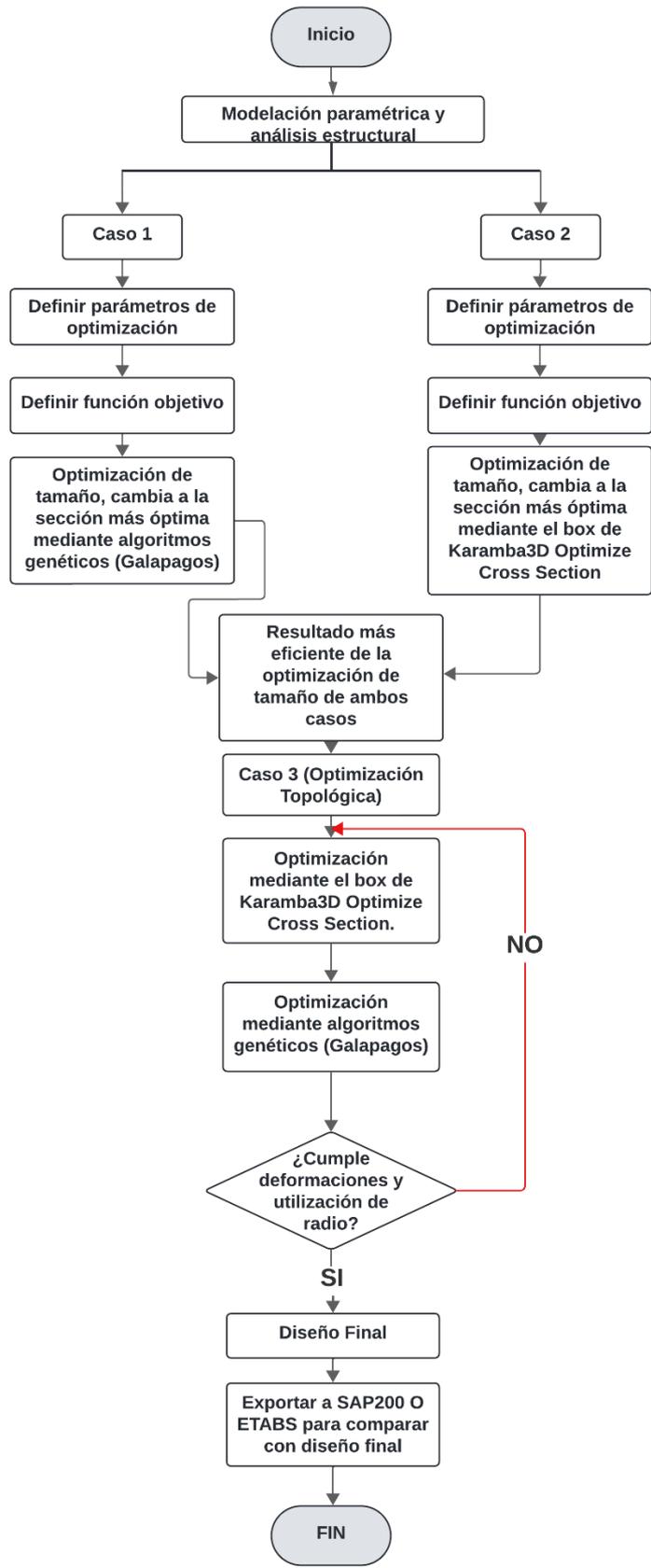


Ilustración 32. Esquema de procesos para la optimización estructural

3.1 MODELACIÓN

3.1.1 Modelación paramétrica

Mediante el plug-in Grasshopper se creó el modelo paramétrico, programando la geometría de un puente simplemente apoyado con una estructura tipo cercha la cual se visualiza en el lienzo del programa Rhinoceros 3D.

- Para definir la geometría de la estructura, se comenzó creando los puntos clave para dibujar los cordones, tanto inferiores como superiores, partiendo de un punto que se considera como inicial en las coordenadas $x = 0$, $y = 0$, y $z = \text{valor de altura de pilares}$. Este punto se formó mediante el box “Construct Point” donde se ingresó el valor de las coordenadas.

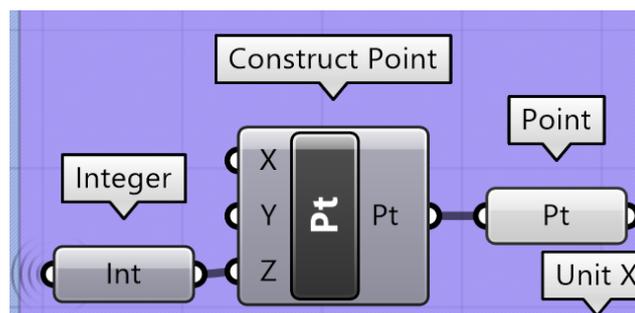


Ilustración 33. Creación de Punto inicial

- Tomando como referencia el punto inicial, se utilizó el comando “Move” para crear un segundo punto el cual se movió en el eje x a una distancia igual a la luz del puente dividido entre un valor de dos. A partir de este punto, usando el mismo comando “Move” se creó un tercer punto el cual se ubicó en la longitud total del puente.

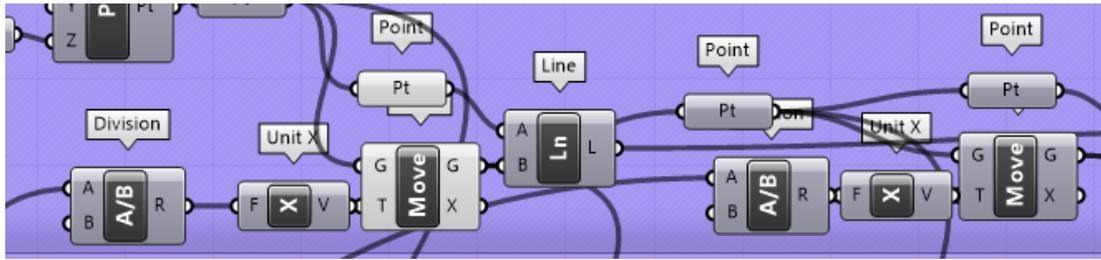


Ilustración 34. Bloques de comando para creación de puntos para dibujar los cordones a partir del primer punto (Puntos para cordón inferior).

- Al tener listo los puntos para el cordón inferior, se duplicó estos puntos en dirección del eje z, tomando en cuenta la altura de los pilares más la altura del canto y una altura de inclinación que se colocó en el centro de la luz.

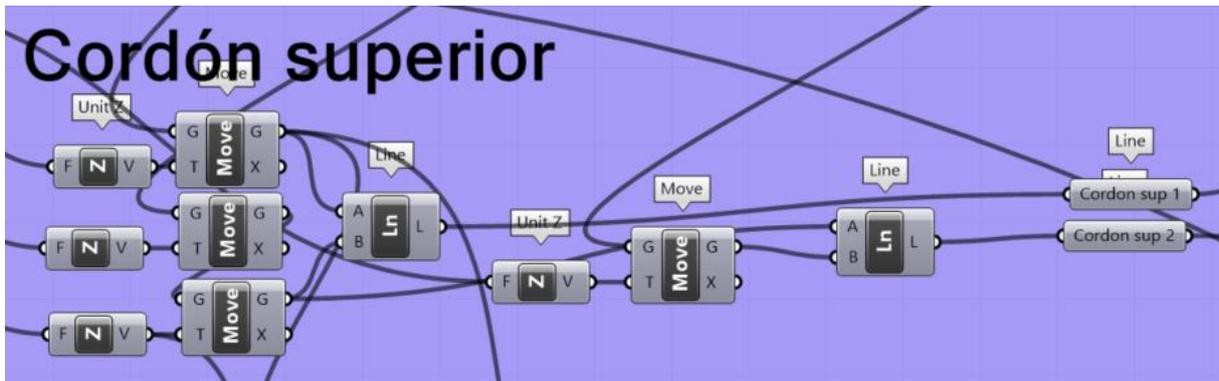


Ilustración 35. Puntos para cordón superior

- La siguiente ilustración muestra a todos los puntos de la geometría ya creados. Estos bloques que generan los puntos estarán vinculados a un slider o deslizador de valores para ajustar los parámetros de longitud del puente, así como el ancho y la altura tanto el punto de los extremos como en el punto que se generó en el centro.

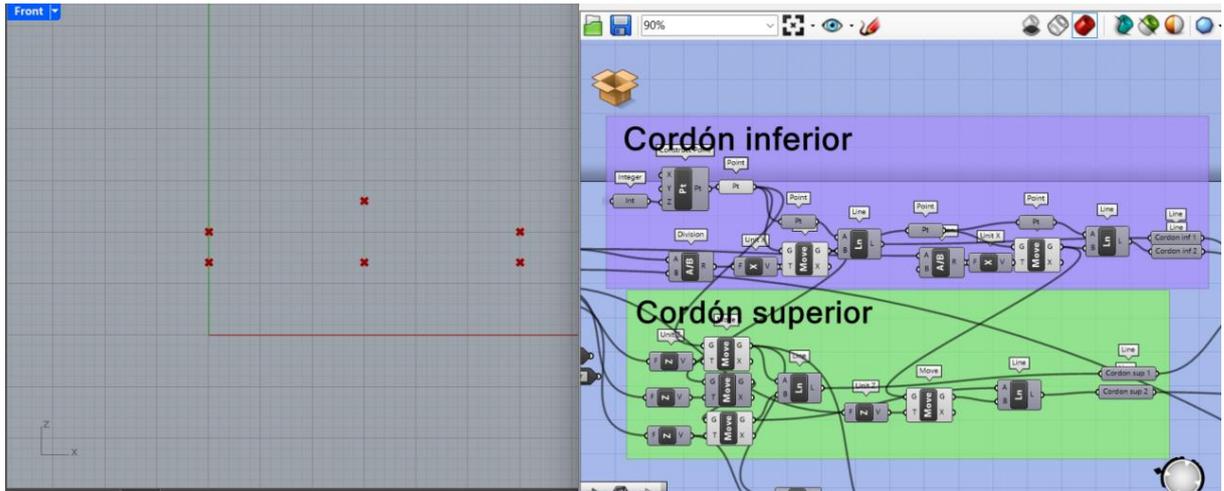


Ilustración 36. Bloques de comando para creación de los puntos de partida de la Geometría

- Una vez generado los puntos de partida para la geometría, con la ayuda del box “Line” se generó las líneas a partir de dos puntos, en este caso por temas de diseño se dividió en dos tanto el cordón superior (cordón superior 1 y cordón superior 2) y el cordón inferior (cordón inferior 1 y cordón inferior 2).

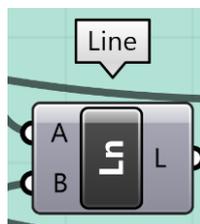


Ilustración 37. Box "LINE"

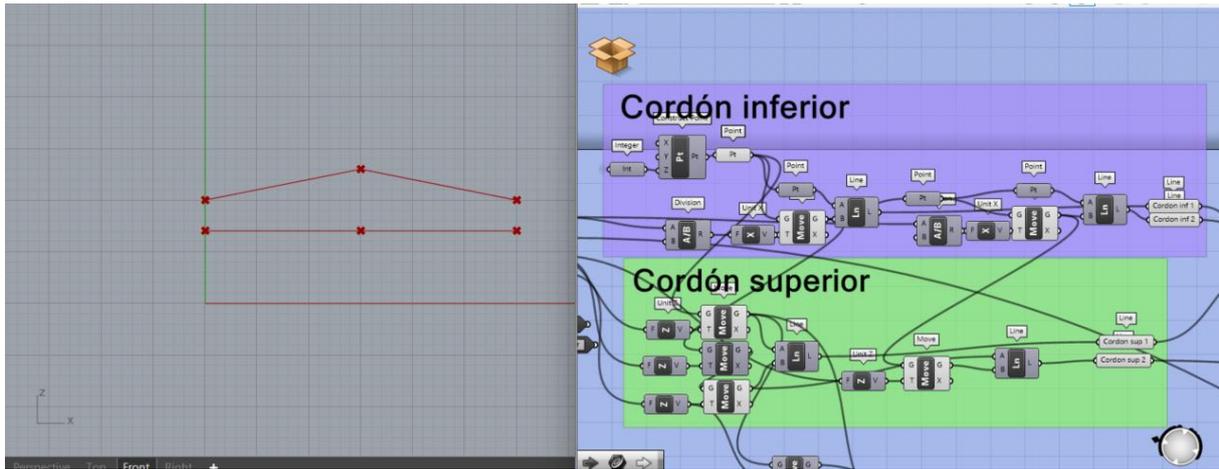


Ilustración 38. Creación de líneas base para cordones del puente

- Una vez creado las líneas del cordón inferior y cordón superior se procedió a realizar la cercha del puente, para este paso se dividió las líneas de los cordones usando el box “Divide Curve”. El número de puntos que se generó al dividir la curva representan las divisiones que tiene el puente, en base a esto, se debe tomar en cuenta que al tener dos líneas en el cordón inferior como superior, el slider donde se colocó el parámetro de división antes de ser unido al “Divide Curve” debe estar conectado al box “Divide” para generar las divisiones correctas por cada lado de las líneas y estas no sean el doble del valor necesario.

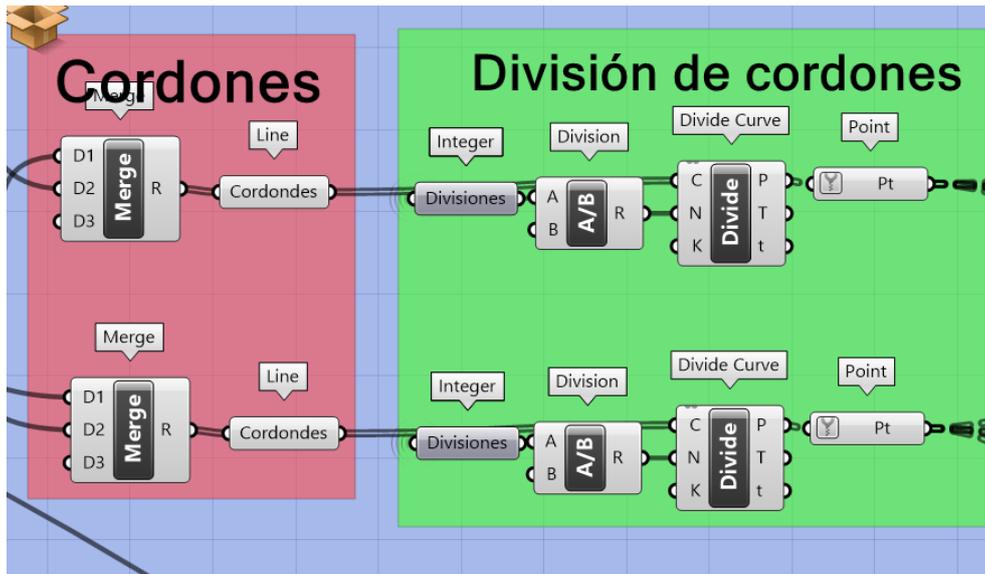


Ilustración 39. Creación de las divisiones del puente.

- Para la creación de diagonales y montantes del puente se usó el box “Relative Item” el cual permite ingresar los todos los puntos que se crearon al dividir los cordones, a este box se colocó una condición para que permite evaluar los puntos necesarios ya sea para crear los montantes o las diagonales. Una vez evaluado que puntos se utiliza para las montantes y diagonales respectivamente de uso el box “Line para generar estos elementos.

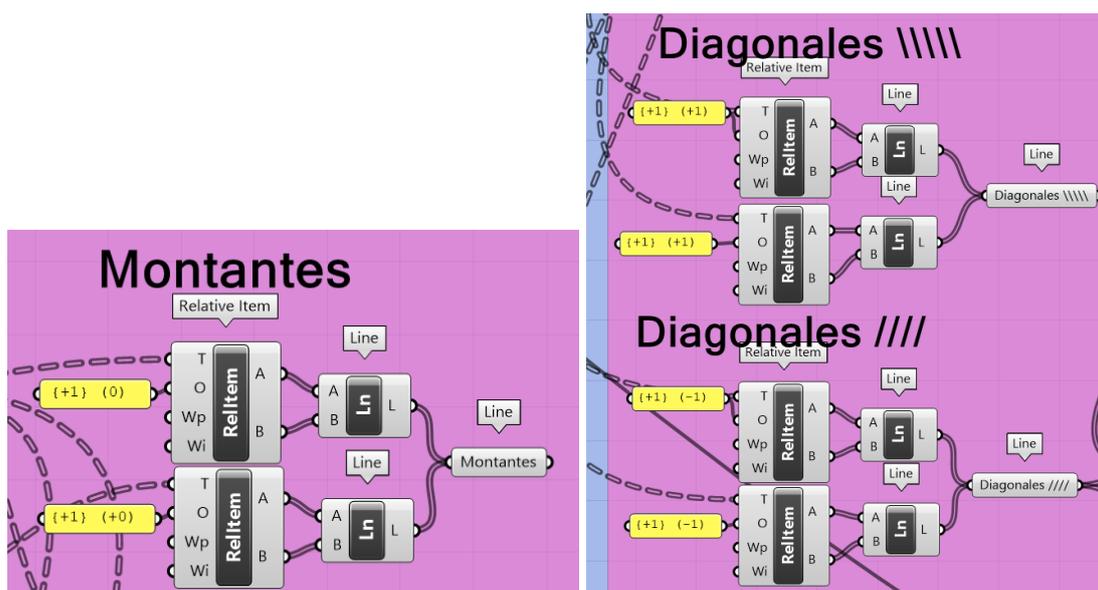


Ilustración 40. Creación de montantes y diagonales

- Teniendo como base estos algoritmos, se diseñó tres tipos de cercha (Warren, Howe y Pratt) para el realizar análisis estructural. En este paso se utilizó las diagonales obtenidas para crear los tipos de cerchas planificados para la investigación. Con la ayuda del box “Dispatch” y el box “Merge” se generó la configuración de diagonales según el tipo de cercha.

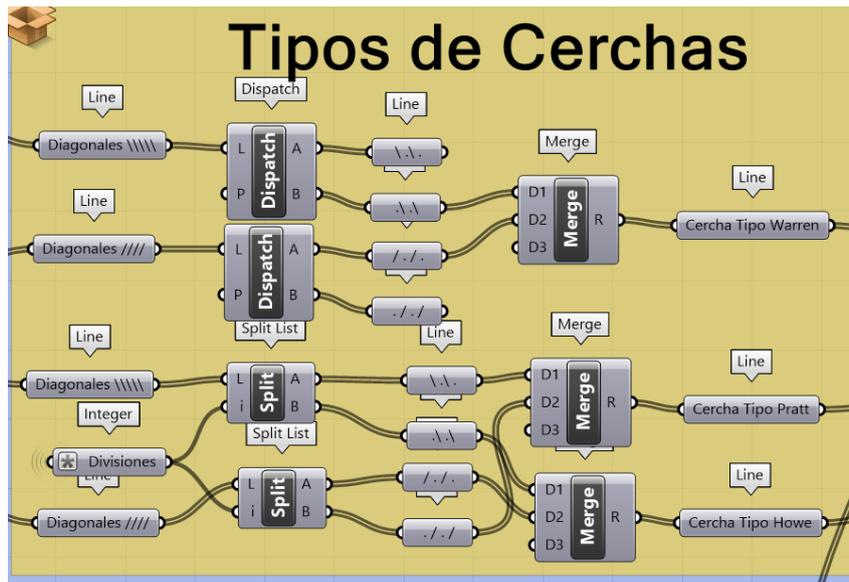


Ilustración 41. Creación de los tipos de cercha

- Para tener la posibilidad de cambiar de tipo de cercha se utilizó el box “Stream Filter” el cual permite ingresar una lista donde se colocó valores que representan cada tipo de cercha. A este componente se unió las geometrías que se generó anteriormente en el orden de los valores ingresados en la lista.

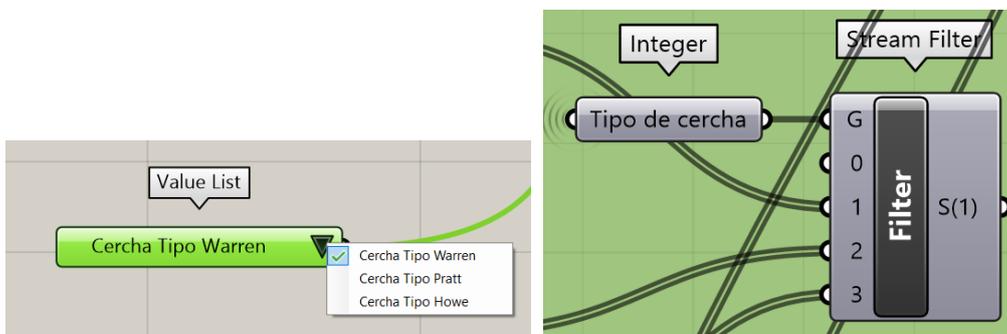


Ilustración 42. Bloque Stream Filter para escoger el tipo de cercha para el análisis y optimización.

