

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
OPTIMIZACIÓN DE FORMA Y TAMAÑO MEDIANTE UN PSEUDO-ALGORITMO  
GENÉTICO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS TIPO CERCHA A DOS AGUAS  
MORFOLOGICAMENTE DEFINIDAS POR DOMINIOS DE 3 NODOS**



Por:  
**Andrés Felipe Paz Possú**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
VILLAVICENCIO  
2020**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
OPTIMIZACIÓN DE FORMA Y TAMAÑO MEDIANTE UN PSEUDO-ALGORITMO  
GENÉTICO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS TIPO CERCHA A DOS AGUAS  
MORFOLOGICAMENTE DEFINIDAS POR DOMINIOS DE 3 NODOS**



Por:  
**Andrés Felipe Paz Possú**

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de  
ingeniero civil

Aprobado por:  
**Ing. Jhon Jairo Gil Peláez, PhD.**  
**Decano Facultad De Ingeniería Mecánica**  
Director

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
VILLAVICENCIO  
2020**

## **AUTORIDADES ACADÉMICAS**

**P. José Gabriel Mesa Angulo, O. P.**  
Rector General

**P. Eduardo González Gil, O. P.**  
Vicerrector Académico General

**P. José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.**  
Rector Sede Villavicencio

**P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.**  
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**Mg. Julieth Andrea Sierra Tobón**  
Secretaria de División Sede Villavicencio

**Ing. Manuel Eduardo Herrera Pabón**  
Decano Facultad de Ingeniería Civil

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

**MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN**  
Decano Facultad Ingeniería Civil

---

**JHON JAIRO GIL PELÁEZ**  
Director Trabajo de Grado

Villavicencio, 14 de octubre del 2020

## RESUMEN

La **optimización estructural** ha sido un tema de investigación durante las últimas décadas, con la programación matemática, siendo esta la primera técnica en convertirse en la más empleada por los académicos para resolver este tipo de problemas, no obstante, con el desarrollo de nuevas metodologías, nace el conjunto de **técnicas metaheurísticas**, siendo estas una parte del emergente desarrollo de la inteligencia artificial, la cual está revolucionando la forma en que se diseña.

En tesina se analizará una variante del clásico **algoritmo genético**, que ha sido extensamente usado para resolver problemas de esta índole; todo esto en pro de encontrar nuevas estrategias para esta ciencia emergente.

Finalmente, este proyecto se realiza la implementación de un pseudo-código para la **optimización de forma y tamaño** de estructuras metálicas tipo cercha morfológicamente definidas, analizando y comparando los resultados obtenidos hasta la fecha, en la literatura pertinente.

**Palabras Clave:** *algoritmos genéticos, cerchas, estructuras metálicas, optimización estructural.*

## ABSTRACT

The **structural optimization** has developed intensely during the last decades, laying its foundations in the mathematical programming, being this the first technique in becoming the most used by the academics to solve this type of problems, nevertheless, with the development of new methodologies , the set of **heuristic meta techniques** is born, which dictate the future of this field of research, only surpassed by the emerging development of artificial intelligence, which is revolutionizing the way in which it is designed.

The development of new methodologies is the primary concept of this thesis, in which a variant of the classical genetic algorithm will be analyzed, which has been widely used to solve problems of this nature; all this in order to find new strategies for this emerging science.

Finally, this project is about to carry out the implementation of a pseudo-genetic algorithm for **the optimization of shape and size** of truss-like metal structures morphologically defined by domains composed of 3 nodes, analyzing and comparing the results obtained to date in the literature relevant.

**Key Word:** *structural optimization, metal structures, trusses, genetic algorithms.*

## RESUMO

**otimização estrutural** tem sido intensamente desenvolvido nas últimas décadas, baseando-o em programação matemática, sendo esta a primeira técnica para se tornar o mais utilizado pelos estudiosos para resolver tais problemas, no entanto, com o desenvolvimento de novas metodologias , nasce o conjunto **de meta técnicas heurísticas**, que ditam o futuro desse campo de pesquisa, superado apenas pelo emergente desenvolvimento da inteligência artificial, que está revolucionando o modo pelo qual é projetada.

O desenvolvimento de novas metodologias é o conceito primário desta tese, na qual será analisada uma variante do **algoritmo genético** clássico, que tem sido amplamente utilizada para resolver problemas dessa natureza; tudo isso para encontrar novas estratégias para essa ciência emergente.

Finalmente, este projecto é de cerca de fazer a aplicação de uma pseudo-algoritmo genético para **otimizar o tamanho e forma** do tipo treliça metálicas morfologicamente definidas por domínios compostas de três nós, analisar e comparar os resultados obtidos até à data na literatura relevante

**Palavras-chave:** *otimização estrutural, estruturas metálicas, treliças, algoritmos genéticos.*

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	14
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	15
3.	OBJETIVOS .....	16
3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	16
3.1.1	Objetivos Específicos .....	16
4.	JUSTIFICACIÓN .....	17
5.	ESTADO DEL ARTE Y MARCO CONCEPTUAL .....	18
5.1.	ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	20
5.2.	BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL .....	22
5.3.	TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS .....	23
5.3.1	Recocido simulado .....	24
5.3.2	Optimización por enjambre de partículas .....	25
5.3.3	Algoritmos genéticos .....	25
5.4.	OPTIMIZACIÓN DE GEOMETRÍA .....	27
5.4.1	Optimización del Tamaño.....	27
5.4.2	Optimización de la Forma.....	27
5.4.3	Optimización De Topología .....	27
5.5.	OPTIMIZACION DE ESTRUCTURAS TIPO CERCHA.....	28
5.5.1	Diagrama De Esfuerzos Cremona-Maxwell O Método De Los Nodos 28	
5.5.2	Método de Ritter o Método de las Secciones .....	29
5.5.3	Método de Culmann .....	29
5.6.	MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE CELOSÍAS.....	30
5.7.	OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA.....	31
5.8.	OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA.....	31
5.9.	LÍNEAS ISOSTÁTICAS .....	32
6.	ESTATUTOS LEGALES.....	34
7.	METODOLOGÍA.....	37
7.1.	RESULTADOS ESPERADOS .....	38
7.2.	IMPACTOS.....	40
8.	FUNDAMENTOS MATEMATICOS DE LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.....	41
8.1.	FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.....	42
8.2.	FUNDAMENTOS DEL MÉTODO MATRICIAL DE RIGIDEZ.....	42
8.3.	DEFORMACIONES LONGITUDINALES.....	42
8.4.	DEFORMACIONES ANGULARES.....	43
8.5.	ECUACIONES CONSTITUTIVAS .....	43