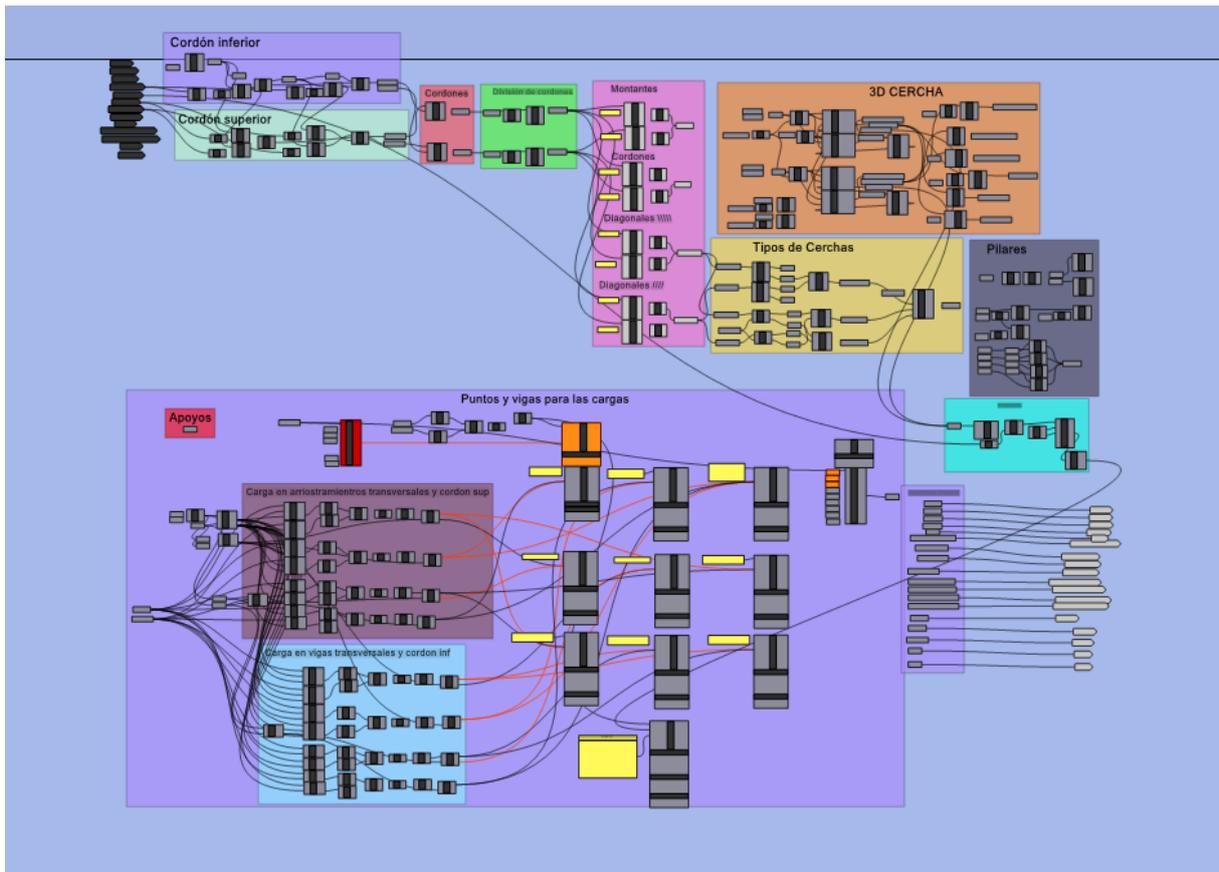


Ilustración 47. Algoritmo Visual Grasshopper

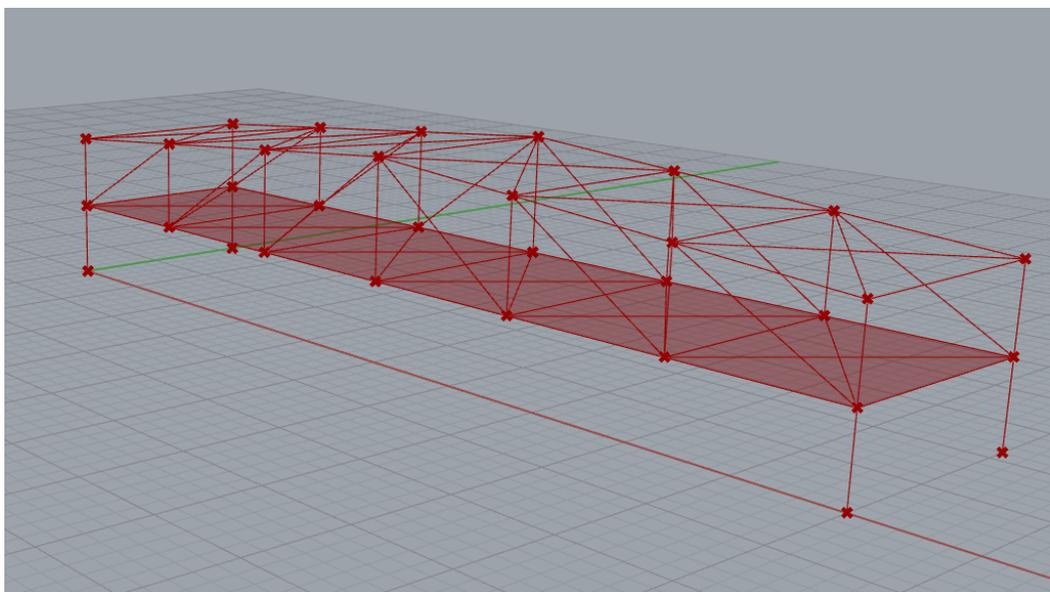


Ilustración 48. Modelo visual en Rhinoceros 3D

Al tener creado el modelo paramétrico y por motivos de armonía visual se crea un clúster que nos permite organizar y guardar la programación de la geometría realizada, en este

clúster contaremos con los datos de entrada que se consideran los parámetros modificables del proyecto y los datos salida que utilizamos para conectar a Karamba3D (Análisis Estructural), Galápagos y Optimize Cross Section (Optimización estructural).

3.1.2 Datos de entrada

En los sliders que conectan a los datos de entrada contamos con los parámetros modificables a criterio del ingeniero, estos parámetros se pueden cambiar utilizando las sliders que se presentan. Cabe mencionar que cada cambio que se haga en los parámetros se reflejara automáticamente en la geometría visual de Rhinoceros 3D.

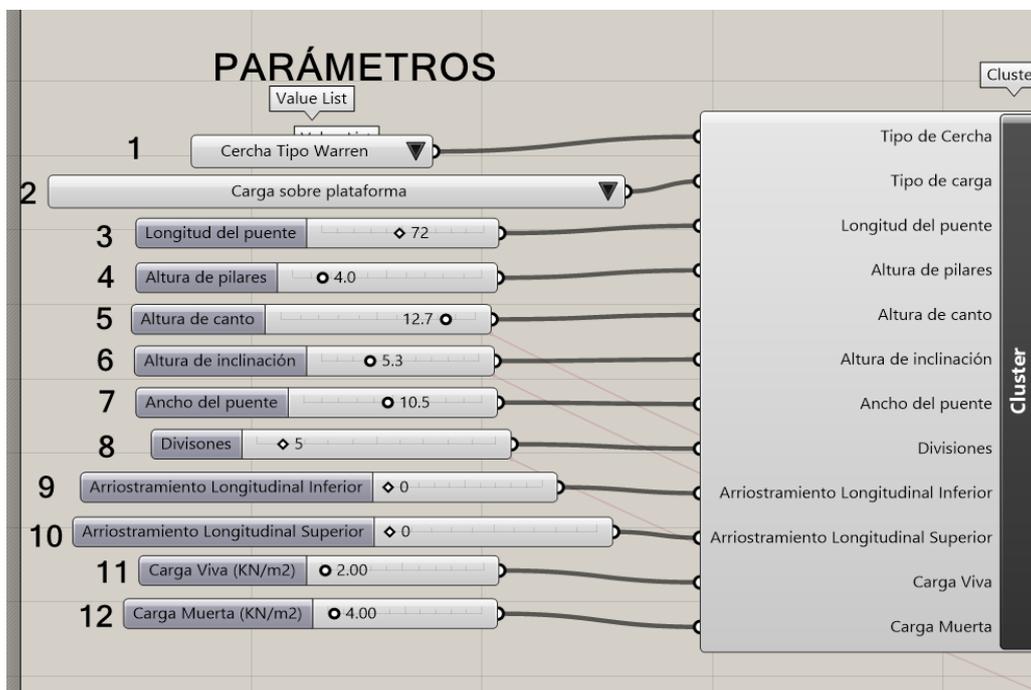


Ilustración 49. Parámetros modificables

A continuación, se explicará que cambia cada parámetro dentro de la geometría:

1. Lista de Valor: Aquí se puede escoger el tipo de cercha según lo requiera el ingeniero, se tiene a elección los siguientes tipos:

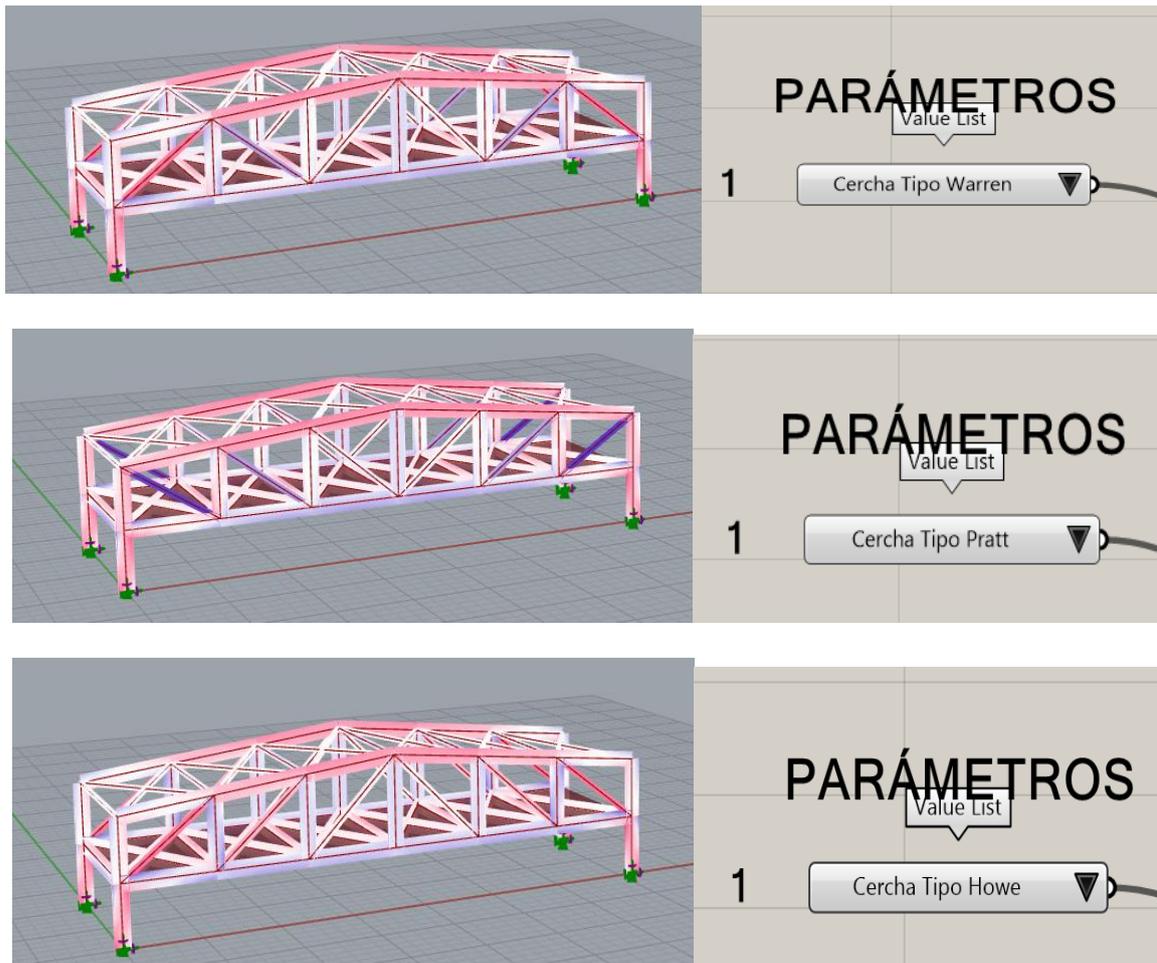


Ilustración 50. Cerchas programadas en el lienzo de Grasshopper

2. En el segundo parámetro al igual que el primero se utiliza una lista de valores la cual permite escoger el tipo de carga axial que se requiere, dentro del algoritmo la carga esta programada para colocarse sobre el tablero del puente, las vigas transversales y cordones inferiores.

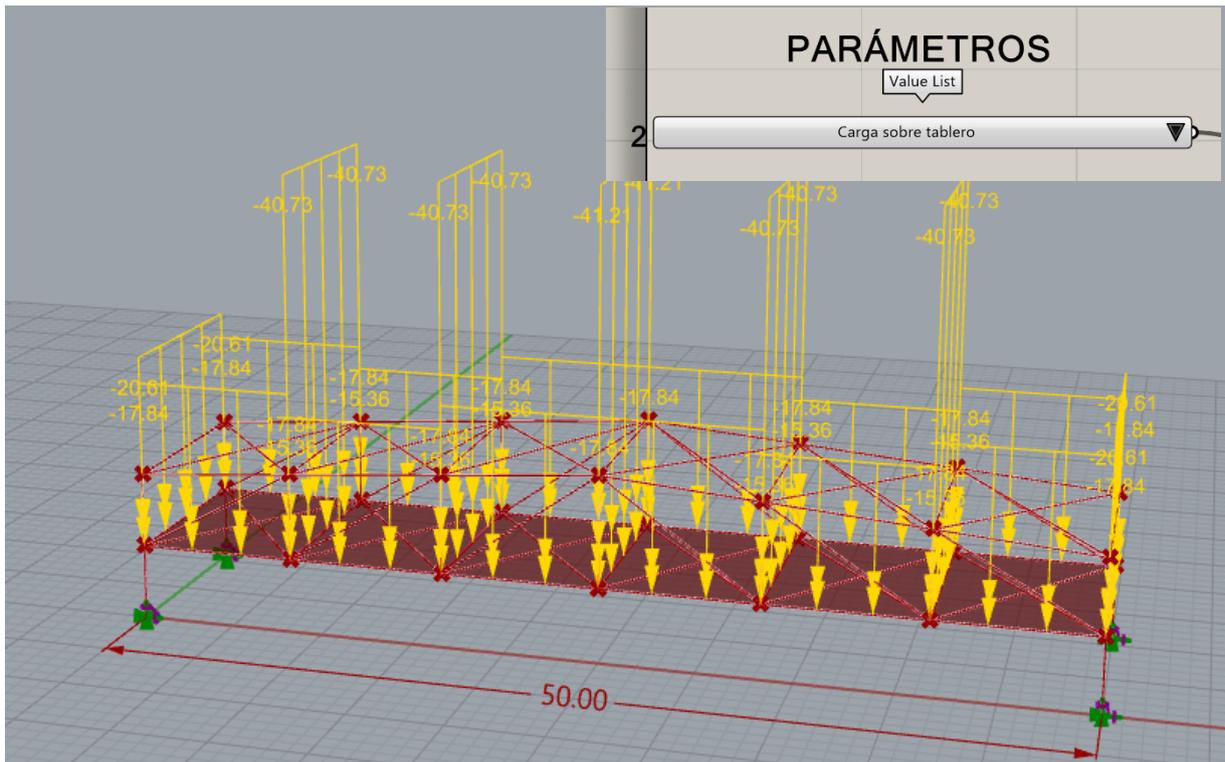


Ilustración 51. Tipo de carga axial sobre el tablero

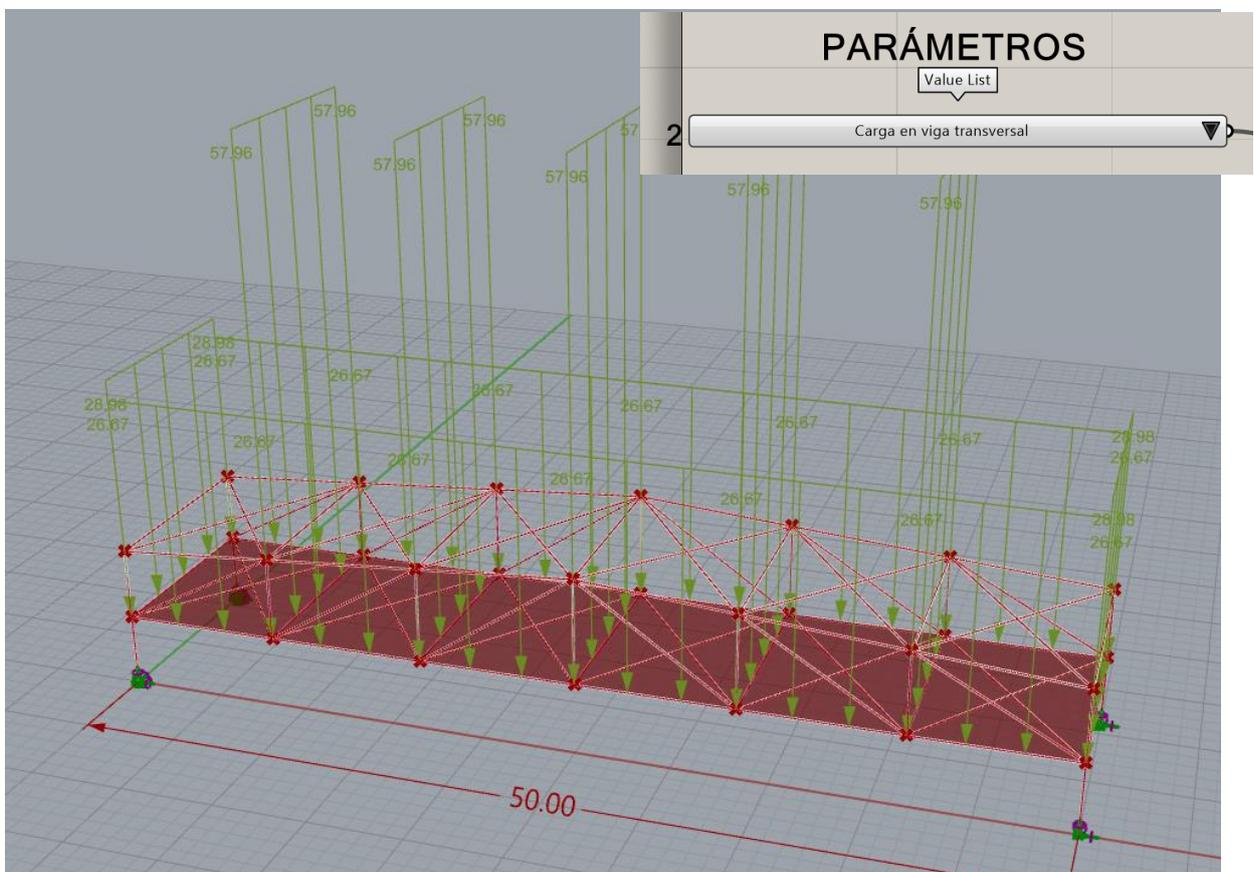


Ilustración 52. Tipo de carga axial sobre las vigas transversales

3. Permite modificar la luz del puente a la distancia requerida para el diseño.

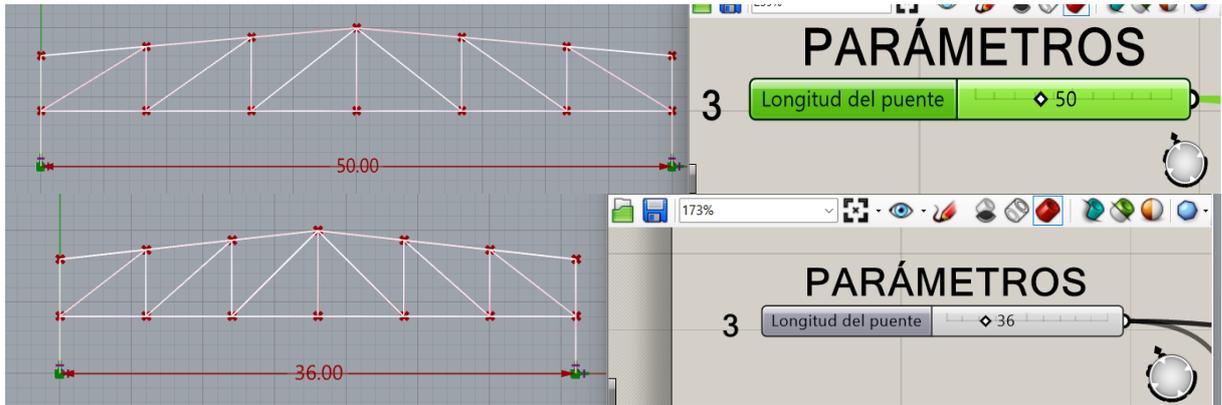


Ilustración 53. Slider para cambiar la luz del puente

4. Este parámetro permite cambiar la altura de pilares en el puente.

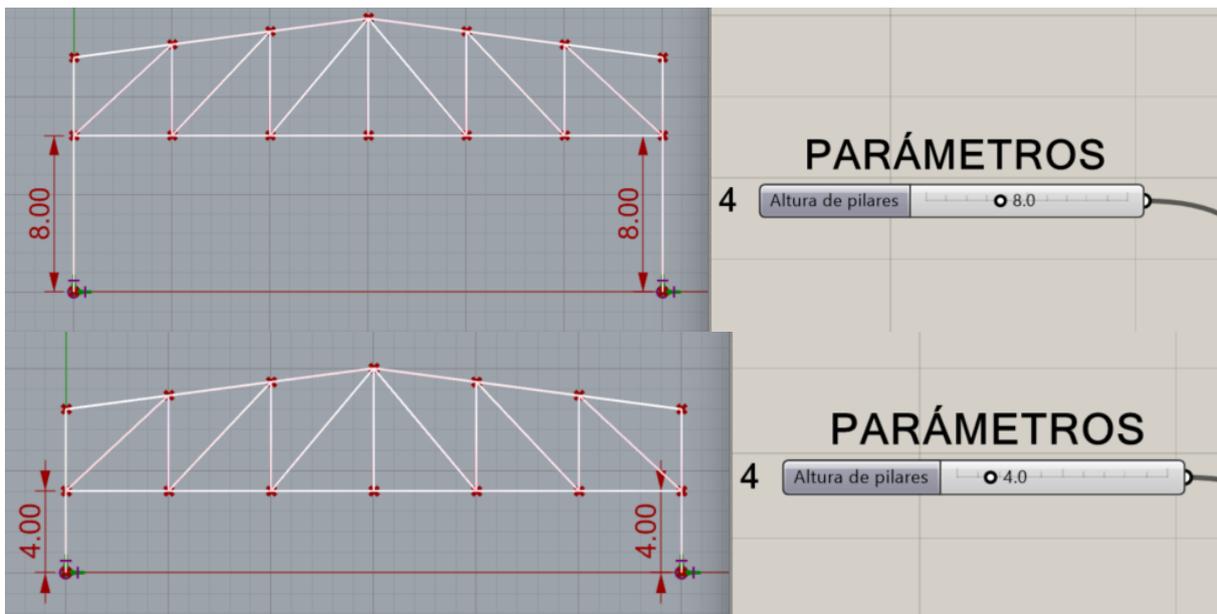


Ilustración 54. Slider para cambiar altura de pilares

5. En este parámetro se cambia la del punto superior de los montantes que se encuentran tanto al inicio como al final de la cercha.

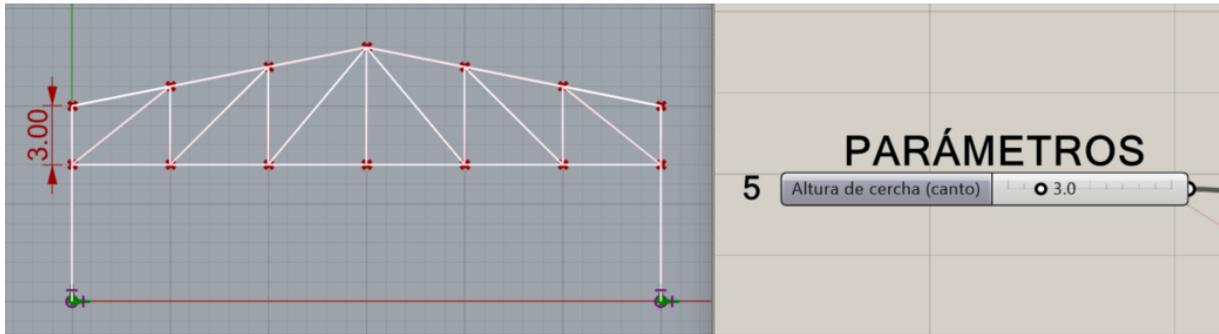


Ilustración 55. Slider para cambiar la altura de los montantes externos

6. Permite cambiar la altura del punto medio en el cordón superior con respecto al punto del montante exterior. A esta media se le denomina altura de inclinación.

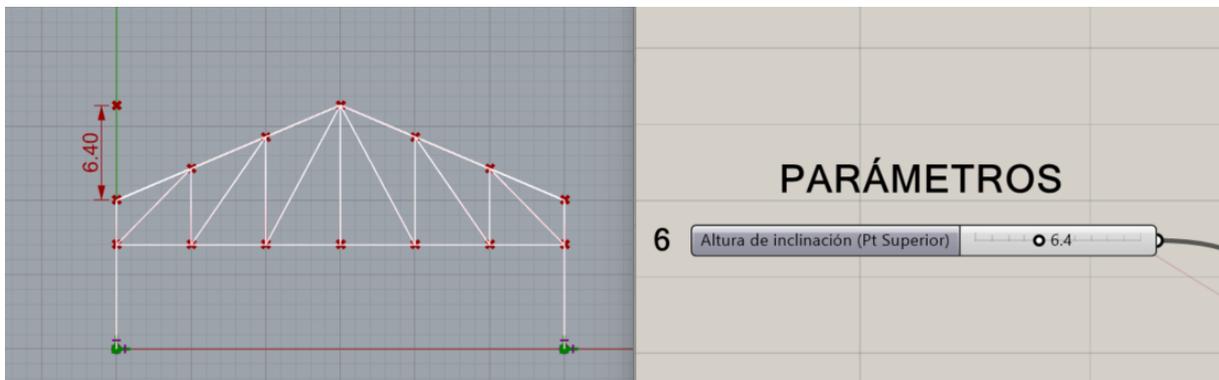


Ilustración 56. Slider para cambiar la altura de inclinación

7. En este parámetro se permite cambiar el ancho total de puente.

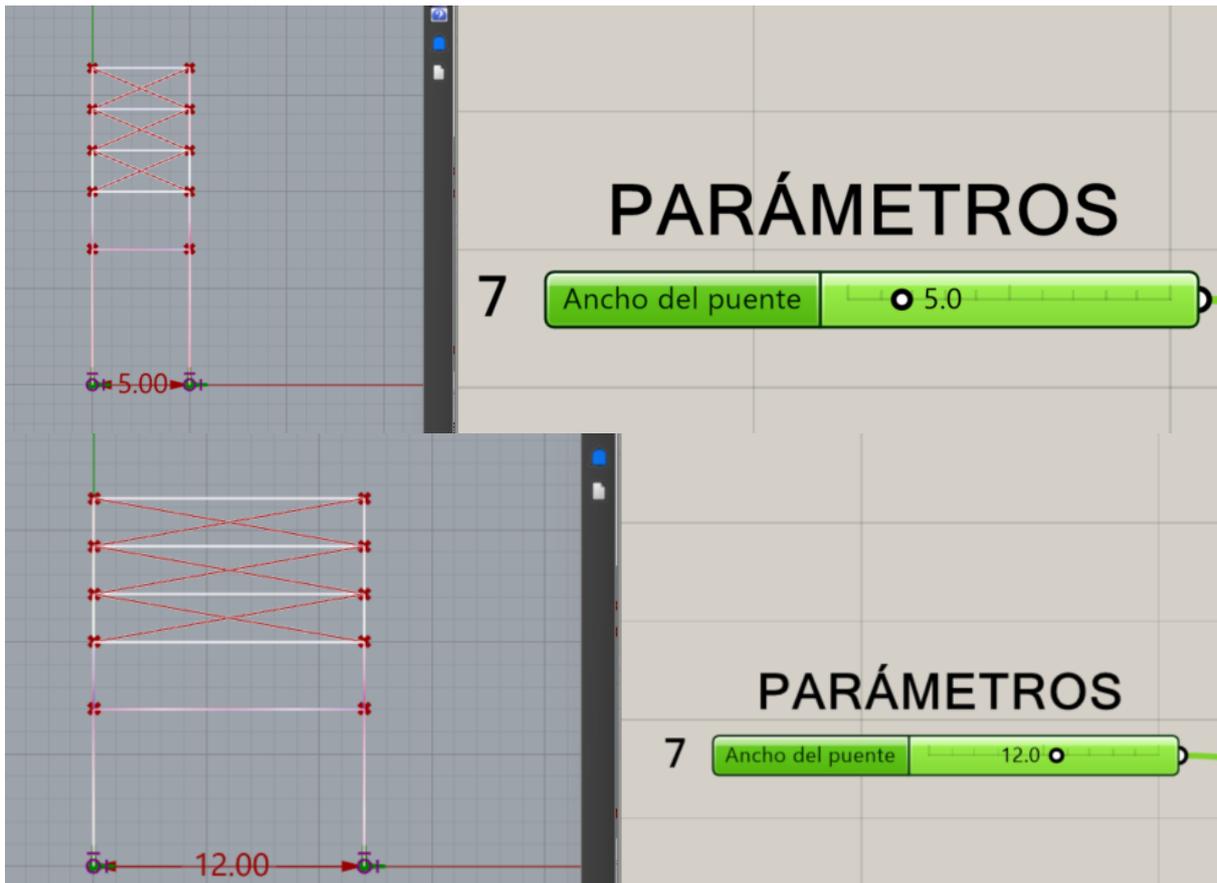


Ilustración 57. Slider para cambiar ancho del puente

8. Con este parámetro se puede colocar el número de divisiones que se desee tener en la cercha, este valor esta ligado a las diagonales que tendrá la cercha.

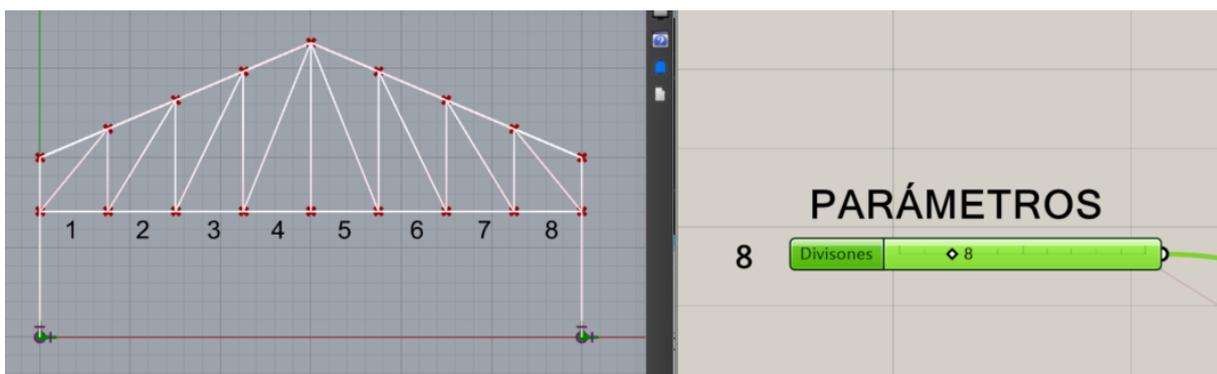


Ilustración 58. Slider para escoger el número de divisiones

9. Este parámetro cambia la dirección en la que se creen los arriostramientos longitudinales tanto inferiores como superiores del puente. Para cada arriostramiento

se tiene un slider desde 0 hasta un valor de 2, el número 0 coloca el arriostramiento en ambas dirección, el número 1 coloca en un solo sentido y el número dos lo coloca en el sentido opuesto al número 1.

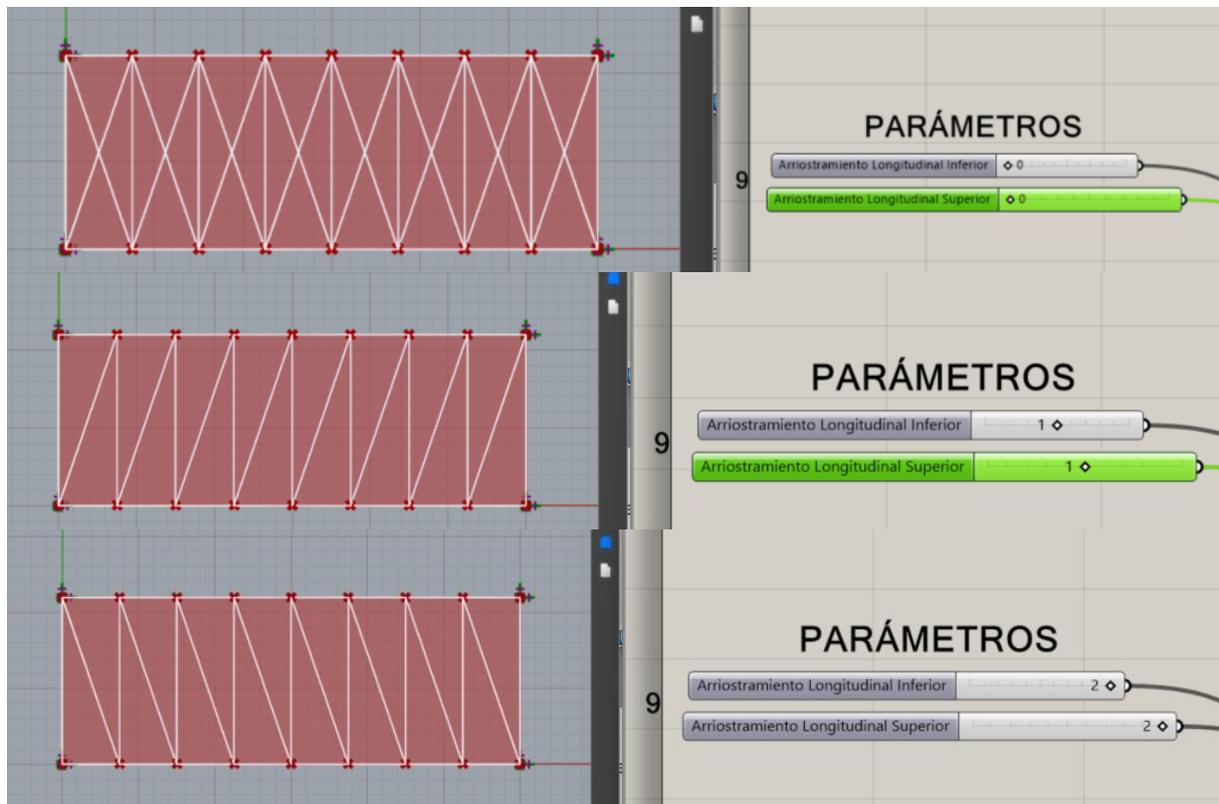


Ilustración 59. Parámetro para definir la dirección del arriostramiento longitudinal (Vista superior)

10. Las unidades usadas son kN/m² para carga muerta y carga viva. El algoritmo está programado para transformar las cargas ingresadas en cargas lineales distribuidas (KN/m). La única combinación de carga que se utiliza en esta investigación es de 1.2CM + 1,6CV.

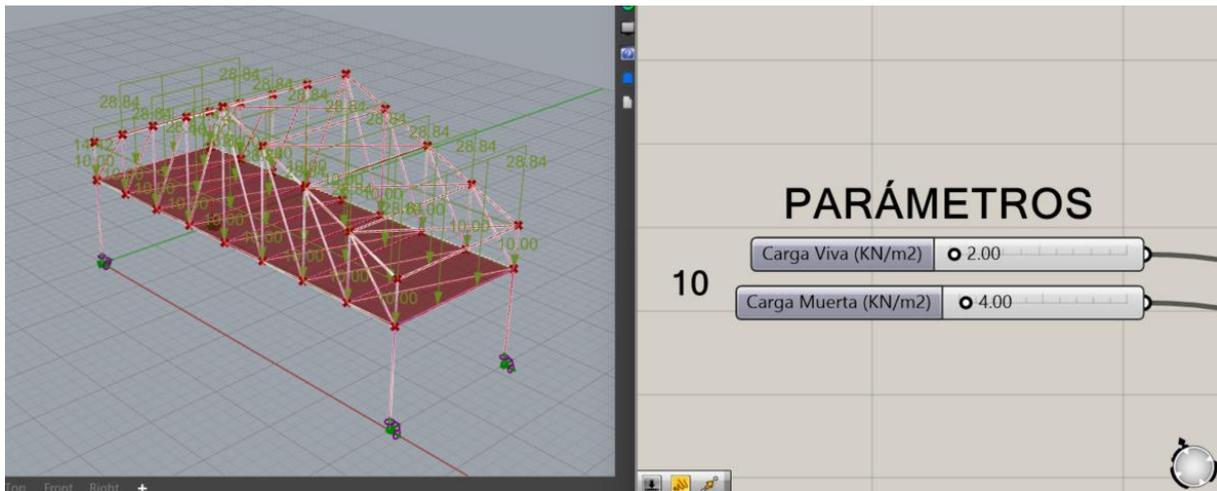


Ilustración 60. Parámetro para definir Carga Viva y Carga Muerta

3.1.3 Datos de Salida

Como datos de Salida se encuentran detallados todos los elementos que conforman la cercha, estos parámetros serán usados para conectar al complemento de Karamba 3D y los complementos para la optimización estructural.

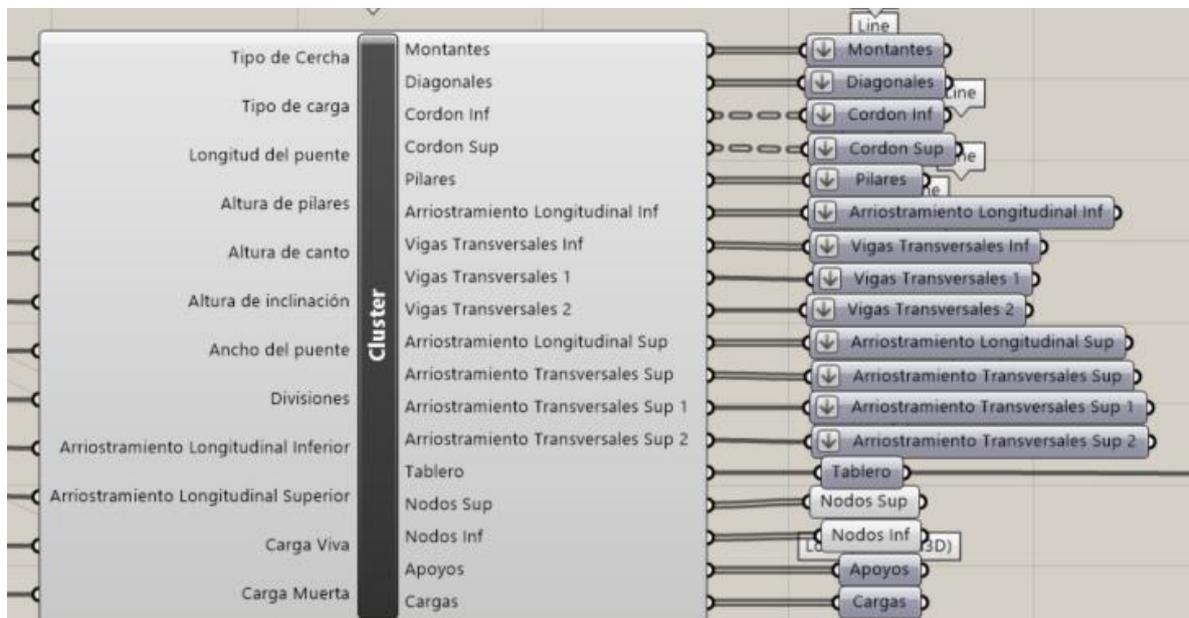


Ilustración 61. Datos de salida de los elementos del puente

3.2 Ensamble de modelo Estructural

Una parte crucial del análisis estructural en Grasshopper es la definición de la geometría, las cargas, la sección transversal y los soportes de la estructura, lo que permite determinar su comportamiento. Para ello, se utiliza el componente "Assemble Model" del complemento Karamba3D, que recopila toda la información necesaria y genera un modelo estructural a partir de ella.

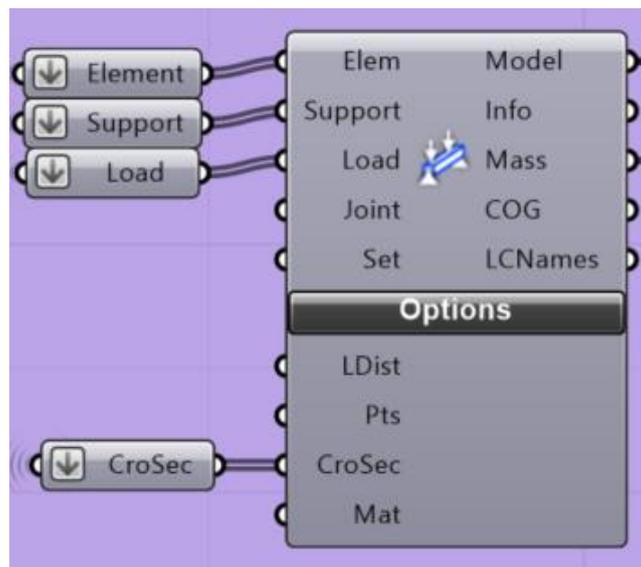


Ilustración 62. "Assemble Model" componente para ensamblar el modelo estructural

El componente "Assemble Model" tiene varios parámetros de entrada, para nuestro caso se utilizan los siguientes:

- Element a list
- Support
- Load
- Crosec
- Material

3.2.1 Líneas a vigas

Para colocar todos los elementos en el Assamble Model primero se debe convertir todas las líneas a vigas, esto quiere decir que el programa debe reconocer estas líneas como elementos estructurales. El complemento de Karmaba3D nos entrega el box “LineElem” el cual permite ingresar la geometría de líneas y las traduce como elementos estructurales. Para definir mejor los elementos estructurales se ingresa un panel en el cual se ingresa el nombre de cada elemento.