8.5.1	Ley de Hooke.....	43
8.6.	ECUACIONES DE EQUILIBRIO .....	44
8.6.1	Grados de Libertad y Condiciones de Contorno .....	44
8.6.2	Análisis Matricial de una Armadura .....	45
8.7.	MODELOS MATEMÁTICOS .....	46
9.	ANÁLISIS DE DOMINIOS BIDIMENSIONALES.....	49
9.1.	ANÁLISIS DE CERCHAS MORFOLÓGICAMENTE DEFINIDAS POR MEDIO DE DOMINIOS CONTINUOS DE DISEÑO.....	50
9.2.	ANÁLISIS DE CUERPO RÍGIDO A DOMINIOS CONTINUOS DE DISEÑO ISOSTÁTICOS .....	50
9.3.	MODELO UNIDIMENSIONAL .....	50
9.4.	MODELO BIDIMENSIONAL .....	52
9.5.	DISCRETIZACIÓN DE DOMINIOS CONTINUOS DE DISEÑO .....	53
9.5.1	Metodología de discretización RxP.....	53
9.5.2	Metodología de discretización RTxP .....	55
10.	MÉTODOS DE VALIDACIÓN Y COMPARATIVA DE RESULTADOS. ..	57
10.1.	MÉTODOS DE VALIDACIÓN .....	58
11.	ESTRUCTURA DEL ALGORITMO EPIDEMIA.....	60
11.1.	ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE FORMA Y TAMAÑO “EPIDEMIA” 61	
11.2.	BROTE .....	62
11.2.1	NATALIDAD .....	63
11.3.	INFECCIÓN.....	63
11.3.1	CADENA DE CROMOSOMAS.....	64
11.4.	BROTE ESPECIAL.....	64
11.4.1	ADAPTACIÓN .....	65
12.	ALGORITMO EPIDEMIA .....	66
12.1.	METODOLOGÍA DE DISCRETIZACIÓN RXP .....	66
12.2.	BROTE .....	71
12.3.	INFECCIÓN.....	74
12.4.	BROTE ESPECIAL.....	77
12.5.	ADAPTACIÓN .....	78
13.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	81
13.1.	VALIDACIÓN DEL MÓDULO DE ANÁLISIS .....	82
13.1.1	Problema de Análisis matricial .....	90
13.2.	CÓDIGO EPIDEMIA .....	91
13.2.1	DOMINIO DE ESTUDIO 1-RECTANGULO SIMETRICO .....	92
13.2.2	DOMINIO DE ESTUDIO 2-PIRAMIDE TRUNCADA INVERTIDA..	93
13.2.3	DOMINIO DE ESTUDIO 3-RECTANGULO ASIMETRICO.....	94

13.2.4	DOMINIO DE ESTUDIO 4-ROMBO .....	95
13.3.	METODO DE VALIDACIÓN .....	100
14.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	102
14.1.	TRABAJOS FUTUROS .....	105
	BIBLIOGRAFÍA .....	106

## LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1. Criterios expuestos en los trabajos de optimización estructural por medio de Algoritmos Genéticos. ....	19
Tabla 6-1. Marco Legal de Estructuras Metálicas .....	35
Tabla 7.1.Resultados Esperados de Acuerdo a los Objetivos Planteados.....	39
Tabla 7.2.Impactos Pertinentes al Proyecto.....	40
Tabla 10-1. Comparativa de los resultados obtenidos por diferentes autores sobre el problema estructural clásico de 10 barras y 6 nodos. ....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 5-1. (a) Abstracción de una viga en voladizo de Galileo; (b) Esquema de Galileo para explicar la " Ley de la Palanca". .....	20
Figura 5-2. Resolución de una celosía por el método de los nodos. ....	28
Figura 5-3. Resolución de una celosía por medio del método de las secciones. ...	29
Figura 5-4. Resolución de celosía por medio del método de Culmann. ....	29
Figura 5-5. Categorías de optimización de celosías: (a) Optimización Paramétrica. (b) Optimización de Forma. (c) Optimización Topológica.....	30
Figura 5-6. Optimización Paramétrica- Sizing Optimization. ....	31
Figura 5-7. Ejemplo de Optimización Topológica de un Dominio de Diseño en Voladizo.....	31
Figura 5-8. Malla En Base A Las Líneas Isostáticas Generadas Por El Sistema De Cargas Inicial.....	32
Figura 5-9. Malla Isostática De Un Dominio Rectangular Sometido A Dos Fuerzas P.....	33
Figura 7.1. Estructura metodológica del proyecto. ....	37
Figura 8-1. Estado del Esfuerzos de un Medio Continuo. ....	43
Figura 8-2. Elemento Biarticulado de una Armadura espacial Con Rigidez K.....	46
Figura 9-1. (a) Discretización por medio de RTxP.....	54
Figura 9-2. (b) Discretización por medio de RxP.....	54
Figura 9-3. Discretización de los Segmentos. ....	56
Figura 9-4. Malla Interna Producida por la interconexión de los nodos de los segmentos.....	56
Figura 9-5. Distribución de Nodos Dentro Del Nodo. ....	57
Figura 10-1. Estructura de diez (10) barras y seis (6) nudos .....	58
Figura 13-1. Problema 6.1 Beer Octava Edición problema de validación para el módulo de análisis.....	82
Figura 13-2. Problema 4.5 Estática Meriam Edición 3, problema de validación para el módulo de análisis. ....	83
Figura 13-3. Problema de análisis matricial para la validación del módulo de análisis. ....	90
Figura 13-4. (a)-(b)-(c)-(d) Morfologías Dominantes En El Estudios De Cerchas A Dos Aguas.....	97
Figura 13-5. Optimización de forma y tamaño para morfología regular ascendente. ....	98
Figura 13-6. Optimización de forma y tamaño para morfología regular descendente. ....	99

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 8-1.Deformaciones Longitudinales De Un Medio Continuo. ....	42
Ecuación 8-2.Deformaciones Angulares de un Medio Continuo. ....	43
Ecuación 8-3.Ecuación Constitutiva (Ley de Hooke).....	44
Ecuación 8-4.Ecuación Fundamental del Equilibrio. ....	44
Ecuación 8-5.Vector de Desplazamientos.....	45
Ecuación 8-6.Vector de Fuerzas. ....	46
Ecuación 8-7. Fuerzas en los Extremos de un elemento Biarticulado.....	47
Ecuación 8-8.Matriz de Rigidez Global. ....	47
Ecuación 8-9.Matriz de Rigidez Global en Función de los Cosenos Directores. ....	47
Ecuación 8-10.Cosenos Directores de las Direcciones Principales. ....	47
Ecuación 8-11.Expresión Matricial de una Armadura.....	48
Ecuación 8-12. Expresión General para el Análisis Matricial de una Cercha.....	48
Ecuación 9-1.Restricciones Constitutivas del Modelo Unidimensional.....	52
Ecuación 9-2, Radio de Discretización en Función de la Dirección de los Esfuerzos. .....	54
Ecuación 9-3.Discretización Radial por medio de Factores de Esfuerzo. ....	55

## 1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de estructuras resistentes, rígidas, con poco peso y que cumplan su funcionalidad correctamente, es decir, una estructura optima, siempre ha sido uno de los objetivos fundamentales de la ingeniería.

Para obtener estructuras de este tipo, desde los comienzos de la humanidad el hombre ha experimentado con una gran variedad de técnicas constructivas. En un principio muchas de ellas se basaban en “Ensayo & Error”; luego con la aparición de las matemáticas y las leyes de la mecánica, estas técnicas se fundamentaron en una metodología de cálculo estructural. Con el desarrollo del método del Cálculo Matricial de Estructuras de Barras y el Método de los Elementos Finitos, se lograron afianzar metodologías más rigurosas en el ámbito del análisis estructural, las cuales se basan en la optimización según su forma (Geometría), distribución de esfuerzos (Topología) o cambio de sección en toda su geometría. [1]

Los algoritmos genéticos, están basados en procesos evolutivos que son utilizados para resolver problemas de búsqueda y optimización; estos algoritmos simulan los procesos genéticos de los seres vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan de acuerdo con principios de selección natural, de esta manera se busca obtener los puntos máximos y mínimos de las funciones objetivo; en esta tesis se propone la aplicación de un algoritmo de optimización para la optimización de estructuras metálicas de la geometría estructural, basados en algoritmos evolutivos (AG), aplicada a estructuras metálicas morfológicamente definidas tipo cercha.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Dentro del carácter **social y ambiental** de la ingeniería estructural, y su enfoque de desarrollo científico, la búsqueda de estructuras más livianas que logren servir de pilares en la disminución del gasto de las materias primas utilizadas en gran parte de la construcción, se hace imperativo el crear estructuras de gran envergadura con un gasto mínimo de materiales, lo cual se verá traducido en el presupuesto general de la obra. [2]

Este tipo de estrategias permiten una disminución considerable en el gasto del material, lo que se traduce en, una **disminución del presupuesto** a gastar en la construcción, una **mitigación a los impactos ambientales** producidos por la explotación de las materias primas [3], y lo que suele ser más relevante, la capacidad de diseñar estructuras poco convencionales, donde los métodos tradicionales de diseño se quedan cortos e incluso en algunas ocasiones, obsoletos [1].

Se ha afrontado este problema con distintas metodologías y técnicas basadas en matemáticas y las leyes de la mecánica clásica, métodos que han evolucionado hasta llegar a convertirse en los métodos iterativos actuales de forma que la optimización estructural, por medio de métodos evolutivos, ha permitido proporcionar soluciones más eficientes teórica y constructivamente [4].

De acuerdo con lo descrito es pertinente el desarrollo de este proyecto, como respuesta a una necesidad emergente y un acercamiento a la respuesta que esta problemática exige, de manera teórica con parámetros aplicables a estructuras tipo cercha morfológicamente definidas.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar un algoritmo para la optimización de estructuras tipo cercha morfológicamente definidas, a través del algoritmo genético, *Epidemia*.

##### 3.1.1 Objetivos Específicos

- Implementar un generador de mallas para el dominio de diseño planteado por el usuario, como herramienta de discretización del problema.
- Implementar el algoritmo para el análisis estructural, mediante el método de análisis matricial para la resolución de la estructura tipo cercha.
- Implementar el algoritmo genético, llamado *Epidemia* como medio iterativo de resolución de problemas de optimización estructural.
- Compilar el generador de mallas, el algoritmo para análisis estructural, el algoritmo de diseño y el algoritmo de optimización en un solo modulo.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este proyecto conllevará a la elaboración de un algoritmo como herramienta de acercamiento en el diseño de estructuras tipo cerchas más eficientes, generando un avance científico y práctico en el ámbito de la ingeniería estructural ya que este tipo de herramientas representan la cúspide del trabajo académico actual y las bases para el futuro práctico de la ingeniería estructural que tras la dinámica de los negocios y la cantidad limitada de recursos, los proyectos de este carácter se ven inmiscuidos en la problemática del desarrollo de métodos más competentes de diseño con la finalidad de obtener un mayor aprovechamiento de las materias primas.