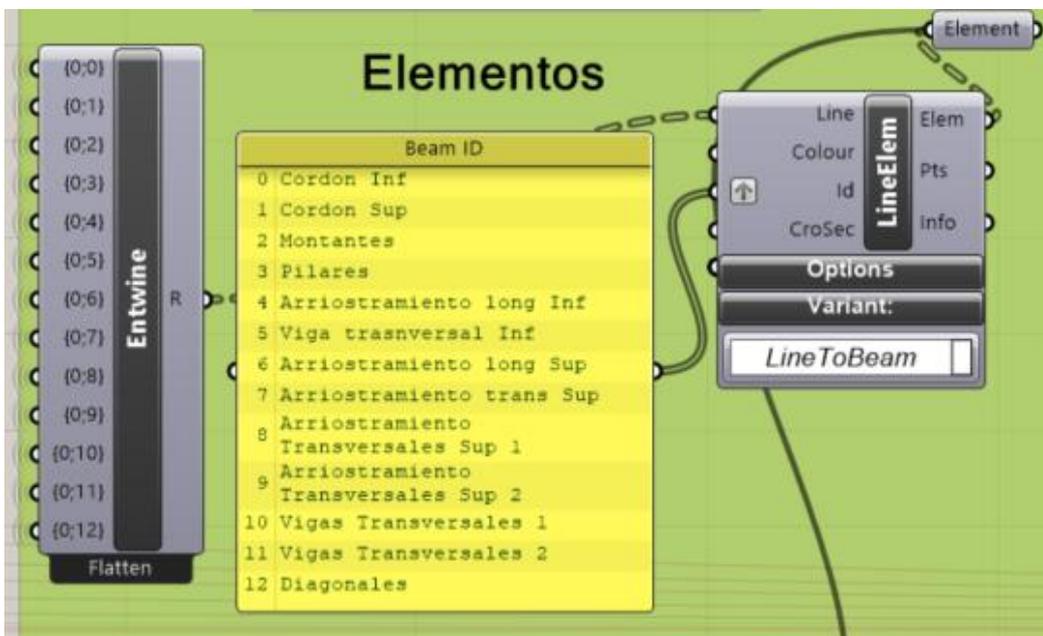


Ilustración 63. Complemento para cambiar las propiedades líneas a elementos estructurales

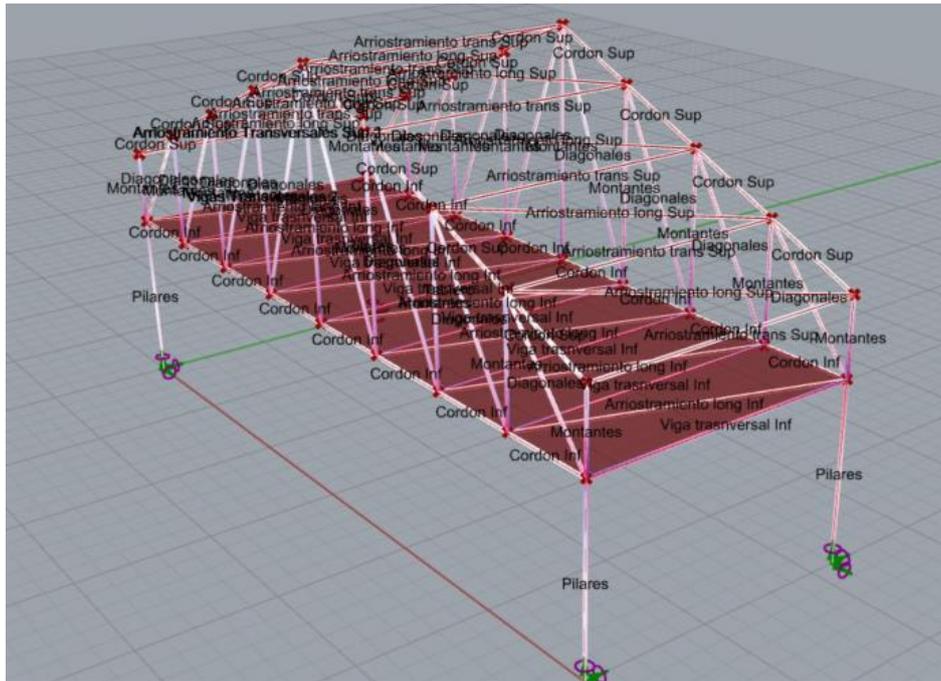


Ilustración 64. Clasificación de cada elemento estructural

3.2.2 Superficie a losa

Así como se transformó las líneas de la geometría a vigas se debe convertir la superficie ingresada que representa el tablero a un elemento tipo losa. Para ello se utiliza el box “SurfElem” que toma una superficie o malla triangular y la convierte en un grupo de elementos de membrana.

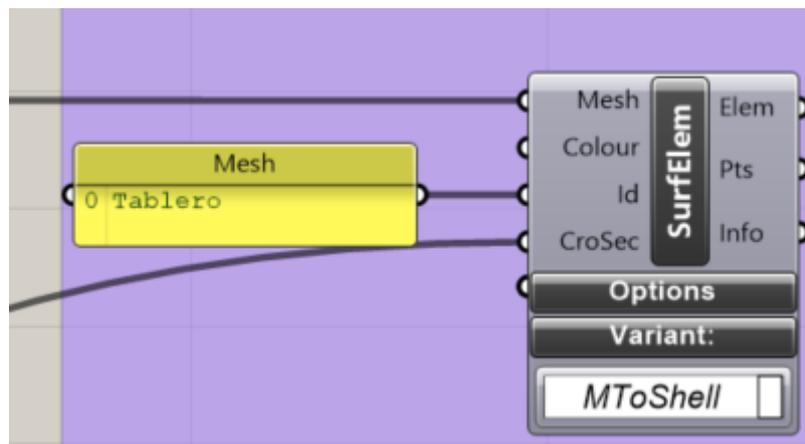


Ilustración 65. Complemento para convertir una superficie en losa tipo tablero

3.2.3 Apoyos

Para definir los apoyos, se especifica la ubicación estos, para este caso los apoyos estarán en la base de los pilares del puente. El complemento que nos permite ingresar las restricciones en los apoyos es el box "Support", 'para esta estructura se utilizara apoyos empotrados.

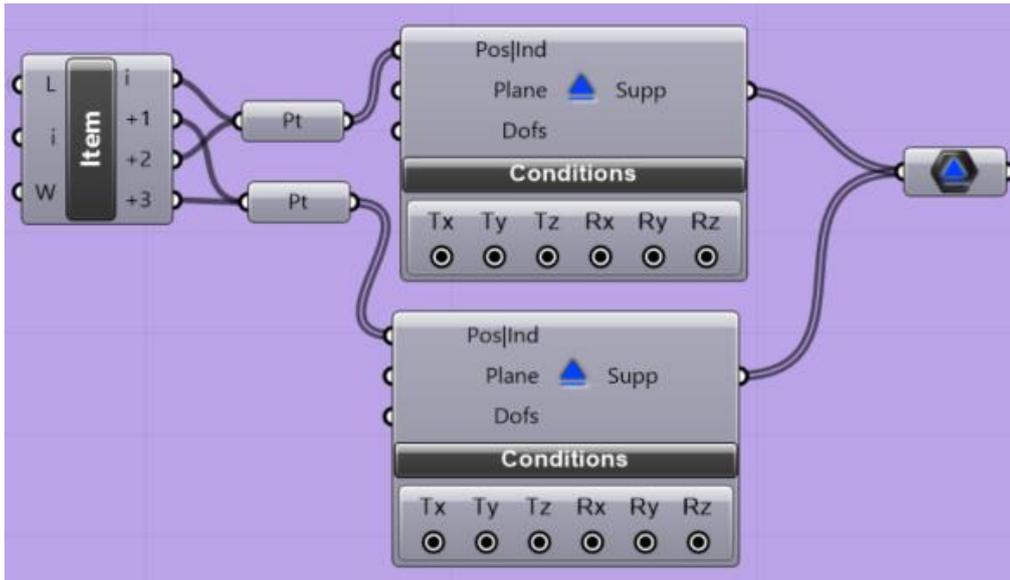


Ilustración 66. Apoyos en la base de los pilares

3.2.4 Definición de las cargas

Para definir las cargas en el modelo, se utilizó el componente "Loads", que permite aplicar las cargas sobre el tablero del puente. Además, se empleó el componente "Beam Loads" para las vigas transversales y los cordones inferiores. Las cargas aplicadas están orientadas en dirección de la gravedad y se combinan con factores de mayoración.

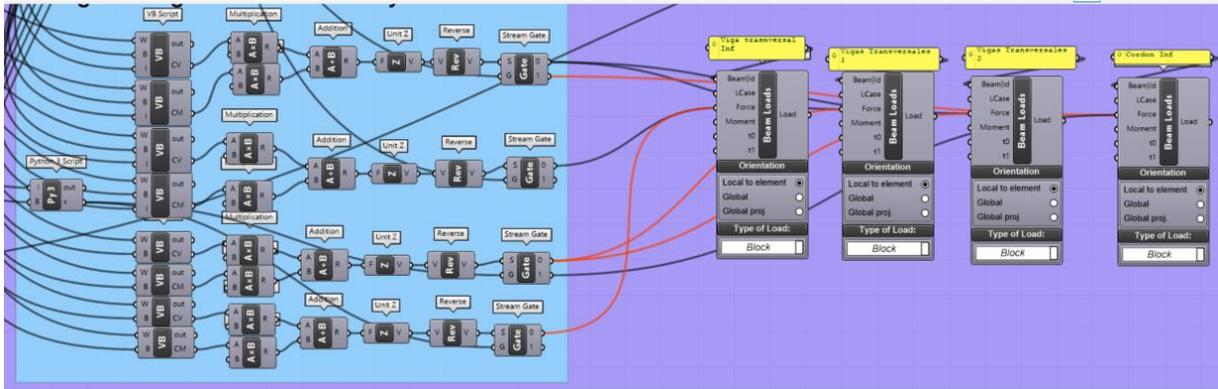


Ilustración 67. Bloques para el cambio de unidades de KN/m² a KN/m (Carga en vigas transversales y cordones inferiores)

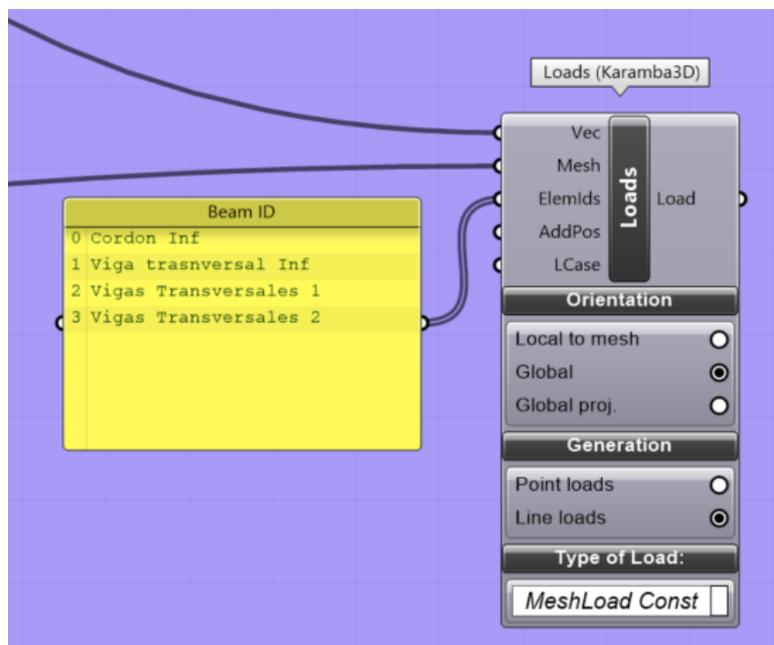


Ilustración 68. Algoritmo que define la carga sobre el tablero del puente

3.2.5 Definición de material y catálogo de perfiles

Para la selección del material se utilizó el box “Material Selection”, en este se escoge el tipo de acero estructural que se va a utilizar, en nuestro caso se creó una lista que mediante el complemento Stream Filter nos permite elegir entre acero A36 Y A572 GR50

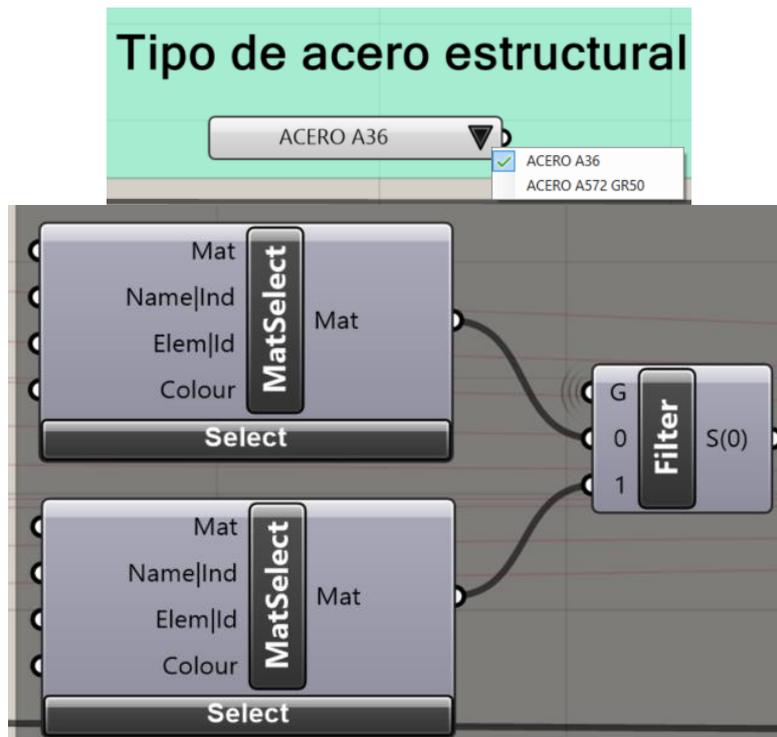


Ilustración 69. Definición y selección del material

Para definir las secciones de las vigas, montantes, cordones, diagonales y arriostramientos se utilizó el box “Cross Section Range Selector” el cual cuenta con un amplio catálogo de perfiles, para nuestro caso de estudio es escogió dos tipos de perfiles el IPE y HEB el cual mediante una lista de valores y el complemento Stream Filter podrán ser seleccionados. Una vez definido los perfiles que se usaran se coloca el complemento “Cross Section Selector” y este se repite tantas veces como los elementos estructurales existentes ya se podrá tener diferentes perfiles para cada elemento. Se utilizará una slider para determinar el perfil según sus características.

En el caso del tablero se usó el complemento “Cross-section” escogiendo como tipo de perfil “Shell Const”.

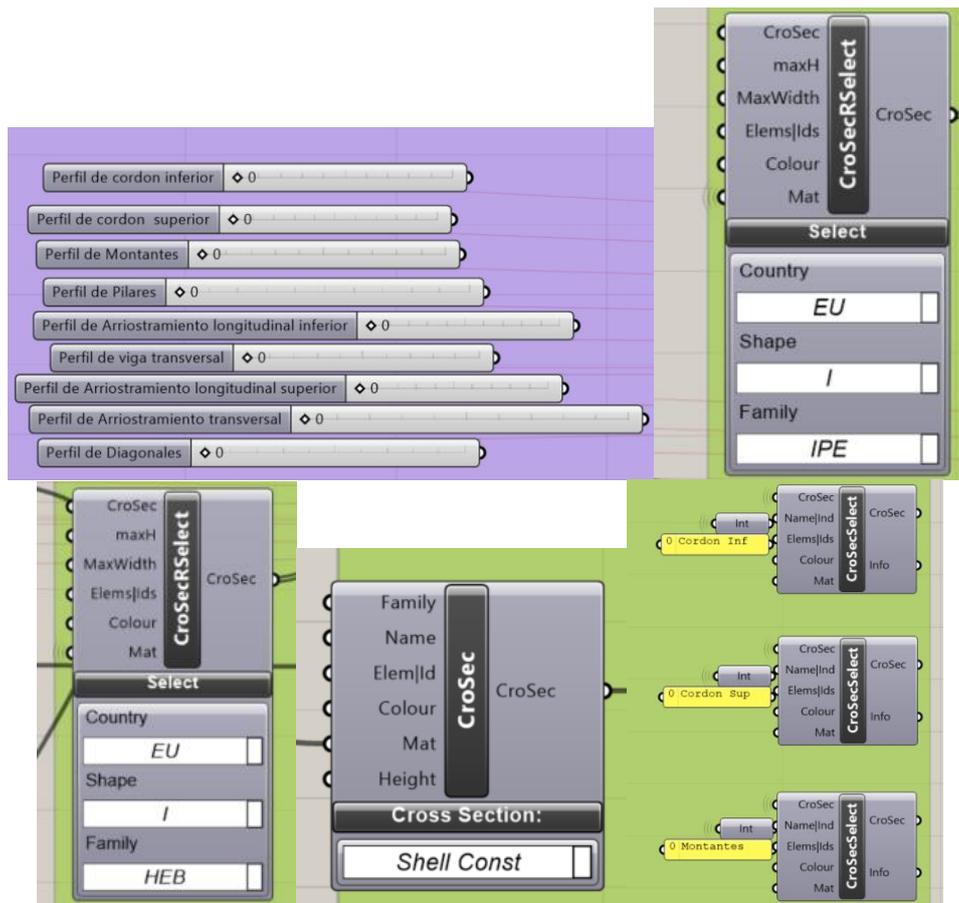


Ilustración 70. Bloques para definir y seleccionar los perfiles de los elemntos

3.3 Análisis Estructural

Una vez completada la definición de los elementos, se procedió con el desarrollo la representación gráfica para el análisis estructural utilizando los componentes de Karamba 3D. Los componentes que se emplearon son los siguientes:

1. "Analyze" este componente es el primer paso para iniciar con el análisis estructural del modelo pues este se encarga de calcular la respuesta mecánica para el caso de carga que se haya asignado, agregando y guardando la información al modelo que se puede visualizar diferentes complementos de Karamba3D que se explican a continuación.
2. "Model View (Karamba3d)", este complemento permite visualizar la información del modelo sobre el lienzo de Rhino, la información que muestra puede ser el número de nodos, las cargas, el tipo de material, nombre los perfiles utilizados, nombre de los

elementos, y datos sobre como se muestra el modelo en Rhinoceros 3D. Esto se da ya que este box controla las propiedades de visualización de todo el modelo estructural.

3. “Beam View”, al igual que el complemento anterior este permite mostrar ciertas propiedades de las vigas, pues este complemento controla la información que se visualiza sobre la estructura tipo cercha del modelo.
4. “Shell View”, este complemento es muy similar al anterior pues la diferencia principal es que se encarga de mostrar las propiedades e información sobre el tablero del puente.
5. “Legend”, en este box se recolecta la información de salida de los componentes Beam View donde se muestran el resultado de de las fuerzas axiales en unidades de kN/cm².
6. “Utilization”, muestra cuales son los radios de utilización del modelo del puente.
7. “Beam Results”, este complemento guarda la información de las fuerzas axiales y cortantes de cada uno de los elementos que conectado en un panel donde se observa los resultados en unidades de Kilo Newtons (kN).

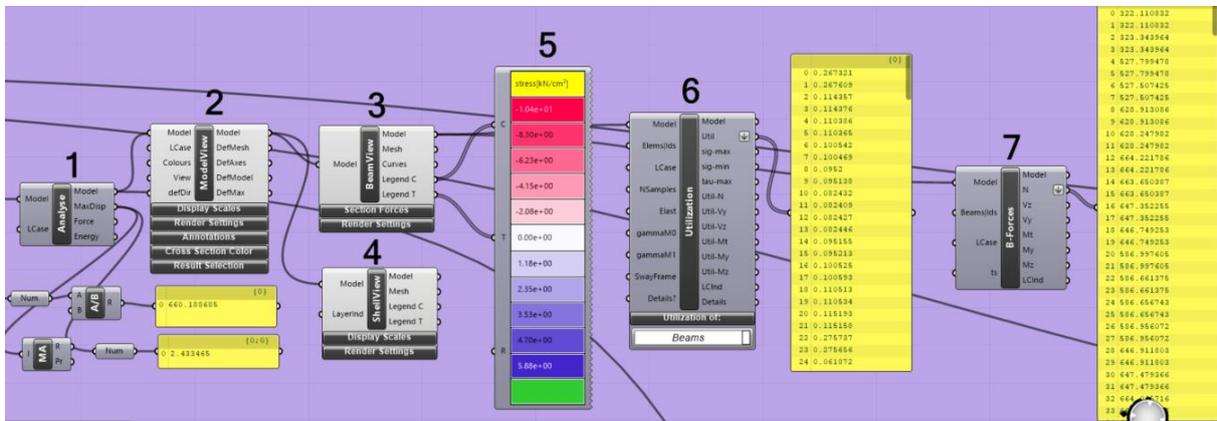


Ilustración 71. Bloques de comando para el Análisis Estructural (Karamba3d)

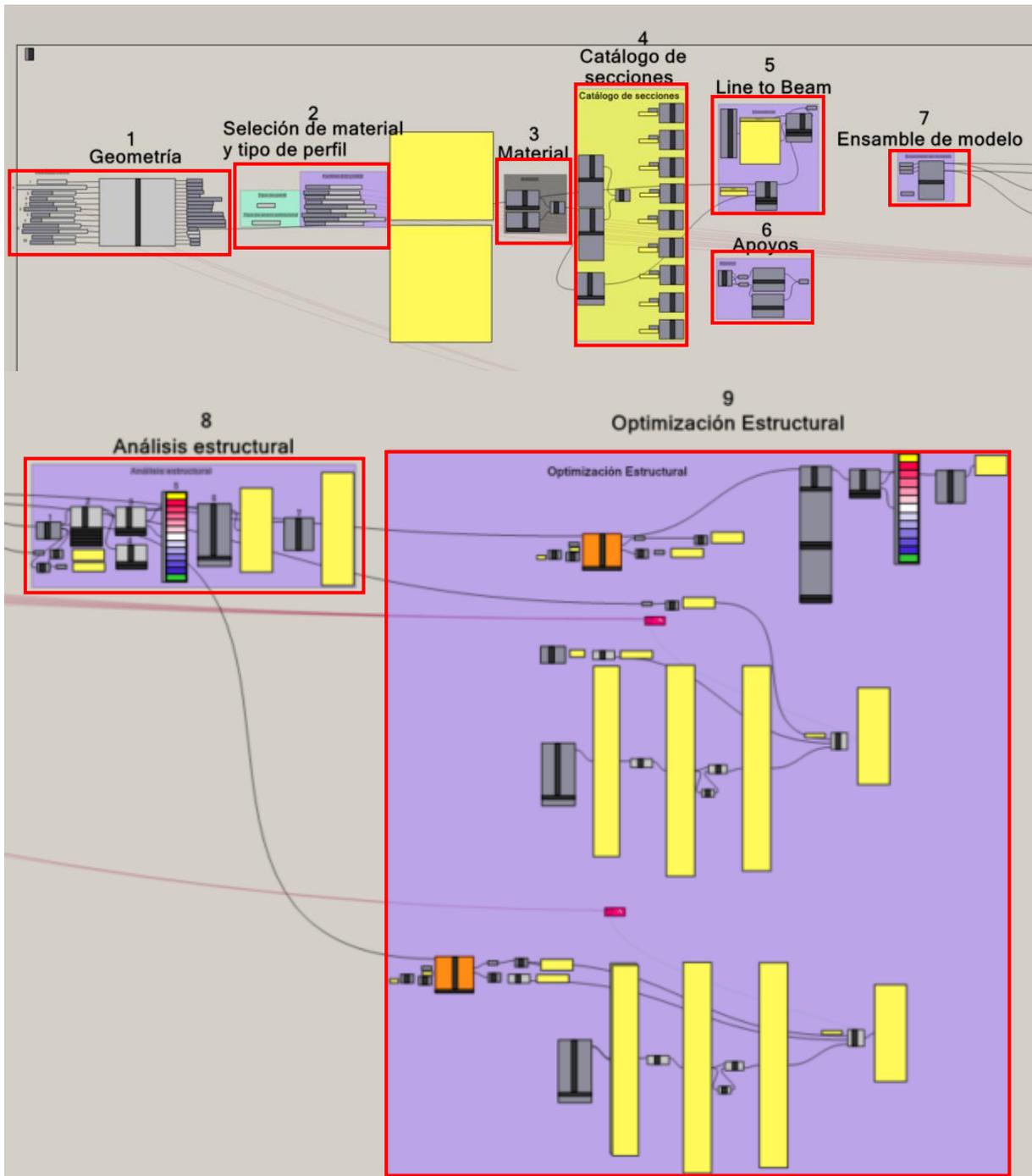


Ilustración 72. Algoritmo Final

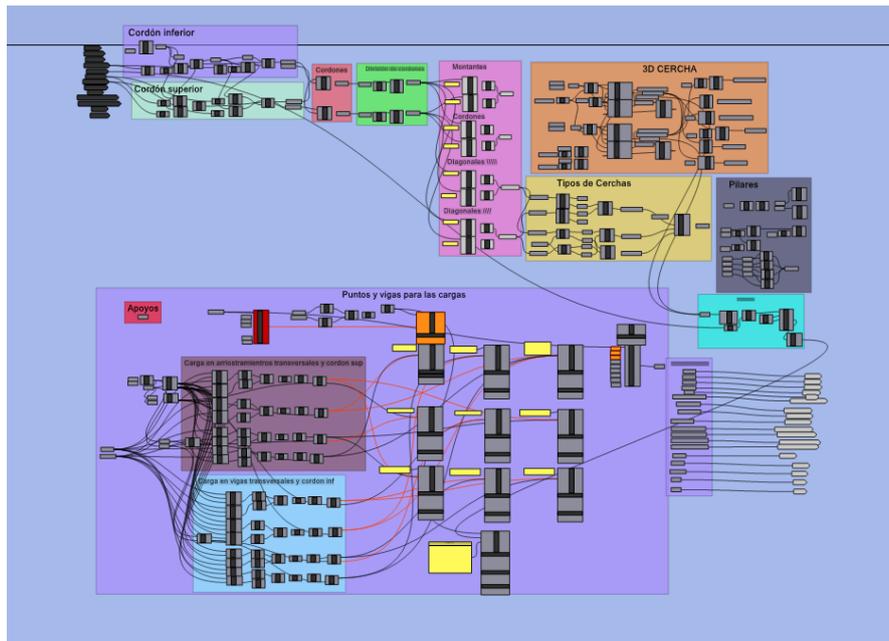


Ilustración 73. Algoritmo de la geometría dentro de clúster

3.4 DATOS DE MODELACIÓN

Para realizar la optimización estructural de estudio se diseñó un puente simplemente apoyado tomando en cuenta la longitud, división, altura y tipo de cercha del puente “La Independencia” ubicado sobre el río Blanco en la vía Quito – La independencia en la provincia de Pichincha.



Ilustración 74. Puente "La Independencia "

Fuente: (Guamán, 2014)

3.4.1 Descripción

- Longitud del puente: 72 metros
- Altura de la cercha: 8.5 metros
- Tipo de Cercha: Tipo Warren
- Divisiones: 12
- Altura de pilares: 6 metros
- Ancho del puente: 7 metros
- Cargas: Se coloca las cargas sobre el tablero el cual se encarga de distribuir las misma sobre las vigas transversales y el cordón inferior

La altura de pilares es un valor asumido para el diseño, en el valor del ancho del puente se utilizó las recomendaciones de las normativas de diseño que presenta el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP). Estas normativas nos recomiendan para dos carriles como mínimo un valor de 7 metros hasta 10 metros, cabe aclarar que estos valores pueden cambiar en diferentes puentes pues entra el criterio de diseño de cada ingeniero y la necesidad que se tenga.

3.4.2 Materiales

Para los casos de estudio se utilizó acero estructural A36.

3.4.3 Análisis de cargas

Los estados de carga fueron obtenidos de la normativa AASHTO LRFD para diseño de puentes y del Reglamento de Diseño y Construcción de Puentes para Vías de Comunicación de la MTOP.

3.4.3.1 Carga Viva

Según las normas utilizadas nos recomiendan que la carga viva vehicular de diseño de un puente de carretera esta entre 8.0 kN/m² a 9.0 kN/m², para este caso se toma en cuenta el valor de 8.00 kN/m².

3.4.3.2 Carga muerta

La carga muerta de un puente de 72 m de longitud, con una armadura tipo Warren con 12 divisiones, un ancho de 7 m, y utilizando perfiles HEB 1000 se obtiene:

Carga Muerta		
Descripcion	Valor	Unidad
Carga muerta total (Estructura meálica)	2.256	kN
Carga muerta por unidad de longitud	31.0	kN/m
Carga muerta por unidad de área	4.40	kN/m ²

Ilustración 75. Carga Muerta

3.4.4 Secciones Utilizadas

Las secciones que se utilizó para el diseño del puente son perfiles HEB, el catálogo a optimizar de estos elementos ya se encuentra definido en el programa.

Para el modelo inicial a analizar se utilizó los siguientes perfiles:

- Cordon Superior: HEB1000
- Cordon Inferior: HEB1000
- Diagonales: HEB1000
- Montantes: HEB1000
- Arriostramientos: HEB1000
- Pilares: HEB1000

3.4.5 Transformar unidades de carga de kN/m² a kN/m

Para transformar las unidades de las cargas vivas y cargas muertas en el caso de que colocar las cargas sobre las vigas transversales y sus cordones se utilizó el concepto de área tributaria para cada paño, es por eso que al ingresar las cargas estas se distribuyen de forma trapezoidal y triangular respectivamente debido a que se automatizó dentro del programa las fórmulas de área tributaria.

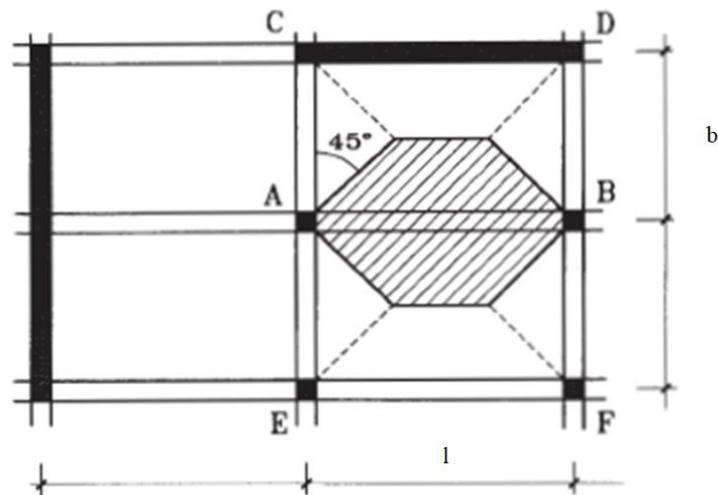


Ilustración 76 Área tributaria

$$q_T = \frac{W * b}{6} \left[3 - \left(\frac{b}{l} \right)^2 \right]$$

Ecuación 6. Fórmula para distribución trapezoidal

$$q_T = \frac{W * b}{3}$$

Ecuación 7. Fórmula para distribución triangular

Donde:

$$W = \text{Carga} \frac{kN}{m^2}$$

$$b = \text{base}$$

$l = ancho$

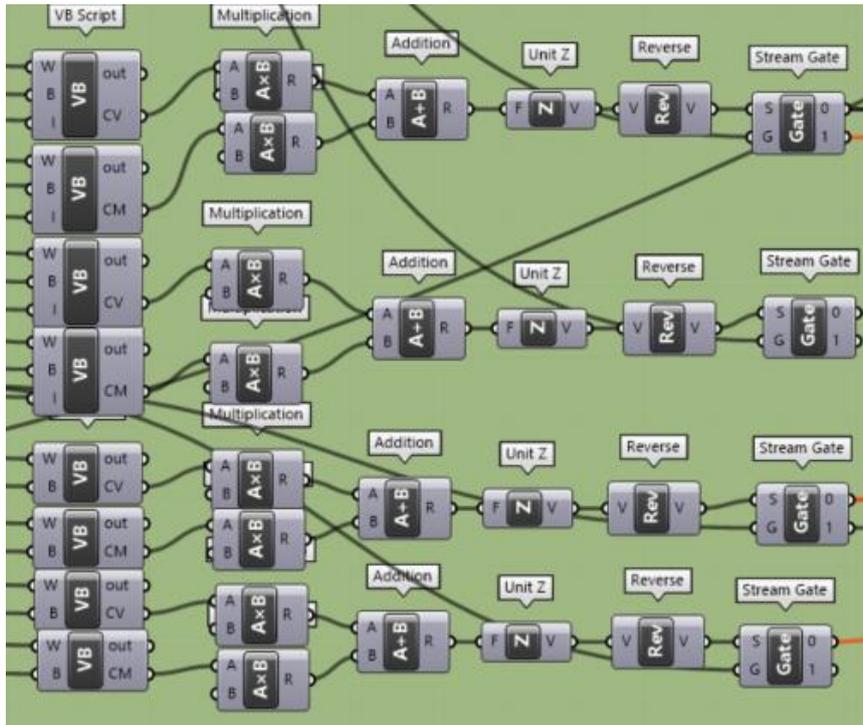
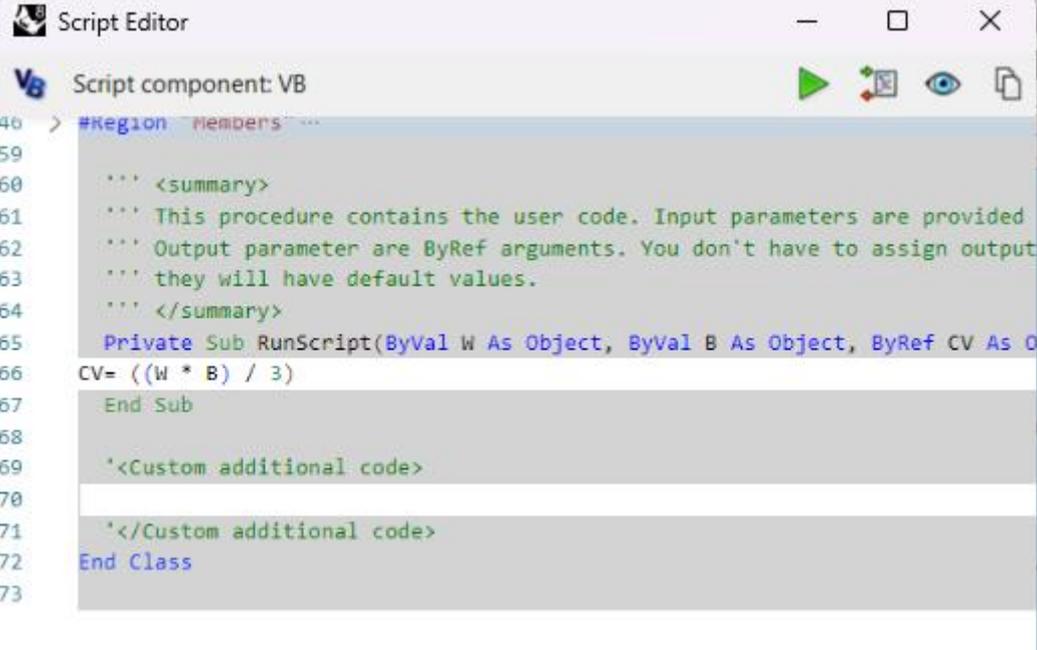


Ilustración 77. Algoritmo de automatización para distribución trapezoidal y triangular

```
Script Editor
Script component: VB
#Region Members ...
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
''' <summary>
''' This procedure contains the user code. Input parameters are provided
''' Output parameter are ByRef arguments. You don't have to assign output
''' they will have default values.
''' </summary>
Private Sub RunScript(ByVal W As Object, ByVal B As Object, ByVal I As Ob
CM = ((W * B) / 6) * (3 - ((B / I) ^ 2)) * 2
End Sub
'<Custom additional code>
'</Custom additional code>
End Class
```

Ilustración 78. Script Distribución Trapezoidal



```
Script Editor
Script component: VB
46 > #region members ...
59
60     ''' <summary>
61     ''' This procedure contains the user code. Input parameters are provided
62     ''' Output parameter are ByRef arguments. You don't have to assign output
63     ''' they will have default values.
64     ''' </summary>
65     Private Sub RunScript(ByVal W As Object, ByVal B As Object, ByRef CV As O
66     CV= ((W * B) / 3)
67     End Sub
68
69     '<Custom additional code>
70
71     '</Custom additional code>
72 End Class
73
```

Ilustración 79. Script Distribución Triangular

Cuando las cargas son colocadas sobre el tablero, el propio complemento “Mesh Load” se encarga de transformar cargas superficiales en cargas equivalentes de nodos o elementos.

3.5 Caso 1

Para empezar con la optimización estructural del modelo se obtuvo el desplazamiento y el peso total de la estructura lo cual se comparó con cada resultado de las optimizaciones.

- Masa inicial: 416.3024 Toneladas
- Desplazamiento: 6.51 cm

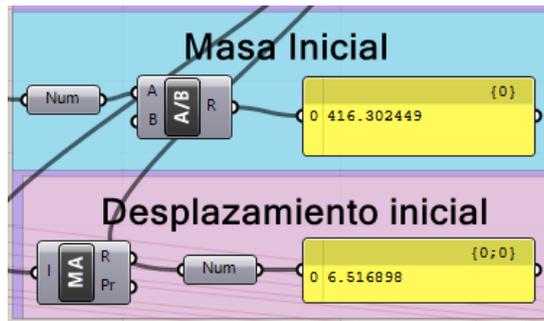


Ilustración 80. Valores iniciales de masa y desplazamiento

3.5.1 Optimización estructural con el Algoritmo Genético

Para esta primera optimización se usó el algoritmo genético Galápagos, tomando ciertas restricciones como que la deflexión máxima sea menor al valor que nos entregue la ecuación $\frac{L}{800}$ mencionada en el código AASTHO y los radios de utilización no superen el 80%.

- La optimización incluye las condiciones de Pandeo Local, Pandeo General y Pandeo Lateral Torsional.
- En el proceso de optimización, se consideraron todos los elementos estructurales de la cercha, excepto el tablero.
- El objetivo de la optimización es reducir el peso de la estructura, asegurando al mismo tiempo que la deflexión no exceda el límite máximo permitido.
- La utilización máxima se estableció en un 80 % o menos.

El complemento Galápagos se usó con el fin de encontrar perfiles cambiar los perfiles ingresados el modelo inicial.

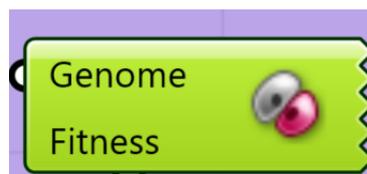


Ilustración 81. Bloque de comando Galápagos

Como se observa en la ilustración del complemento Galápagos, este utiliza dos parámetros los cuales se debe definir correctamente, los parámetros son Fitness y Genome. Fitness se define como el objetivo que se desea alcanzar, mientras que Genome son las variables que se van a modificar hasta lograr el objetivo de la optimización. En este caso, estamos tratando con un objetivo único, por lo que necesitamos combinar todas las restricciones en una sola fórmula para que el algoritmo entienda qué debe optimizar. El objetivo es reducir el peso de la estructura, asegurarse de que el desplazamiento no exceda los límites establecidos y mantener los radios de utilización lo más cerca posible del 80%, sin superarlo. Para lograr esto, se emplea una fórmula que integra todos estos aspectos en el parámetro Fitness, facilitando así la optimización de la estructura.

Los parámetros que se conectan con “Genome” son las variables donde se encuentran todos los perfiles que el algoritmo ira cambiando y probando la mejor configuración según las condiciones ingresadas.



Ilustración 82. Variables conectadas a “Genome”

Para configurar el parámetro Fitness en Galápagos, se empleó el componente "Evaluate Box", en el cual se definieron cuatro parámetros clave. Estos parámetros permiten la entrada de la función que contiene la fórmula del problema a resolver. El primer parámetro

es la variable "m", que representa la masa de la estructura. La segunda variable es el desplazamiento "d", programado en Visual Basic (ver anexo 3) para asegurar que no exceda $L/800$. Este límite se establece para permitir que el programa itere sin superar el umbral; si se supera, el valor se ajusta a 1000, provocando que el algoritmo reinicie la iteración automáticamente. La última variable, "r", se refiere a los radios de utilización (ver anexo 4). Se programó de manera que, si en la lista de radios de utilización hay un valor superior a 0.8, este se reemplace por 1000. Luego, se diseñó el proceso para que, si algún valor en la lista es 1000, toda la lista se ajuste a ese valor (ver anexo 5); de lo contrario, se mantiene el valor original del radio de utilización. Este enfoque se implementó para evitar que el algoritmo genético, que optimiza un único objetivo, se confunda.

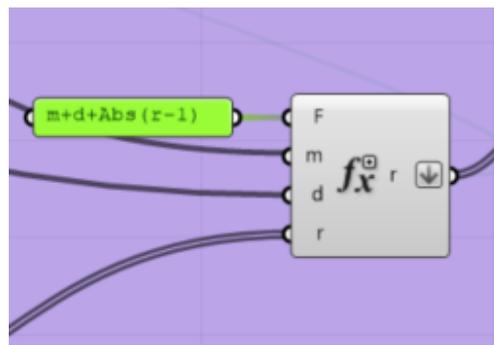


Ilustración 83. Componente Evaluate para generar un objetivo simple

Esta función objetivo es clave para la optimización porque se logra integrar el desplazamiento, la masa y los radios de utilización, lo cual es esencial cuando se utiliza Galápagos. Dado que el algoritmo genético de Galápagos está diseñado para optimizar un único objetivo, considerar estos factores por separado podría hacer que el algoritmo tenga dificultades para decidir cuál debe priorizar, lo que podría dar lugar a resultados inconsistentes.