Como se logra observar en el **ANEXO F**, los precios del acero estructural crecen a una gran velocidad, y de igual forma lo hacen los procesos que están relacionados con él; esta, es una de las principales razones por las cuales en tiempos modernos es imperativo encontrar metodologías de diseño más eficientes [3].

En el ámbito de la ingeniería, el diseñar estructuras más livianas y competentes ha representado uno de los retos más grandes; reto que ha sido afrontado desde el siglo XVII [5], y se ha reinventado con el desarrollo de matemáticas más complejas y completas.

En este orden de ideas, nace este proyecto, de la necesidad de lograr encontrar metodologías y estrategias que logren hacer posible el diseñar de manera más eficiente, haciéndole frente a las problemáticas ambientales, científicas y económicas emergentes ya antes mencionadas Ver **ANEXO G**. es por eso que se desarrolla este algoritmo, como solución a estas problemáticas.

## **5. ESTADO DEL ARTE Y MARCO CONCEPTUAL**

En el presente capítulo se abordarán las peculiaridades del desarrollo de las diferentes metodologías de optimización estructural a lo largo de las últimas décadas, con énfasis en la esencia teórica de cada una de estas estrategias de optimización.

En las últimas décadas los trabajos más destacables en el ámbito de la optimización estructural realizados por la metodología de los algoritmos genéticos no solo han generado soluciones eficientes, sino también han ofrecido una variedad de nuevas singularidades en la forma clásica de desarrollo de este tipo de estrategias de optimización; estas modificaciones representan el desarrollo moderno de esta metodología, que se reinventa al mismo tiempo que lo hacen los problemas de optimización.

Tabla 5-1. Criterios expuestos en los trabajos de optimización estructural por medio de Algoritmos Genéticos.

<b>AUTORES</b>	<b>AÑO</b>	<b>CRITERIO</b>
<i>Haleja y Shin [6]</i>	1992	<i>Modificación de las estrategias originales de cruce. Aplicación de variables discretas.</i>
<i>Adeli y Cheng [7]</i>	1993	<i>Aplicación de una estrategia de cruce de dos puntos.  Función de penalización cuadrática de un solo coeficiente constante.</i>
<i>Rajan [8]</i>	1995	<i>Concluye que la solución final está íntimamente relacionada con la población inicial.  Propone el uso del método de los elementos finitos para evaluar las poblaciones de soluciones producidas por el algoritmo.</i>
<i>Galante [9]</i>	1997	<i>Emplea el operador de renacimientos propuesto por Goldberg.</i>
<i>Yang y Soh [10]</i>	1997	<i>Emplean un operador de selección por torneo, demostrando que es más eficiente que el operador de selección por ruleta.</i>
<i>Deb y Gulati [11]</i>	2001	<i>Emplean el operador Beta de cruce binario simulado.</i>
<i>Greiner [12]</i>	2004	<i>Emplea el operador de renacimientos propuesto por Goldberg.</i>
<i>Tang [13]</i>	2005	<i>Emplea un operador de mutación Gaussiana, una función compleja basada en funciones logarítmicas y exponenciales.</i>

Prendes Gero [14], [15]	2006	Emplearon un Algoritmo Genético elitista donde se aplica un operador de cruce por fenotipo.
Srinivas y Ramanjaneyulu [16]	2007	Plantearon el uso de una Red Neuronal para predecir la aptitud de los individuos.
Togan y Daloglu [17]	2008	Plantearon un operador de inicialización basado en una técnica Heurística.
Noilublao y Bureerat [18]	2011	Emplean un Algoritmo Genético con una codificación mixta.

Fuente: Autor

## 5.1. ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

- En 1638 se publica la obra *Discorsi E Dismostrazioni Matematiche Intorno A Due Nouve Scienze* desarrollada por Galileo Galilei (1546-1642) [5]; en la cual analizo las fallas de una viga en voladizo; exponiendo los cimientos para el desarrollo de estudios analíticos en el área de la resistencia de materiales.

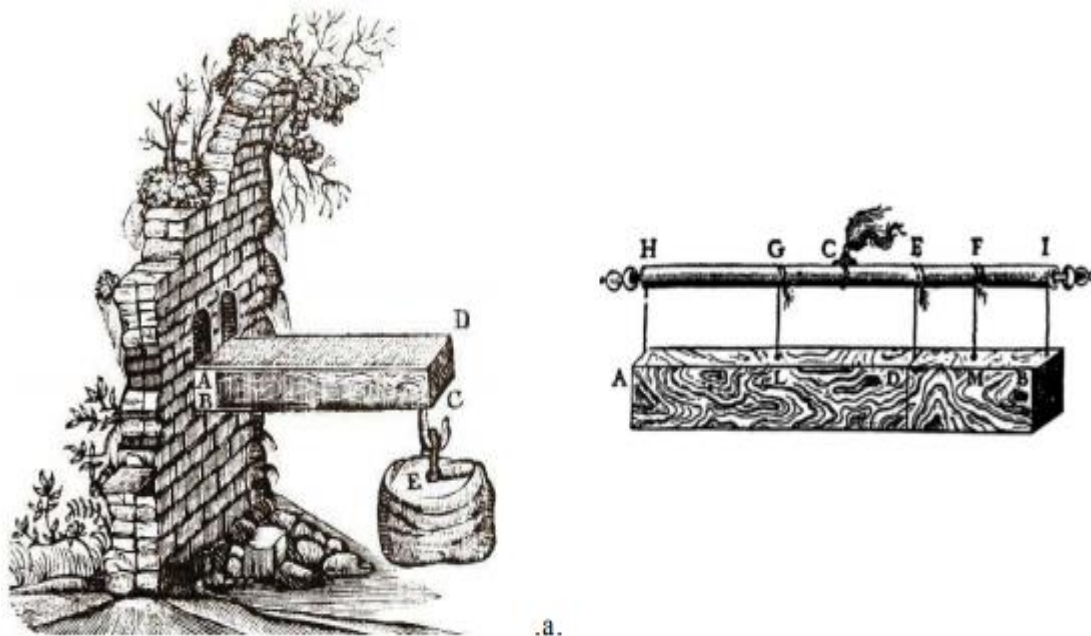


Figura 5-1. (a) Abstracción de una viga en voladizo de Galileo; (b) Esquema de Galileo para explicar la " Ley de la Palanca".

Fuente: [2]

- La ley de Hooke, que explica la relación entre fuerza y deformación lineal, fue desarrollada por Robert Hooke (1635-1703) [19]; esta ley es un axioma fundamental en la mecánica de sólidos deformables mientras se encuentran en su rango elástico, es decir, mientras están en su rango proporcional.
- En 1687 se publica el icónico libro de Isaac Newton (1642-1727) *Philosophia Naturalis Principia Mathematica* [20], en el cual expone sus leyes sobre la mecánica de los cuerpos; partiendo en estas leyes se realizaron un sinnúmero de avances matemáticos en el estudio estructural dando nacimiento a la ciencia conocida como mecánica vectorial.
- Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) establece que la totalidad de las fuerzas externas que actúan sobre un cuerpo son iguales a las fuerzas de inercia que conforman el sistema, esto se conoce como el teorema del trabajo virtual, el cual se expuso en *Traite De Dynamique* [21]
- El desarrollo de la teoría de pandeo en columnas es gracias, Leonard Paul Euler (1707-1783) [22]; en esta teoría Euler expresa que los elementos sometidos a cargas axiales sufren un fenómeno de la inestabilidad elástica, el pandeo flexional.
- Charles Coulomb (1736-1806) presentó el cálculo variacional como herramienta para el estudio de la flexión en las vigas, esto es expuesto en *Sur Une Application Des Régles De Maximis Et Minimis Á Quelques Problèmes De Statique Relatifs Á L'architecture* [23] además del método de Coulomb denotado como la superficie de fluencia es ampliamente utilizado en la evaluación de la resistencia de materiales.
- La teoría de la elasticidad general fue propuesta por uno de los discípulos de Jean Baptiste Fourier; Claude-Louis Henri Navier (1785-1836); esta teoría es uno de los pilares fundamentales en el estudio de sólidos deformables, esto fue expuesto en *Resume Des Lecons Donnees A l'Ecole Des Ponts Et Chaussées Sur L'application De La Mécanique A l'établissement Des Construction* [24].
- La ecuación de los tres momentos, fundamental en el análisis de vigas continuas fue desarrollada por Benoit Paul Emile Clapeyron (1799-1864) y publicada en *L'équilibre Interieur Des Corps Solides Y La Stabilité Des Voutes* [25]; donde explica la relación de los momentos internos y el sistemas de cargas externas en un sistema, esta ecuación es fundamentalmente usada para resolver problemas hiperestáticos.
- James Clerk Maxwell (1831-1879) publicó el primer método sistemático de análisis para estructuras estáticamente indeterminadas, su libro *On Reciprocal Figures, Frames, And Diagrams Of Forces* [26] expresa que la energía interna producida por una deformación de una estructura cargada es igual al trabajo externo realizado por las cargas aplicadas; la parte más notoria es el Teorema De Las

Deformaciones Recíprocas, que explica de manera íntima la relación entre deformación y energía subyacente en una estructura.

- Otto Mohr desarrolló el primer método gráfico para determinar el estado de esfuerzos de un elemento diferencial, método conocido como el círculo de Mohr, el cual uso como base para el desarrollo del método de la viga conjugada [27].
- Carlo Alberto Castigliano (1847-1884) formuló el teorema del trabajo mínimo, expuesto en *The Theory Of Equilibrium Of Elastic Systems And Its Applications* [28] con el que facilitó el análisis de sistemas isostáticos y el desarrollo de estudios alternativos para sistemas hiperestáticos.
- El Método Del Momento-Área desarrollado por Charles Ezra Greene (1842-1903) [29] fue la base para el método de Müller, el cual facilita la construcción de líneas de influencia.
- George A. Maney (1888-1947) [30] desarrolló el método de la pendiente-deflexión, el cual es uno de los métodos fundamentales para el desarrollo del método de la rigidez.
- El método de la distribución de momentos expuesto en 1930 por Hardy Cross (1885-1959) en el libro titulado *Continuos Frames Of Reinforced* [31], supuso una revolución en el análisis de marcos continuos de concreto reforzado; ya que la implantación se basa en aproximaciones sucesivas evadiendo los sistemas de ecuación presentes en el método de Mohr y Maxwell.

La aparición de la era de la computacional, revolucionó la forma en que se abordan los problemas de análisis estructural, debido a que, las computadoras eran capaces de realizar extensas tareas como lo son resolver grandes sistemas de ecuaciones de manera simultánea, y de forma más precisa. El desarrollo de las nuevas técnicas de aproximación y métodos numéricos, crearon una nueva forma de afrontar los problemas de análisis estructural asistiendo de software computacional especializado en el área.

## 5.2. BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

Uno de los primeros trabajos sobresaliente en el ámbito de la optimización estructural fue realizado por Galileo Galilei (1564-1642) [32], donde intentó encontrar la forma óptima de una viga en voladizo, con una carga puntual en su extremo libre.