Al combinar estos parámetros en una sola ecuación, el algoritmo es capaz de evaluar todos los aspectos importantes de manera equilibrada. Así, la optimización no solo se enfoca

en reducir la masa de la estructura, sino también en mantener el desplazamiento dentro de los límites establecidos y asegurar que los radios de utilización funcionen eficientemente, sin superar el 100% de su capacidad. La función que se utiliza para la siguiente fórmula:

$$m+d+Abs(r-1)$$

Ilustración 84. Fórmula para la función objetivo

```

21
22 > #Region "Utility functions" ...
45
46 > #Region "Members" ...
59
60 ''' <summary>
61 ''' This procedure contains the user code. Input parameters are ByRef arguments. Output parameters are ByRef arguments.
62 ''' Output parameter are ByRef arguments. You must specify their default values.
63 ''' they will have default values.
64 ''' </summary>
65 Private Sub RunScript(ByVal Desp As Double, ByVal L As Double, ByRef A As Double)
66 If Desp > (L / 800 * 100) Then
67 A = 1000
68 Else
69 A = Desp
70 End If
71 End Sub
72

```

Ilustración 85. Código para delimitar desplazamiento

```

59
60 ''' <summary>
61 ''' This procedure contains the user code. Input parameters are ByRef arguments. Output parameters are ByRef arguments. You must specify their default values.
62 ''' Output parameter are ByRef arguments. You must specify their default values.
63 ''' they will have default values.
64 ''' </summary>
65 Private Sub RunScript(ByVal lista1 As Double, ByRef A As Double)
66 If lista1 > 0.8 Then
67 lista1 = 1000
68 End If
69 print(lista1)
70 End Sub
71
72 '<Custom additional code>

```

Ilustración 86. Código de programación para radio de utilización

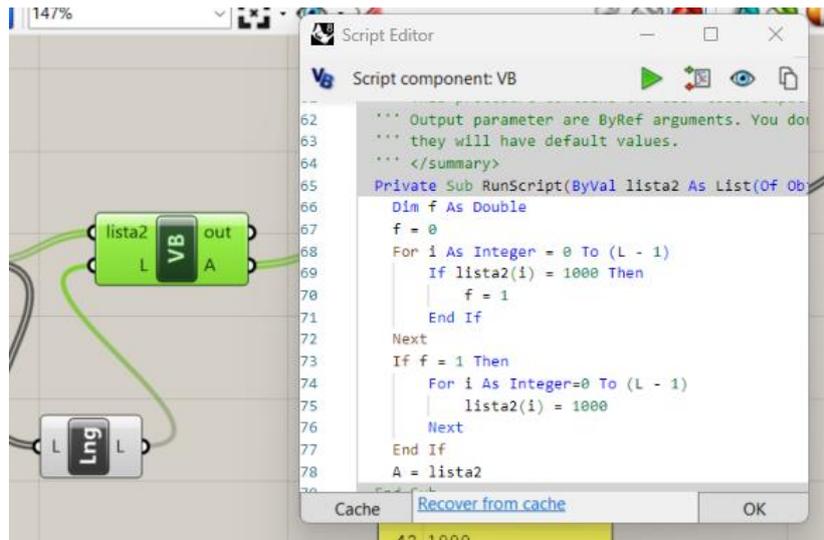


Ilustración 87. Código de programación para iterar el el radio de utilización

Una vez definido los scripts de programación se unen al box “Evaluate” donde ya se encuentra definida la ecuación a utilizar para la función objetivo. Los resultados de esta función se muestran en un panel de datos.

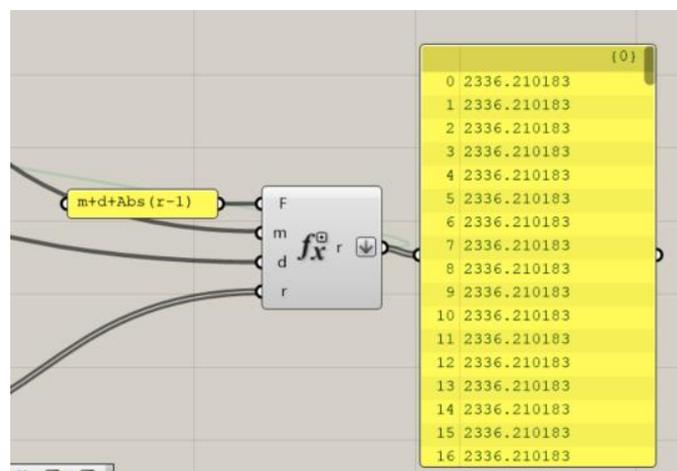


Ilustración 88. Resultados de función objetivo

3.5.2 Resultados de la primera optimización

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante el algoritmo genético galápagos:

- Cordón Superior: HEB800

- Cordón Inferior: HEB260
- Diagonales: HEB900
- Montantes: HEB700
- Arriostramiento longitudinal superior: HEB800
- Arriostramiento longitudinal inferior: HEB650
- Vigas transversales: HEB700
- Arriostramiento transversal: HEB800
- Pilares: HEB900

El peso total obtenido del a optimización es de 326.78 Toneladas y una deflexión de 8.77cm. Es importante tomar en cuenta que el tiempo que tardo el componente en hacer la optimización es de 4 horas debido a la gran cantidad de variables el genoma tenía que analizar

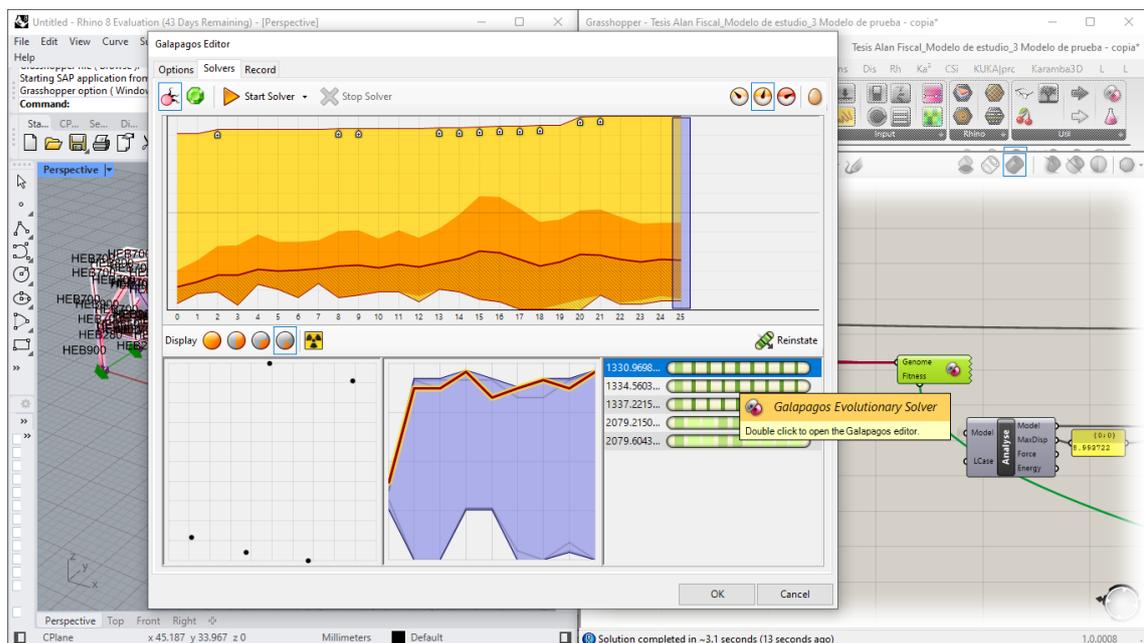


Ilustración 89. Algoritmo genético Galápagos Optimización estructural

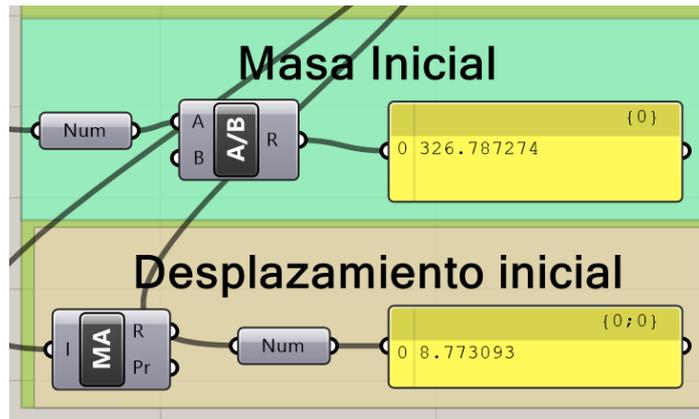


Ilustración 90. Valores obtenidos de Masa y desplazamiento de la optimización

3.6 Caso 2

3.6.1 Optimización de tamaño

Para este caso se implementó el uso del componente "Optimize Cross Section" para realizar la optimización de la estructura. Este componente carga la biblioteca completa de perfiles disponibles para cada elemento estructural. El "Optimize Cross Section" puede evaluar la capacidad de carga de las secciones transversales que componen la cercha y permite limitar la deflexión máxima de la estructura como un parámetro específico. Además, garantiza que los esfuerzos de flexión no excedan el límite elástico del material, de acuerdo con los parámetros definidos por el usuario.

El "Optimize Cross Section" selecciona la sección transversal adecuada para cada elemento, asegurando que su capacidad de carga sea suficiente para todos los casos de carga analizados. Karamba3D sigue un procedimiento específico para llevar a cabo esta tarea::

- Calcula las fuerzas en secciones definidas a lo largo de todas las vigas, utilizando la sección transversal inicial.
- Para cada elemento o grupo de elementos, el complemento selecciona primera opción dentro de la familia.

- Si no se requieren ajustes o se alcanza el número máximo de iteraciones, el algoritmo se detiene. De lo contrario, vuelve al primer paso utilizando las secciones transversales seleccionadas en el segundo paso.

En otras palabras, el algoritmo sigue una secuencia de manera ascendente pues comienza probando desde el primer perfil que tiene la familia de secciones transversales y continúa hasta encontrar una que tenga una utilización menor al valor preestablecido, que en este caso es el 80%. Una vez llegado a la seguridad estructural necesaria, Karamba3D verifica si la deflexión máxima establecida se cumple.

3.5.2 Resultados de la segunda optimización

Los resultados de esta optimización se obtuvieron para cada uno de los diferentes tipos de elementos que tenemos en la estructura:

- Condón superior en la parte externa de la estructura: HEB100
- Cordón superior en la parte interna de la estructura: HEB1000
- Montantes: Se recomienda observar la ilustración pues los perfiles usados son HEB100, HEB120, HEB140, HEB160, HEB180, HEB260, HEB280, HEB300
- Diagonales: Se recomienda observar la ilustración pues los perfiles usados son HEB 1000, HEB 340, HEB400, HEB220, HEB450, HEB700, HEB180, HEB100, HEB500
- Cordón inferior: Se recomienda observar la ilustración pues los perfiles usados son HEB280, HEB220, HEB600, HEB340, HEB320, HEB1000, HEB360, HEB800, HEB650, HEB300
- Pilares: HEB1000
- Arriostramiento longitudinal inferior y superior: HEB100
- Arriostramiento transversal: HEB100

- Vigas transversales: Se recomienda observar la ilustración pues los perfiles usados son HEB240, HEB340, HEB320, HEB400, HEB500, HEB650, HEB200

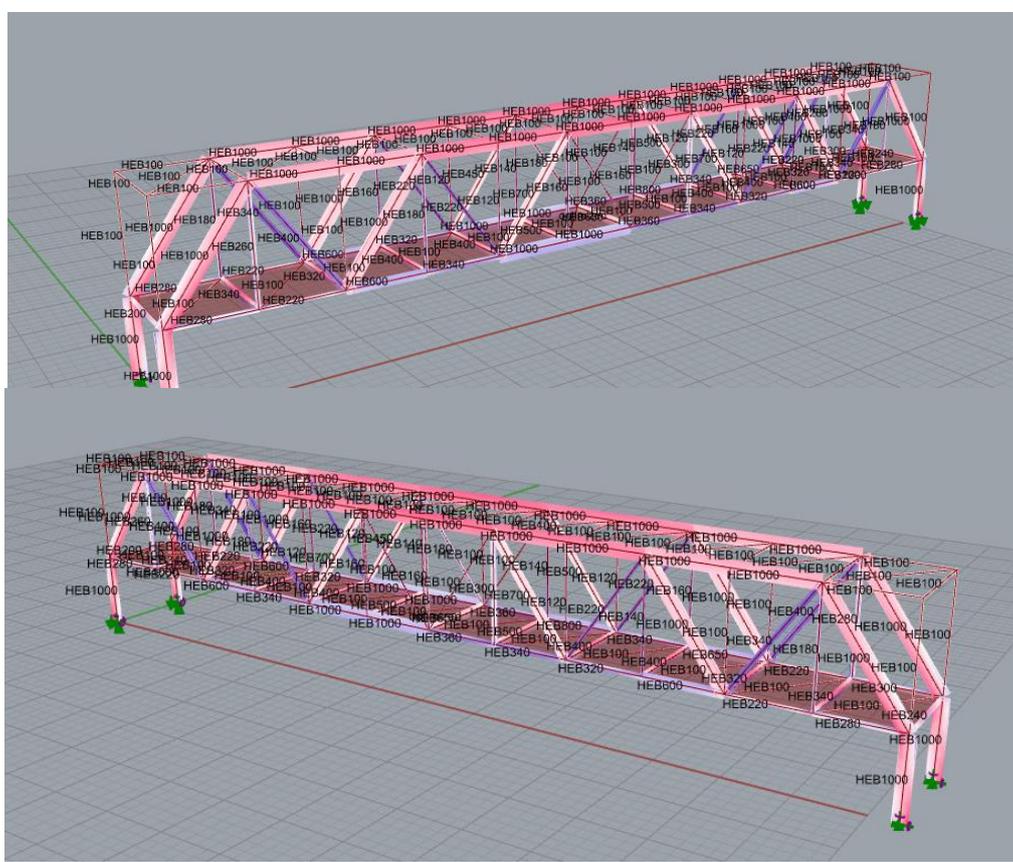


Ilustración 91. Perfiles obtenidos de la segunda optimización

Como resultados nos entrega un peso total de 183.37 Toneladas y una deflexión igual a 8.95 cm.

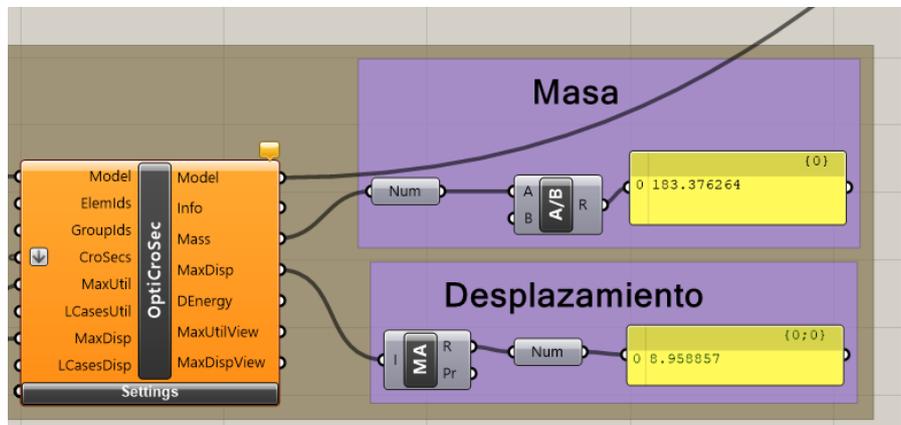


Ilustración 92. Masa y desplazamiento obtenido luego de la optimización

3.7 Caso 3

3.7.1 Optimización Topológica

En la tercera y última optimización se usó el complemento "Optimize Cross Section" combinado con el algoritmo genético Galápagos, la variable Genome se unió a las divisiones y la altura del puente con el fin de obtener menos elementos. En el parámetro fitness, se mantiene la función objetivo de la primera optimización, mientras que el parámetro genoma se conecta los sliders de altura y cantidad de divisiones.

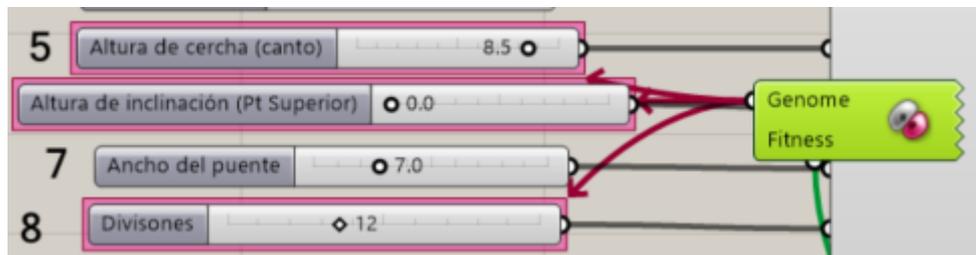


Ilustración 93. Sliders que el parámetro Genomas cambia hasta encontrar la mejor solución

3.7.1 Resultados de la tercera optimización

Los resultados de esta optimización se obtuvieron para cada uno de los diferentes tipos de elementos que tenemos en la estructura:

- Condón superior en la parte externa de la estructura: HEB100.
- Cordón superior en la parte interna de la estructura: HEB1000.
- Montantes: Se recomienda observar la ilustración pues los perfiles usados son HEB100, HEB400, HEB240, HEB180, HEB450.
- Diagonales: Se recomienda observar la ilustración pues los perfiles usados son HEB1000, HEB200, HEB220, HEB160, HEB120, HEB140
- Cordón inferior: Se recomienda observar la ilustración pues los perfiles usados son HEB1000, HEB600, HEB550, HEB650
- Pilares: HEB1000

- Arriostramiento longitudinal inferior: HEB100
- Arriostramiento longitudinal superior: HEB100, HEB120, HEB140
- Arriostramiento transversal: HEB100
- Vigas transversales: Se recomienda observar la ilustración pues los perfiles usados son HEB260, HEB360, HEB400, HEB450, HEB220

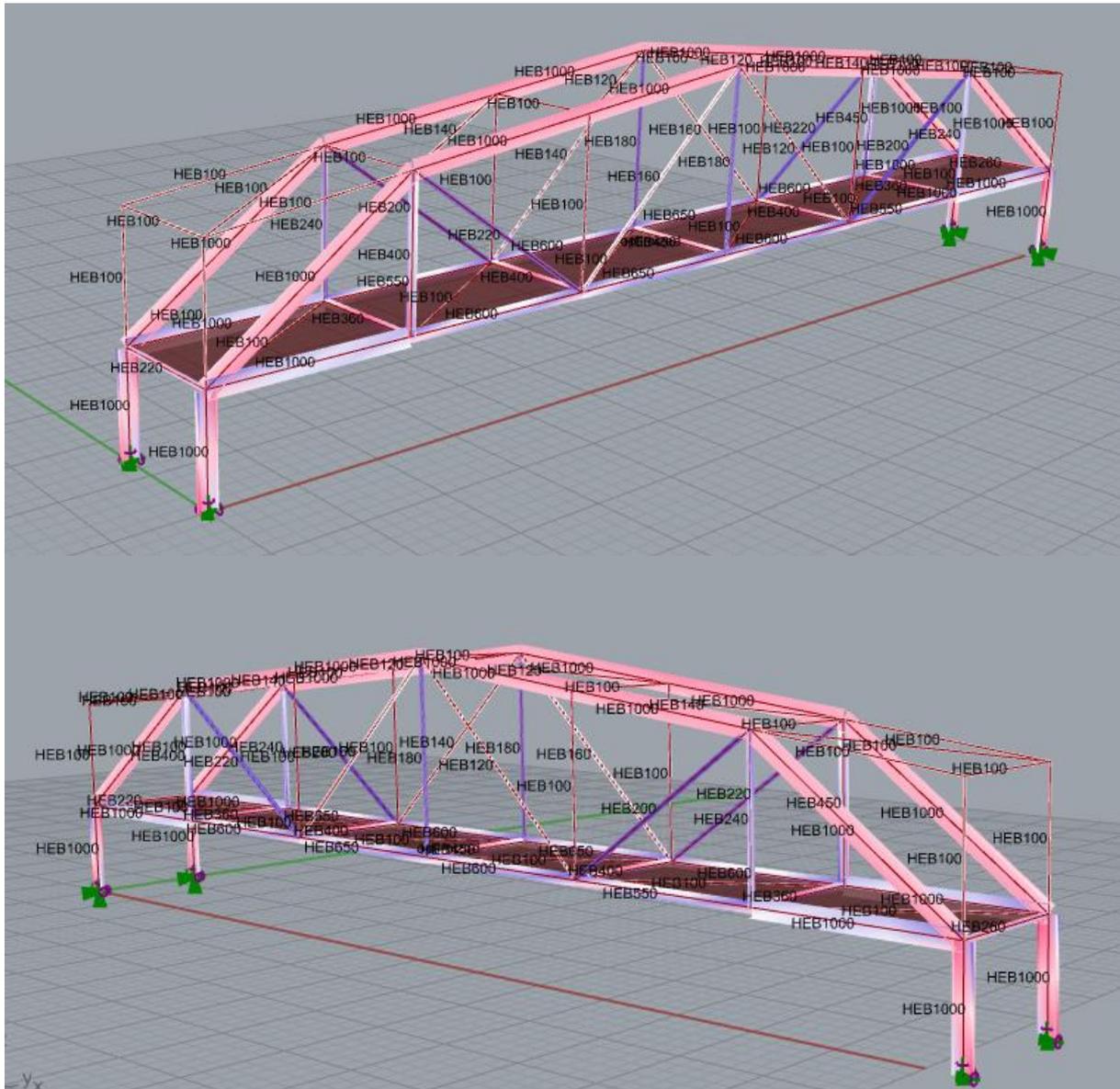


Ilustración 94. Perfiles obtenidos en la tercera optimización

En este caso el programa redujo el número de divisiones pues pasamos del valor inicial de 12 a 6, eliminando montantes y diagonales. La altura de la cercha se redujo de 8.50 m a 7.1 m, en

el centro de la luz la altura aumento 4.1 m dejando como resultado la siguiente forma para el puente.

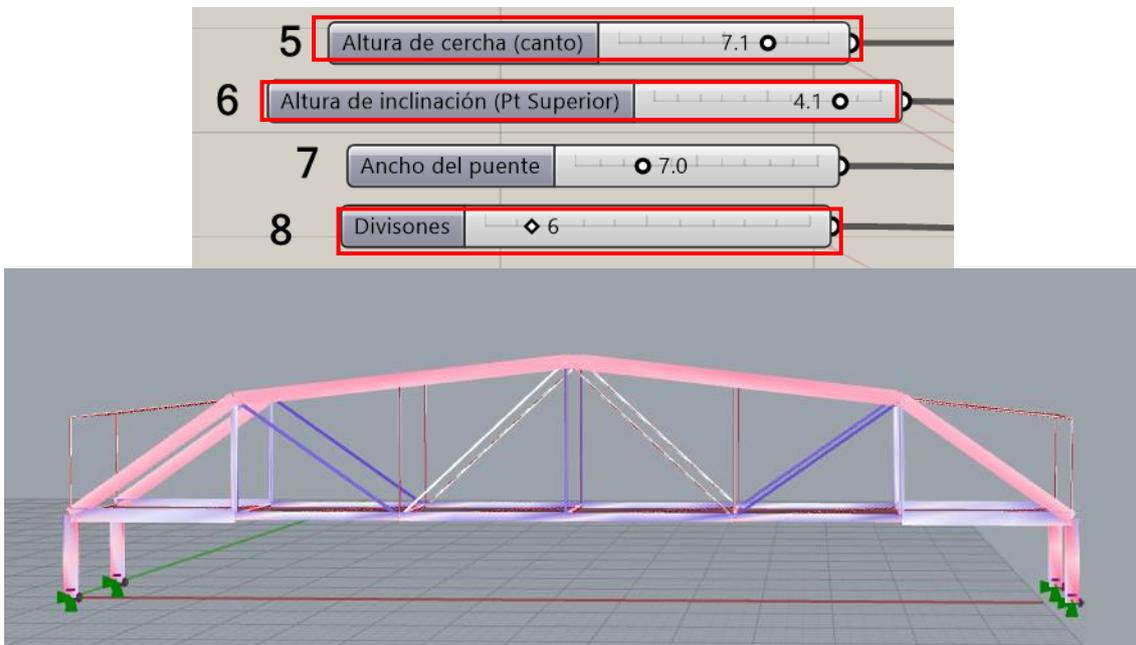


Ilustración 95. Optimización Topológica

En cuanto a la los resultados de optimización nos entregó un peso total de 157.38 Toneladas y un desplazamiento igual a 8.44 cm.

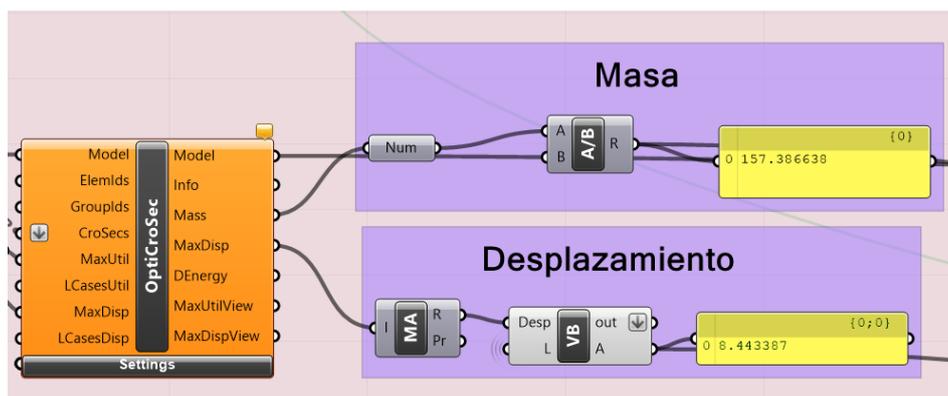


Ilustración 96. Resultados de Masa y desplazamiento

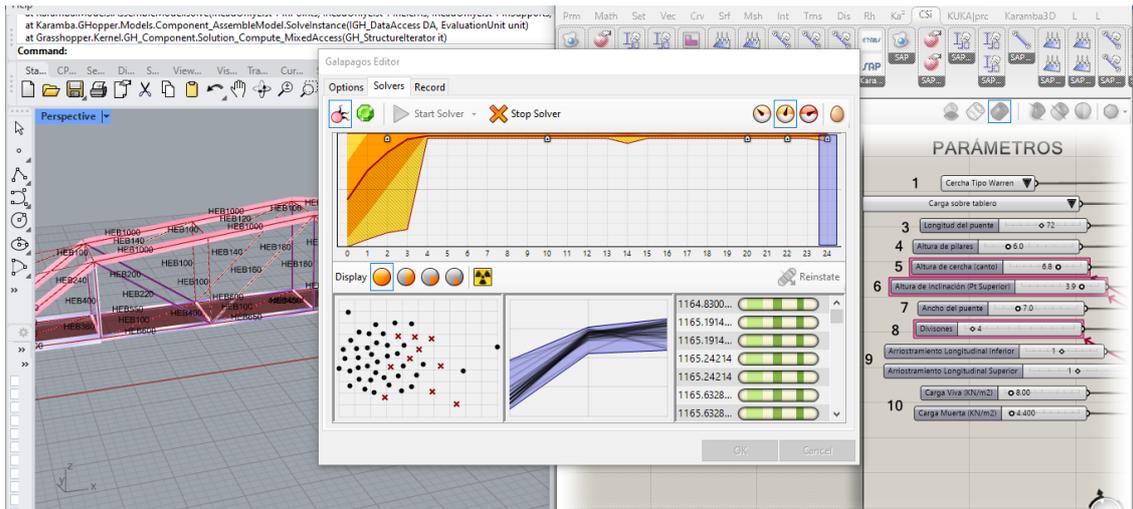


Ilustración 97. Algoritmo genético evolucionando hasta encontrar la solución más optima

3.8 Bloque para exportar el modelo a Etabs/Sap2000

Al conseguir los resultados de las tres optimizaciones, se conectó al complemento GeometryGym el cual nos permite exportar el modelo realizado desde Grasshopper hacia Etabs o Sap2000, esto se hace con el fin de comprobar que los resultados de la optimización sean confiables.

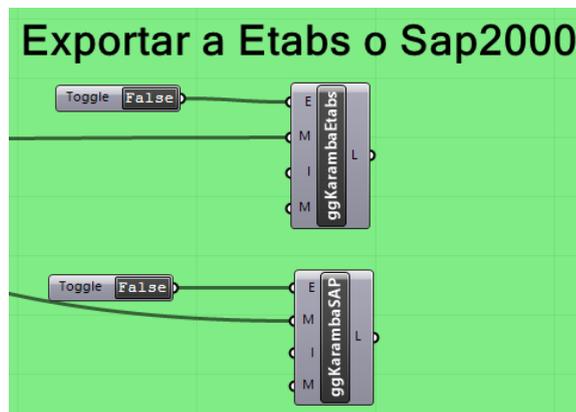


Ilustración 98. Complemento GeometryGym para exportar de Karamba a Etabs/Sap2000

El componente que nos permite exportar tiene parámetros de entrada donde se conecta el modelo de Karamba3D y un Boolean Toggle que al ser activado abre el programa ya sea Etabs o Sap2000

4. CAPITULO 4 (RESULTADOS Y ANÁLISIS)

La modelación paramétrica es una herramienta clave en el diseño y la optimización de la cercha que conforma las tres geometrías tipo cercha para puentes simplemente apoyados. Este enfoque permite definir con precisión la geometría de estas estructuras desde las primeras etapas del proyecto, cuando aún es posible realizar ajustes. Gracias a los parámetros detallados, el programa ofrece una operatividad sencilla y una automatización instantánea, con un análisis estructural integrado en el mismo entorno. Al modificar los parámetros, se logra una simulación estructural rápida, lo que resulta especialmente útil para la optimización de puentes con armaduras tipo cercha, superando en velocidad y eficiencia a otros programas tradicionales.

En los 3 casos de estudio realizados la optimización se definió la misma geometría que pertenece a una cercha Warren con ciertos parámetros que en los tres casos son iguales. Así mismo se ingresó perfiles HEB1000 los cuales son los más grandes dentro del catálogo para que el algoritmo nos pueda dar nuevas soluciones, el algoritmo usado en el primer caso es Galápagos. Dado que este algoritmo tiene un objetivo simple, fue necesario establecer restricciones específicas de radios de utilización y desplazamientos máximos, en este caso las restricciones fueron programadas mediante scripts el complemento Visual Basic, unificando todo en una sola función para que el algoritmo no se confunda y nos entregue un resultado óptimo. Los resultados mostraron una significativa reducción del peso de la estructura, lo que demuestra que la optimización de perfiles mediante algoritmos genéticos puede ofrecer resultados altamente satisfactorios. Así mismo se respetó la deflexión máxima para que no sobrepase lo permitido por la norma, hay que entender que para la deflexión obtenida del modelo a optimizar siempre va a ser más baja que las obtenidas en la optimización. Esto se debe a que el modelo inicial se compone de secciones grandes que restringen el desplazamiento.

El segundo caso de estudio utilizó el componente "Optimize Cross Section" para la optimización de la misma estructura tipo Warren en el puente simplemente apoyado. Con los mismos parámetros de diseño iniciales, el proceso resultó más rápido y eficiente, logrando una reducción aún mayor del peso, en cuando a los perfiles este presenta una advertencia donde nos indica que algunos perfiles alcanzaron su tamaño máximo, aun así, cumple con el desplazamiento máximo. El componente "Optimize Cross Section" analiza y entrega un perfil por cada elemento de la estructura, es por ello que en los cordones, diagonales y montantes nos entrega una variedad de perfiles diferentes, para la primera comparativa se coloca todos los perfiles que nos entrega este complemento para después aterrizar estos resultados a un caso real donde se implementó algunos criterios de diseño ingenieriles.

Para el tercer caso de estudio, se realizó una optimización topológica de la estructura. Esta optimización combino tanto box Optimize Cross Section con el algoritmo genético de Galápagos. Este enfoque permitió alcanzar resultados más eficientes que en los casos anteriores, reduciendo secciones y peso, eliminando elementos innecesarios, y minimizando la deflexión. Los radios de utilización que se obtuvo están más cerca al valor de 80% ingresa cumpliendo con los límites de desplazamiento, asegurando así que el puente simplemente apoyado diseñado sea seguro, ligero y eficiente. Al usar el Optimize Cross Section en esta optimización también nos entrega una variedad de perfiles para sus elementos, aunque si bien es cierto no son muchos perfiles los que cambian manteniendo una igualdad en sus conexiones en esta también se aplicara el criterio mencionado en el casi dos para realizar la comparativa.

		Caso1	Caso 2	Caso3
		Galápagos	Optimize Cross Section	Galápagos+Optimize Cross Section
	Modelo Inicial	Optimización 1	Optimización 2	Optimización 3
Masa (T)	416.3	362.78	183.37	157.38
Desplazamiento (cm)	6.51	8.77	8.95	8.44
Cordón Superior	HEB1000	HEB800	HEB 100 Y HEB1000	HEB 100 Y HEB1000
Cordón Inferior	HEB1000	HEB260	HEB280, HEB220, HEB600, HEB340, HEB320, HEB1000, HEB360, HEB800, HEB650, HEB300	HEB1000, HEB600, HEB550, HEB650
Diagonales	HEB1000	HEB900	HEB 1000, HEB 340, HEB400, HEB220, HEB450, HEB700, HEB180, HEB100, HEB500	HEB 1000, HEB 200, HEB220, HEB160, HEB120, HEB140
Montantes	HEB1000	HEB700	HEB100, HEB120, HEB140, HEB160, HEB180, HEB260, HEB280, HEB300	HEB100, HEB400, HEB240, HEB180, HEB450
Arriostramiento longitudinal superior	HEB1000	HEB800	HEB100	HEB100, HEB120, HEB140
Arriostramiento longitudinal inferior	HEB1000	HEB650	HEB100	HEB100
Vigas transversales	HEB1000	HEB700	HEB240, HEB340, HEB320, HEB400, HEB500, HEB650, HEB200	HEB260, HEB360, HEB400, HEB450, HEB220
Arriostramientos transversales	HEB1000	HEB800	HEB100	HEB100
Pilares	HEB1000	HEB900	HEB1000	HEB1000
# de elementos	154	154	154	82

Ilustración 99. Tabla comparativa de las optimizaciones realizadas

La reducción de pesos tomando en cuenta como punto de partida el modelo inicial se tiene que a comparación del caso 1 se presenta una disminución del 13%, entre el caso 1 y el caso 2 se obtuvo una reducción del 49.45%, en el caso final a comparación del caso 2 se obtuvo un 14.17% de reducción de peso, además en este caso también se logró pasar de 154 elementos a 82 lo que representa el 47% que se eliminaron de la estructura del puente inicial. También se debe tomar en cuenta que cambio la altura de la cercha disminuyendo 1.4 m del valor inicial y aumentado la altura en el centro 4.1 m. Estos datos obtenidos de la tercera optimización nos muestran como la optimización más optimo de entre los tres casos realizados.

Realizado la comparación con los modelos optimizados ahora se usó los perfiles entregados por el caso de optimización dos y tres, con el fin de crear un modelo más real hablando en temas constructivos. Cabe aclarar que la selección de los perfiles esta totalmente

ligada al criterio del diseñador es por eso que con la ayuda del algoritmo se ingreso los nuevos perfiles para obtener su desplazamiento y peso.

	Caso 2		Caso3	
	Optimize Cros Section		Galápagos+Optimize Cross Section	
	Optimización 2	Caso constructivo	Optimización 3	Caso constructivo
Masa (T)	183.37	231.88	157.38	230.66
Desplazamiento (cm)	8.95	8.6	8.44	6.61
Cordón Superior	HEB 100 Y HEB1000	HEB1000	HEB 100 Y HEB1000	HEB1000
Cordón Inferior	HEB280, HEB220, HEB600, HEB340, HEB320, HEB1000, HEB360, HEB800, HEB650, HEB300	HEB1000	HEB1000, HEB600, HEB550, HEB650	HEB1000
Diagonales	HEB 1000, HEB 340, HEB400, HEB220, HEB450, HEB700, HEB180, HEB100, HEB500	HEB500	HEB 1000, HEB 200, HEB220, HEB160, HEB120, HEB140	HEB1000
Montantes	HEB100, HEB120, HEB140, HEB160, HEB180, HEB260, HEB280, HEB300	HEB300	HEB100, HEB400, HEB240, HEB180, HEB450	HEB450
Arriostramiento longitudinal superior	HEB100	HEB100	HEB100, HEB120, HEB140	HEB100
Arriostramiento longitudinal inferior	HEB100	HEB100	HEB100	HEB100
Vigas transversales	HEB240, HEB340, HEB320, HEB400, HEB500, HEB650, HEB200	HEB400	HEB260, HEB360, HEB400, HEB450, HEB220	HEB450
Arriostramientos transversales	HEB100	HEB100	HEB100	HEB100
Pilares	HEB1000	HEB1000	HEB1000	HEB1000
# de elementos	154		82	

Ilustración 100. Modelo optimizado vs Modelo adaptado a su construcción

Los resultados que presenta esta comparación son importantes para entender la utilidad y cómo funcionan los complementos, pues este busca la solución más optima cambiando cada elemento sin importar que se junten perfiles pequeños con perfiles grandes, como se puede observar en la ilustración los desplazamientos disminuyeron, pero el peso la estructura aumento al colocar el mismo perfil tanto sobre cordones superiore e inferiores.

Una vez terminado esta comparación se, se procedió a comprobar la confiabilidad de los datos de optimización obtenidos con el algoritmo creado. Para corroborar estos datos se exporto el modelo realizado mediante un complemento hacia el programa Etabs. La comparación de resultados se muestra a continuación.

Etabs	Algoritmo Creado
Deflexión Maxima	
8.56 cm	8.44 cm

Ilustración 101. Comparación de deflexiones obtenidas

	# de Elemento		Fuerzas Axiales (KN)	
	Etabs	Karamba	Etabs	Algoritmo Creado
Pilares	C15	38	-2180.900	-2252.690
	C16	39	-2194.900	-2182.570
	C17	40	-2239.009	-2252.690
	C18	41	-2136.770	-2182.570

Ilustración 102. Etabs vs Karanaba3D, comparación de fuerzas axiales (pilares)

	# de Elemento		Fuerzas Axiales (KN)	
	Etabs	Karamba	Etabs	Algoritmo Creado
Cordón Inf	B1	0	1726.743	1767.192
	B2	1	1612.141	1684.552
	B3	2	1723.086	1824.460
	B4	3	1634.528	1702.270
	B5	4	2696.649	2787.790
	B6	5	2660.479	2708.261
	B7	6	2661.726	2744.273
	B8	7	2695.354	2741.422
	B9	8	1639.503	1727.101
	B10	9	1729.301	1754.921
	B11	10	1616.679	1709.577
	B12	11	1723.556	1719.545

Ilustración 103. Etabs vs Karamba3D, comparación de fuerzas axiales (cordón inf)

	# de Elemento		Fuerzas Axiales (KN)	
	Etabs	Karamba	Etabs	Algoritmo Creado
Cordón Sup	B13	12	1.233	3.627
	B14	13	0.124	0.094
	B15	14	-3443.978	-3454.081
	B16	15	-3379.838	-3373.031
	B17	16	-3415.801	-3419.095
	B18	17	-3399.102	-3397.566
	B19	18	-3401.045	-3404.042
	B20	19	-3416.298	-3430.154
	B21	20	-3381.696	-3372.483
	B22	21	-3444.678	-3468.298
	B23	22	0.122	0.101
	B24	23	1.123	2.715

Ilustración 104. Etabs vs Karamba3D, comparación de fuerzas axiales (cordón sup)

	# de Elemento		Fuerzas Axiales (KN)	
	Etabs	Karamba	Etabs	Algoritmo Creado
Montantes	C1	24	-0.312	-0.718
	C2	25	648.205	657.536
	C3	26	48.673	65.525
	C4	27	730.441	762.940
	C5	28	51.801	53.764
	C6	29	629.237	642.766
	C7	30	0.313	0.577
	C8	31	0.342	0.705
	C9	32	625.558	626.356
	C10	33	51.704	50.083
	C11	34	730.723	707.676
	C12	35	50.726	29.063
	C13	36	650.959	619.939
	C14	37	-0.282	-0.644

Ilustración 105. Etabs vs Karamba3D, comparación de fuerzas axiales (montantes)

	# de Elemento		Fuerzas Axiales (KN)	
	Etabs	Karamba	Etabs	Algoritmo Creado
Arriostramiento long inf	B25	42	17.495	13.188
	B26	43	40.878	39.426
	B27	44	42.973	40.545
	B28	45	43.036	50.141
	B28	46	40.897	44.778
	B30	47	18.229	12.580
Arriostramiento long Sup	B37	54	-1.363	-3.915
	B38	55	-29.004	-34.910
	B39	56	-26.363	-32.130
	B40	57	-26.334	-40.429
	B41	58	-29.112	-43.497
	B42	59	-1.239	-3.085
Viga Transversale	B50	68	-18.470	-13.730
	B31	48	-7.123	-3.444
	B32	49	-20.661	-19.718
	B33	50	-21.423	-20.753
	B34	51	-20.759	-22.764
	B35	52	-6.801	-3.484
	B36	53	-26.792	-26.171
Arriostramiento trans Sup	B49	67	0.259	0.095
	B43	60	0.877	0.635
	B44	61	12.867	15.899
	B45	62	13.269	15.948
	B46	63	13.040	20.235
	B47	64	0.144	1.078
	B48	65	0.179	0.275

Ilustración 106. Etabs vs Karamba 3D, comparación de fuerzas axiales (arriostramientos y vigas)

	# de Elemento		Fuerzas Axiales (KN)	
	Etabs	Karamba	Etabs	Algoritmo Creado
Diagonales	D1	74	1224.463	1187.978
	D2	71	-0.462	-7.643
	D3	75	-2927.207	-3033.833
	D4	72	-2993.268	-3070.650
	D5	76	-11.560	-21.260
	D6	73	1209.025	1167.934
	D7	80	1211.729	1170.496
	D8	77	-10.314	-20.026
	D9	81	-2991.396	-3069.819
	D10	78	-2922.323	-3029.206
	D11	82	-2.511	-9.923
	D12	79	1216.429	1180.502

Ilustración 107. Etabs vs Karamba 3D, comparación de fuerzas axiales (diagonales)