Con el desarrollo de matemáticas modernas y más complejas, implementadas en las herramientas computacionales, se lograrían sentar los cimientos para el desarrollo de los métodos y técnicas actuales para la optimización de funciones. A mediados del siglo XX Mitchell [33] valiéndose del teorema desarrollado por Clerk Maxwell [26], impondría los criterios para el diseño óptimo de barras de peso mínimo, desarrollando un nuevo teorema según el cual:

*“Una estructura alcanza el límite absoluto en la economía de material, si el espacio ocupado por esta puede ser sometido a una deformación pequeña, tal que la deformación unitaria de todas las barras de la estructura se incrementa no menos que el cambio de longitud relativo de cualquier elemento en el espacio”.* [32]

No obstante, los modelos estructurales propuestos por Mitchell carecían de eficiencia en el ámbito práctico; esto debido a que, gran parte de sus modelos ostentaban una gran cantidad de barras, además de ser estrictamente isostático.

Barta en 1957 [34] publica su investigación; en la cual determina los conjuntos de barras redundantes, con el fin de probar la veracidad del teorema de Sved [35] según el cual, tras la eliminación de las barras redundantes de una estructura, es posible obtener una estructura determinada, con un mínimo peso siendo este un método de optimización basado en un estado de cargas dado.

La analogía de Mitchell fue ampliamente estudiada por Prager y Rozvany [32], los cuales desarrollaron la teoría de la distribución óptima de las estructuras reticulares; los resultados de estos trabajos cimentaron las bases para el desarrollo de trabajos en el ámbito de la programación lineal enfocada en problemas estructurales.

A continuación, se mencionan las diferentes técnicas de optimización estructural empleadas en los últimos diez (10) años. No obstante, solo se toman en cuenta los trabajos más destacables en el área de optimización estructural, sin enfatizar en la descripción de estos.

### **5.3. TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS**

Según Osman y Kelly (1996); los procedimientos metaheurísticos son métodos de aproximación diseñados con la finalidad de encontrar la solución a problemas de optimización complejos, basados en su mayoría en la mecánica estadística, evolución biológica y derivados de inteligencia artificial [36]. El principal inconveniente de este tipo de técnicas es que, no aseguran la localización del máximo global o absoluto, por lo que hace necesario ejecutar un número considerable de veces el algoritmo con la finalidad de aumentar la posibilidad de alcanzar esta solución.

Durante la última década se han desarrollado grandes avances en materia de optimización estructural basados en métodos metaheurísticos, de estos métodos destacan los mencionados a continuación.

### 5.3.1 RECOCIDO SIMULADO

Es un algoritmo de carácter iterativo, cuya idea fundamental procede de la estadística. Este intenta imitar el proceso de recocido de un metal líquido lentamente hasta su estado sólido. Si el enfriamiento es suficientemente lento, las moléculas se organizan de modo que logran alcanzar su estado fundamental, esto quiere decir que la función de energía alcanza un mínimo global, y si es demasiado rápido alcanzara un mínimo local.

Samuel Sánchez expresa en su obra *Optimización Estructural Y Topológica De Estructuras No Definidas Mediante Algoritmos Genéticos* [32] que el recocido simulado es una técnica que sigue una estrategia relativamente simple; tomando un diseño de prueba y evaluándolo, si el diseño de prueba no es factible este es descartado y se genera uno nuevo, se hace esto bajo el criterio probabilístico de los modelos generados serán más factibles tras un número de iteraciones.

El SA ha sido ampliamente aplicado en problemas de optimización estructural por sus simplicidad y facilidad para encontrar el óptimo global incluso con un gran número de variables de diseño, esto fue demostrado con los trabajos clásicos de Balling, Bennage y Dhingra [37], [38].

Durante los últimos años los trabajos más destacables de este método aplicado a la optimización estructural han sido los siguientes:

En 2008, Lamberti [39], empleo una variación del método, la cual se denomina *Corrected Multi-Level And Multi-Point Simulated Annealing*; en el cual los nuevos puntos son generados a partir de la perturbación de todas las variables de diseño, de forma simultánea o local, haciendo una búsqueda global en la función tendencia para encontrar el punto óptimo global.

En 2011, Noilublao y Bureerat [18] aplicaron una variación denominada *Archived Multiobjective Simulated Annealing*, a una torre esbelta tridimensional, así como a otros casos más sencillos. En este trabajo se emplearon otras técnicas como *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* y *Population Based Incremental Learning* [32].

### 5.3.2 OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

Esta técnica está fundamentada en el comportamiento social e interactivo de los animales, como los bancos de peces, enjambres de insectos y bandadas de pájaros. Este comportamiento relaciona los grupos con las fuerzas sociales que dependen de cada individuo y de la inteligencia del grupo.

El algoritmo se conforma de una serie de partículas que forman un enjambre, donde cada partícula representa una posible solución al problema propuesto. Cada partícula se desplaza por el dominio de trabajo atraídas por la posición con mayor aptitud (óptimo local) influenciando al grupo a desplazarse para alcanzar la posición con mayor aptitud (óptimo global), realizando estos movimientos de manera similar a la forma en que se mueven los enjambres de insectos.

En comparación con el resto de las técnicas evolutivas, la optimización por enjambre es bastante simple y por ello ha sido estudiada exhaustivamente en los últimos años destacando los siguientes trabajos:

En 2003 se aplica exitosamente por primera vez un algoritmo (PSO) a la optimización de estructuras, hito alcanzado por Schutte y Groenwold [40]; donde el algoritmo imitaba una bandada de pájaros; en el que cada pájaro intercambiaba su posición con el más próximo con la finalidad de desplazar a la bandada a la posición con mayor aptitud y de esta forma alcanzar el óptimo global.

Para evaluar el algoritmo emplearon las clásicas estructuras de diez (10) y 25 barras; cabe recalcar que el algoritmo planteado por Schutte y Groenwold logro la solución óptima para el problema de la estructura clásica de diez (10) barras entre todos los PSO publicados hasta hoy.

En 2007, Li [41] emplea un algoritmo PSO para optimizar estructuras articuladas, en su trabajo logro evitar la rápida convergencia de los algoritmos PSO, lo cual en problemas más complejos provoca que, la solución converja a un óptimo local; para probar su algoritmo lo aplico a las estructuras clásicas de 10 y 25 barras, proporcionando una de las mejores soluciones para el problema clásico de la estructura de las 10 barras.

### 5.3.3 ALGORITMOS GENÉTICOS

La primera técnica meta heurística evolutiva desarrollada, fueron los Algoritmos Genéticos, se aplicaron a mediados de los 80's y fue precisamente David Gilbert, un discípulo de Holland, quien alcanzo mayor éxito en la aplicación de algoritmos

genéticos en la optimización estructural, cuya investigación le valió como tesis doctoral [42], [43].

Tras el éxito alcanzado por el libro *Genetic Algorithms in Search, Optimization And Machine Learning*, escrito por Goldberg [44] en el cual recopila numerosas aplicaciones de los algoritmos genéticos, siendo gran parte de ellas, relacionadas a la optimización estructural, como lo es clásico problema de diez barras y seis nodos.

A diferencia de las otras técnicas de optimización los algoritmos genéticos, tienen la capacidad de abordar los problemas desde perspectivas diferentes de manera simultánea, permitiendo optimizar la geometría y topología, en un solo proceso; esto supone una gran ventaja con respecto al resto de métodos evolutivos, por ello gran parte de los trabajos publicados aprovechan esta peculiar, y realizan esa optimización simultánea, a continuación se detallan los trabajos más importantes en la última década:

En 1995, Rajan [8] presenta su trabajo seminal en que extiende la magnitud del problema de optimización de forma y topología simultánea, reduciendo en un 44% el mejor resultado obtenido hasta la fecha para el problema de diez barras, en su trabajo realizaba las siguientes indicaciones:

1. En su experiencia los modelos resultantes eran inestables en un margen del 10 al 30%; para resolver este problema, Rajan propone el uso del método de los elementos finitos con la finalidad de evaluar la población de soluciones producida por el algoritmo.
2. La solución final está fuertemente arraigada la estructura inicial.

En 2006, Balling [45] re-estructuro la codificación del algoritmo, con la finalidad de que la función de aptitud estuviera influenciada por la topología, con el fin de obtener una población de soluciones mucho más diversa; para probar su algoritmo analizo la estructura clásica de 10 barras y seis nodos, obteniendo el segundo mejor registro en la optimización de este modelo.

En 2007, Ramanjaneyulu y Srinivas [16] plantearon una metodología donde se usaba una red neuronal para predecir la aptitud de los individuos de la población de un algoritmo genético; lamentablemente no aportaron aplicaciones prácticas a su trabajo [32].

En 2008, Daloglu y Togan [17] implementaron un nuevo operador de inicialización. Para evaluar la eficiencia de su método decidieron evaluar la estructura clásica de 10 barras y 6 nodos; y en función a esto lograron concluir que, de modo similar a Rajan [8], los resultados óptimos son influenciados por la población inicial propuesta.

En 2009, se usó una población inicial generada por medio de la triangulación de Delaunay, y una técnica heurística similar a la de Togan & Daloglu [17]; lamentablemente Guo [46] no realizó una prueba a los problemas clásicos.

En 2011, Noilublao & Bureerat [47] propuso el uso de una codificación mixta real-entera para lograr optimizar una torre tridimensional sujeta a restricciones de resonancia, además de las tradicionales de tensión y desplazamiento [32].

Los Algoritmos Genéticos son la técnica evolutiva de optimización por excelencia, gracias a su capacidad de optimización simultánea de tamaño y topología, su versatilidad en el desarrollo de nuevas herramientas para la producción de soluciones más óptimas; la convierte en una de las técnicas más eficientes y más usada en la actualidad para la resolución de problemas de optimización.

Por otra parte, los diferentes problemas de optimización estructural pueden ser abordados desde diferentes perspectivas, que fundamentalmente se dividen en las siguientes:

#### **5.4. OPTIMIZACIÓN DE GEOMETRÍA**

##### **5.4.1 OPTIMIZACIÓN DEL TAMAÑO.**

Se basa en la búsqueda de las medidas óptimas de los elementos y/o secciones que conforman la estructura de manera predefinida. Este, es el enfoque más sencillo, ya que el número de variables del problema es bastante limitado y reducido.

##### **5.4.2 OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA.**

Busca la forma óptima de una estructura de topología definida; partiendo de una forma predefinida se busca optimizar esta mediante la modificación de la conectividad o eliminación de elementos.

##### **5.4.3 OPTIMIZACIÓN DE TOPOLOGÍA**

Se enfoca en encontrar la distribución óptima del material en una estructura, mediante la supresión de elementos y/o la modificación de la conectividad de los mismos; este enfoque es más complejo, ya que aborda una gran cantidad de variables de diseño.

## 5.5. OPTIMIZACION DE ESTRUCTURAS TIPO CERCHA

El estudio estructural de estos elementos está íntimamente ligado a la aparición de la estática gráfica, la cual brinda diversos métodos de análisis enfocados en distintos aspectos estructurales de las celosías; los primeros métodos de análisis para estos elementos se centraron descubrir el estado en el cual se encontraban los distintos elementos que conformaban esta estructura. A continuación, se abarcarán de manera breve los diferentes métodos de análisis planteados para este tipo de estructura.