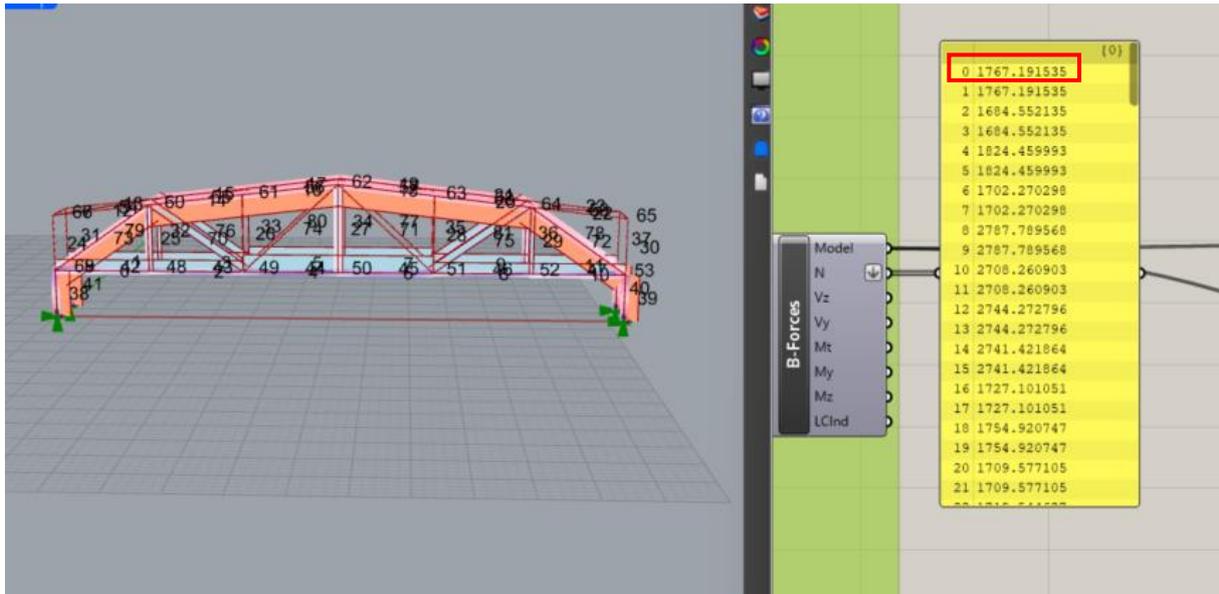


Ilustración 108. Fuerzas axiales obtenidas del algoritmo (kN)

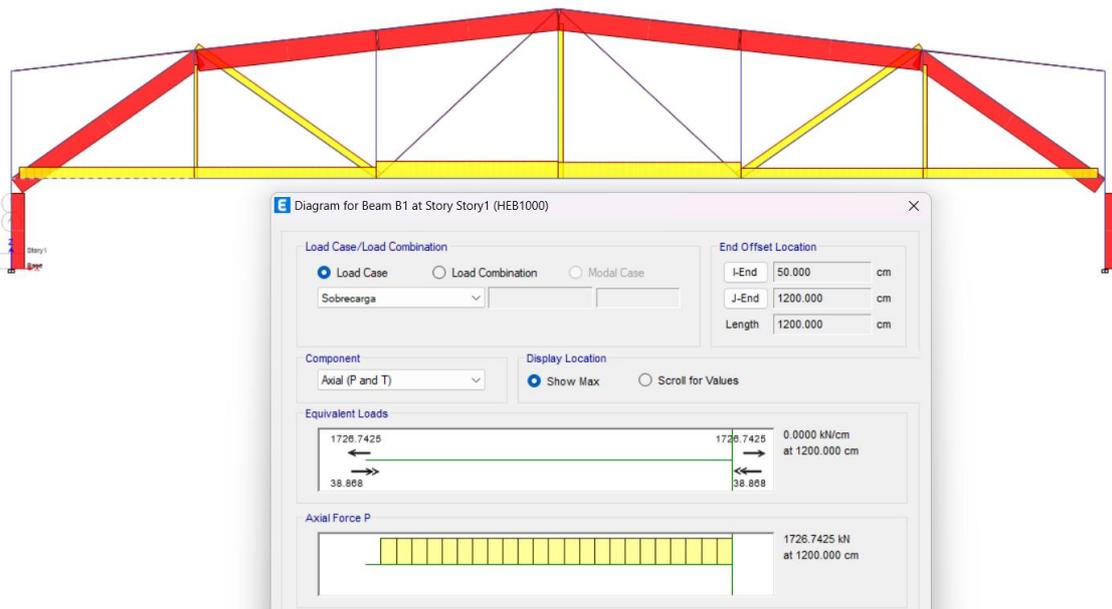


Ilustración 109. Fuerzas axiales obtenidas del programa Etabs (kN)

5. CAPITULO 5 (CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES)

Los casos analizados en esta investigación abren una nueva puerta al estudio de la integración de algoritmos paramétricos, análisis estructural y optimización estructural mediante algoritmos genéticos en un solo entorno. Es notable como estas nuevas formas de

modelar estructuras muestran una gran eficiencia y potencial al ahorrar tiempo de los ingenieros en volver a modelar la estructura.

Los resultados obtenidos, muestran un porcentaje 62.2 % de reducción de peso entre el modelo inicial y la optimización del tercer caso. Este valor supera las expectativas esperadas en los resultados del trabajo mostrando las capacidades y ventajas que brindan estas herramientas aplicadas al diseño estructural.

En términos de optimización, cada caso ocupó su respectivo tiempo para analizar las variables y entregar el mejor resultado posible, para el caso uno en el que se usó el algoritmo genético de Galápagos, este presentó problemas para encontrar un resultado en los primeros 20 minutos pues el genoma tenía que buscar la solución entre 9 variables que representan los perfiles que usa la geometría. Estas variables a su vez tenían que buscar la mejor solución de un catálogo de 24 perfiles HEB. Por tal motivo el tiempo que tomó en encontrar una solución fue de 4 horas aproximadamente. Como recomendación, la computadora en la que se realice el análisis debe contar con buenas características para que realice el cómputo de variables.

Se debe tomar en cuenta que el tiempo que demoró en obtener un resultado del primer caso en comparación al tiempo que tomaría realizar una prueba y error en programas tradicionales es significativamente rápido.

En el caso dos optimización mediante el box de Karamba3D “Optimize Cross Section”, el tiempo de ejecución de este comando es casi instantáneo generando la solución visual en el lienzo de Rhinoceros3D. Hay que entender que este complemento analiza los elementos estructurales de forma individual, es por ello que en ocasiones se verá limitado por la biblioteca de perfiles que se ingrese en los parámetros de entrada, en nuestro caso los perfiles HEB utilizados en la modelación de puentes, llegó a un punto en el que se presentó un mensaje de advertencia debido a que llegó al máximo tamaño del catálogo de perfiles

ingresados. Como tal esto no genero problemas en la optimización ya que cumplió las restricciones de desplazamiento máximo llegando al límite. Este mensaje se lo puede interpretar como un aviso para aumentar los perfiles que el complemento pueda analizar.

Para el último caso de estudio se aplicó la combinación de la optimización de los dos casos anteriores, pues se obtuvo un análisis de los perfiles mediante Optimize Cross Section y se aprovechó el algoritmo genético de Galápagos para cambiar el número de divisiones y la atura tanto en los extremos como en el centro de la cercha. El tiempo de aplicación del algoritmo para encontrar la solución en este caso fue de una hora, en este punto la decisión de dejar corriendo el programa durante una hora fue para que el programa tenga más tiempo de analizar las variables. A diferencia del primer caso las variables de este eran solamente 3. Como se había mencionado el número de variables causa que el programa tome más tiempo en encontrar soluciones.

Tanto la optimización uno y dos se trata de un tipo de optimización de forma pues solo cambia los perfiles que se va a utilizar, en el caso de la última optimización se trata de una optimización topológica ya que esta cambia tanto las secciones de los elementos y reduce los mismos, el resultado de esta fue una disminución de 72 elementos pasando de 154 a 82 elementos estructurales totalmente funcional sin perder ninguna capacidad.

Hay que tener en cuenta que la combinación de perfiles que nos entrega la optimización del caso dos y tres puede llegar a ser complicada en términos constructivos debido a las conexiones de perfiles muy pequeños con perfiles demasiado grandes. Es por eso que, a pesar de la versatilidad y beneficios de esta herramienta, se necesita de un profesional que pueda aportar con su criterio y experiencia para aterrizar estos modelos a un proyecto real.

En caso de que se quiera plasmar la combinación de perfiles del caso dos y tres, es recomendable hacer un estudio preciso que nos muestren la factibilidad que representaría construir este tipo de estructuras.

Si bien el tema de optimización estructural a lo largo del tiempo ha ido tomando fuerza, en el Ecuador aun es una disciplina relativamente nueva, se necesita profundizar en investigaciones futuras sobre el uso de algoritmos genéticos en la optimización estructural, dado que es un campo en constante evolución a nivel mundial.

Además, considero es muy importante fomentar la capacitación continua de ingenieros en el uso de herramientas paramétricas y técnicas avanzadas de optimización, ya que esto no solo mejorará la calidad de los diseños, sino que también permitirá enfrentar con éxito los desafíos que presentan los proyectos estructurales contemporáneos.

Finalmente, se aconseja la implementación gradual de estas herramientas en oficinas de diseño, trabajando en conjunto con programas tradicionales como ETABS o SAP2000 que puedan corroborar los datos obtenidos y de este modo aprovechar al máximo las capacidades de cada software en la búsqueda de soluciones estructurales óptimas y eficientes.

6. BIBLIOGRAFÍA

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2017).

LRFD Bridge Design Specifications (8th ed.). AASHTO.

ARCUX. (2020). ¿Qué es diseño paramétrico? Recuperado el 28 de julio de 2024, de

<https://arcux.net/blog/que-es-diseno-parametrico/>

Arora, J. S. (2004). *Introduction to Optimum Design*. Elsevier.

Aslam, K. (2015). *Análisis Estructural*. Quinta edición.

BELCHER, D. (9 de septiembre de 2021). *What is a Rhino Plugin?* Recuperado desde:

<https://developer.rhino3d.com/guides/general/what-is-a-rhino-plugin/>

BELCHER, D. (9 de septiembre de 2021). *What is RRhino.Python?* Desde:

<https://developer.rhino3d.com/guides/rhinopython/what-is-rhinopython/>

Bendsoe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer.

Bertsekas, D. P. (2016). *Nonlinear Programming*. Athena Scientific.

Caiafa, C. F., & Lew, S. E. (2020). ¿Qué es la Inteligencia Artificial?.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.

Cerrolaza, M., & Annicchiarico, W. (1996). Algoritmos de optimización estructural basados en simulación genética (Vol. 47). CDCH UCV.

Chong, E. K., & Zak, S. H. (2013). *An Introduction to Optimization* (4th ed.). Wiley.

Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis* (4th Edition). John Wiley & Sons.

Cuitláhuac, N. (2011) ¿Cómo podemos optimizar una estructura? Recuperado el 9 de agosto de 2024, de Civilgeeks.com: <https://civilgeeks.com/2011/10/17/%C2%BFcomo-podemos-optimizar-una-estructura/>

De Antonio Suárez, O. (2011). Una aproximación a la heurística y metaheurísticas. *INGE@UAN-Tendencias en la Ingeniería*, 1(2).

- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons.
- Diaz, E., Ruiz, M., & Suarez, B. (2008). Análisis matricial de estructuras. CIMNE, Centro Internacional de Metodos Numericos en Ingenieria.
- Duggal, S. K. (2014). *Building Materials*. New Age International.
- Fernández Saiz, M. D. C., Culasso, G., Ghezan, N., & Klein, K. (2017). Diseño Paramétrico como herramienta de diseño estructural.
- FUGIER, D. (12 de diciembre de 2018) *What are VBScript and RhinoScript?* Desde: <https://developer.rhino3d.com/guides/rhinoscript/what-are-vbscript-rhinoscript/>
- García, M. A. (2013). *Diseño de estructuras articuladas en puentes*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gere, J. M., y Goodno, B. J. (2012). *Mecánica de materiales* (8.^a ed.).
- Godínez, J. (2020). *Serpentine Pavilion 2000: La estructura que cambió el destino de Zaha Hadid*. Recuperado de Admagazine el 09 de agosto de 2024 de: <https://www.admagazine.com/arquitectura/serpentine-pavilion-2000-la-estructura-que-cambio-el-destino-de-zaha-hadid-20200214-6475-articulos>
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- Gómez, A. (2015). *Diseño y comportamiento de apoyos en puentes de gran longitud*. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid.

Gonzales Ramirez, J. A. (2018). Diseño integral de armaduras metálicas usando rinoceros

3D: Modelación paramétrica, simulación estructural y optimización.

González, J. (2020). *Estructuras paramétricas y optimización en arquitectura*. Editorial

Académica Española.

Guamán Guaranga, M. A. (2014). *Reforzamiento de puentes Warren para aumentar su*

capacidad resistente ante cargas vehiculares. Aplicación al puente “La Independencia” (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2014).

Haftka, R. T., & Gürdal, Z. (1992). *Elements of Structural Optimization*. Kluwer Academic

Publishers.

Haftka, R. T., & Gürdal, Z. (1992). *Elements of Structural Optimization*. Kluwer Academic

Publishers.

Herrera, P. 2010. Disruptive Technologies: Scripting and Digital Fabrication in Latin America.

SIGraDi 2010 Proceedings of the 14th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, pp. Bogotá, Colombia, November 17-19, 2010, pp. 213-216.

Disponible en: http://cumincades.scix.net/data/works/att/sigradi2010_213.content.pdf

Hibbeler, R. C. (2012). Structural Analysis 8 ed TK Hwee.

Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis*

with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. MIT Press.

<https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>

- Hudson, R. (2010). *Strategies for parametric design in architecture*. University of Bath.
- Jabi, W. (2013). *Parametric design for architecture*. Hachette UK.
- Kolling Andersen, D. 2015. *Parametric Modelling for Point Support Optimisation of Plate and Shell Structures*. Tesis master. Kongens Lyngby, Dinamarca, DTU. 112 p.
- Landeta, B. (2021, agosto) *Optimización de estructuras paramétricas de acero*. [Tesis de pregrado]. Universidad Internacional SEK
- Payne, A., & Issa, R. (2009). *Manual de Grasshopper. Primer for version 0.06.0007-Spanish Edition*.
- Logan, D. L. (2016). *A First Course in the Finite Element Method* (6th Edition). Cengage Learning.
- Loja González, JA. 2014. *Algoritmos genéticos como herramientas en el proceso de diseño generativo*. Tesis pregrado, Loja, Ecuador, Universidad Técnica Particular de Loja. 167 p.
- López, F. J. (2014). *Análisis y diseño de puentes simplemente apoyados utilizando estructuras combinadas*. Editorial Técnica de Ingeniería.
- López, H. A. (2007). *Solución de modelos de optimización lineal con coeficientes intervalares en la función objetivo por medio de programación multiobjetivo*. *Boletín de matemáticas*, 14(1), 14-29.
- López, J., & Ramírez, P. (2010). *Elementos fundamentales en la construcción de puentes*. Editorial Ingeniería Estructural.

- Marchante, A. (2023). 3Dnatives. *Rhinoceros: ¿Qué características tiene el software de modelado 3D?* Desde: <https://www.3dnatives.com/es/rhinoceros-caracteristicas-software-300320202/#>
- McCormac, J. (2010). Analisis de estructuras-metodos clasico y matricial. Alfaomega, Grupo Editor.
- McCormac, J. (2012). Diseno de estructuras de acero. Alfaomega Grupo Editor.
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2015). *Design of Reinforced Concrete* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- McNeel & Associates. (2019). *Rhinoceros*. Recuperado el 12 de agosto del 2024 desde: <https://www.rhino3d.com/features/>
- McNeel & Associates. (2022). *Rhino en Arquitectura, Ingeniería y Construcción*. Recuperado el 12 de agosto del 2024 desde: <https://www.rhino3d.com/es/for/architecture/>
- McNeel & Associates. (2024). *What are NURBS?* Recuperado desde: <https://www.rhino3d.com/features/nurbs/>
- Megson, T. H. G. (2019). *Structural and Stress Analysis* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (2004). *Mechanics of Materials* (5th ed.). Brooks/Cole.
- Mendoza, M. (2022). *Optimización del peso en rhinoceros 3d de coberturas metálicas conformadas por armaduras espaciales*. [Bachelor's Thesis] Desde: <http://hdl.handle.net/20.500.14074/4718>

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2018). *Reglamento de Diseño y Construcción de Puentes para Vías de Comunicación*. Quito, Ecuador: MTOP.

Mitchell, M. (1998). *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press.

Muyulema Muyulema, D. G. (2023). *Análisis de juntas tipo bridas apernadas para estructuras de telecomunicaciones de tipo monopolio usando el método de elementos finitos* (Master's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas).

Namoncura, C., & Vásquez, M. (2011). Optimización de formas arquitectónicas con algoritmos genéticos “OTAG”. Instituto Profesional Virginio Gómez de la Universidad de Concepción.

Navarrete, S. (2014). Diseño Paramétrico. El gran desafío del siglo XXI. 63-72. Recuperado el 28 de julio de 2024

Orozco, W. A. M., & Ospino, J. E. O. (2019). Optimización en el diseño estructural de pórticos de concreto usando SAP2000. REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA), 1(33), 98-104.

Pérez, R. J. (2011). *Estructuras reticuladas aplicadas al diseño de puentes*. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña.

Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M., & Kilian, A. (2015). *Architectural Geometry*. Bentley Institute Press.

Preisinger, C. (2013). *Linking Structure and Parametric Geometry* (Vol. 83). Architectural Design.

- Preisinger, C. (2024). Obtenido de Karamba 3D: <https://www.karamba3d.com/>
- Rao, S. S. (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. John Wiley & Sons.
- Reddy, J. N. (2019). *An Introduction to the Finite Element Method* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Rhinoceros. (2020). Rhinoceros design, model, present, analyze, realize. Recuperado el 09 de agosto de 2024, de <https://www.rhino3d.com/6/features>
- Rivera, A. (2023). Biblioteca de Seattle se construyó con tecnología BIM y escaneo digital. Recuperado de Expocihac media el 09 de agosto de 2024 de: <https://www.expocihachub.com/nota/tecnologia/biblioteca-de-seattle-bim>
- Rodríguez Cardoso, D. (2018). *Optimización del diseño de torres autosoportadas, revisión de literatura* (Doctoral dissertation, Universidad de Matanzas. Facultad de Ciencias Técnicas.).
- Rutten, D. (2020). Grasshopper, Algorithmic modeling for rhino. Recuperado el 09 de agosto de 2024, de <https://www.grasshopper3d.com/>
- Rutten, D. (2010). Obtenido de Evolutionary Principles applied to Problem Solving: Recuperado el 09 de agosto de 2024, de <https://www.grasshopper3d.com/>
- Rutten, D. (2021). Obtenido de Grasshopper: Recuperado el 09 de agosto de 2024, de <http://www.grasshopper3d.com/>
- Schumacher, P. 2011. *The Autopoiesis of Architecture: A New Framework for Architecture*. Vol. I. West Sussex: Wiley

Solaguren-Beascoa, M. (2016). Elasticidad y resistencia de materiales (1st ed.). Difusora

Larousse - Ediciones Pirámide

Tedeschi, A. (2014). AAD, Algorithms-aided design: parametric strategies using Grasshopper.

Le penseur publisher.

Velandia, D. (2011). Modelado digital y diseño paramétrico como opción en la

experimentación, desarrollo, visualización y toma de decisiones para estudiantes de arquitectura: Experiencias en un curso electivo.

Viprocosa (2018). El Viaducto de Millau, uno de los puentes más altos del mundo.

Recuperado el 09 de agosto de 2024 de: <https://www.viprocosa.com/news/el-viaducto-de-millau-el-puente-mas-alto-del-mundo/>

Wiki Arquitectura (2009). Edificio Central de la Planta BMW. Recuperado el 09 de agosto

de 2024 de: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/edificio-central-de-la-planta-bmw/>

Woodbury, R. R. F. (2010). Elements of parametric design.

Xiao, A.; Wang, B.; Jin, Y. Optimización del diseño de celosías evolutivas mediante el

enfoque de estructura vectorizada. En Actas del Congreso IEEE de 2013 sobre computación evolutiva, Cancún, México, 20-23 de junio de 2013.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and*

Fundamentals (6th Edition). Butterworth-Heinemann.

7. ANEXOS

7.1 Anexo 1. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de Carga

Trapezoidal

```
Private Sub RunScript(ByVal W As Object, ByVal B As Object, ByVal I As Object, ByRef CV As Object)
```

```
    CV = ((W * B) / 6) * (3 - ((B / I) ^ 2))
```

```
End Sub
```

7.2 Anexo 2. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de Carga

Triangular

```
Private Sub RunScript(ByVal W As Object, ByVal B As Object, ByRef CV As Object)
```

```
    CV = ((W * B) / 3)
```

```
End Sub
```

7.3 Anexo 3. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de “Límite de desplazamiento”

```
Private Sub RunScript(ByVal Desp As Object, ByVal L As Object, ByRef A As Object)
```

```
    If Desp > (L / 800 * 100) Then
```

```
        A = 1000
```

```
    Else
```

```
        A = Desp
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

7.4 Anexo 4. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de “Radios de utilización no mayor a 0.80”

```
Private Sub RunScript(ByVal lista1 As Double, ByVal y As Object, ByRef A As Object)
```

```
    If lista1 > 0.80 Then
```

```
        lista1 = 1000
```

```
    End If
```

```
    print(lista1)
```

```
End Sub
```

7.5 Anexo 5. Código en Visual Basic (Grasshopper) para crear el componente de

“Convertir toda la lista de radios de utilización a mil, si sobrepasa un valor 0,80”

```
Private Sub RunScript(ByVal lista2 As List(Of Object), ByVal L As Object, ByRef AAs Object)
```

```
    Dim f As Double
```

```
    f = 0
```

```
    For i As Integer = 0 To (L - 1)
```

```
        If lista2(i) = 1000 Then
```

```
            f = 1
```

```
        End If
```

```
    Next
```

```
    If f = 1 Then
```

```
        For i As Integer = 0 To (L - 1)
```

```
            lista2(i) = 1000
```

```
        Next
```

```
    End If
```

```
    A = lista2
```

```
End Sub
```