### 5.5.1 DIAGRAMA DE ESFUERZOS CREMONA-MAXWELL O MÉTODO DE LOS NODOS

Este método consiste en el desarrollo sistemático del estudio de los diferentes nodos (puntos en los cuales uno o más elementos se encuentran), suponiendo que todos ellos se encuentran en equilibrio; el método representa una gran herramienta en el análisis de este tipo de estructuras, pero se limita a estructuras isostáticas, ya que es inaplicable en problemas donde en un nodo existan más de dos barras con fuerza desconocida.

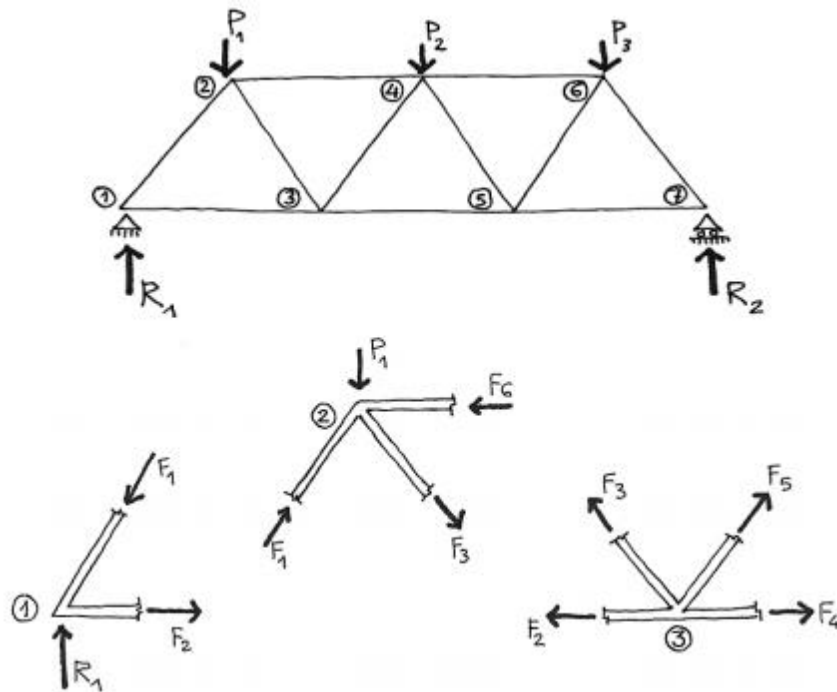


Figura 5-2. Resolución de una celosía por el método de los nodos.  
Fuente: [2]

### 5.5.2 MÉTODO DE RITTER O MÉTODO DE LAS SECCIONES

La sub-división de las celosías en secciones, en las cuales, por medio de cortes se obtuviera un nuevo diagrama de cuerpo libre en el cual las únicas incógnitas fueran, el estado de fuerzas de las barradas cortadas. No obstante, el máximo de barras que se pueden analizar de manera simultánea con este método es tres, ya que, si se supera este número, el problema se indeterminara.

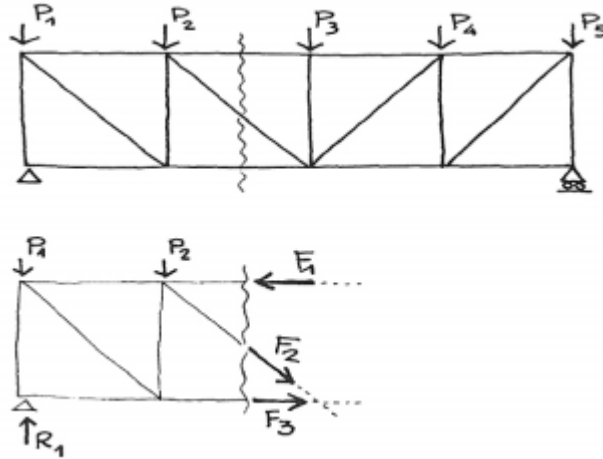


Figura 5-3. Resolución de una celosía por medio del método de las secciones.  
Fuente: [2]

### 5.5.3 MÉTODO DE CULMANN

Es un método gráfico, equivalente al método de las secciones, en el cual es posible obtener los esfuerzos internos de las barras por efectos del sistema de fuerzas actuantes, esto, sin necesidad de resolver todo el sistema (estructura).

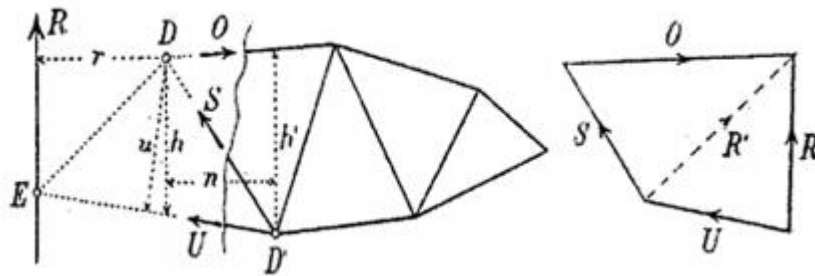


Figura 5-4. Resolución de celosía por medio del método de Culmann.  
Fuente: [2]

La optimización de celosías está íntimamente ligada al desarrollo espacial de sus elementos, esto quiere decir, que los estudios realizados en el ámbito de la optimización se basan, en el comportamiento de los elementos estructurales sometidos a un sistema de cargas determinado y restringido a un espacio limitado; buscando siempre la mejor disposición grupal de estos elementos en dicho espacio, con la intención de lograr obtener un óptimo global par función que se desea optimizar.

## 5.6. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE CELOSÍAS

*“La obra mejor es la que se sostiene por su forma y no por la resistencia oculta de su material”*

Fuente: [48]

Dentro de este concepto, la optimización de celosías se puede catalogar en tres grandes categorías.

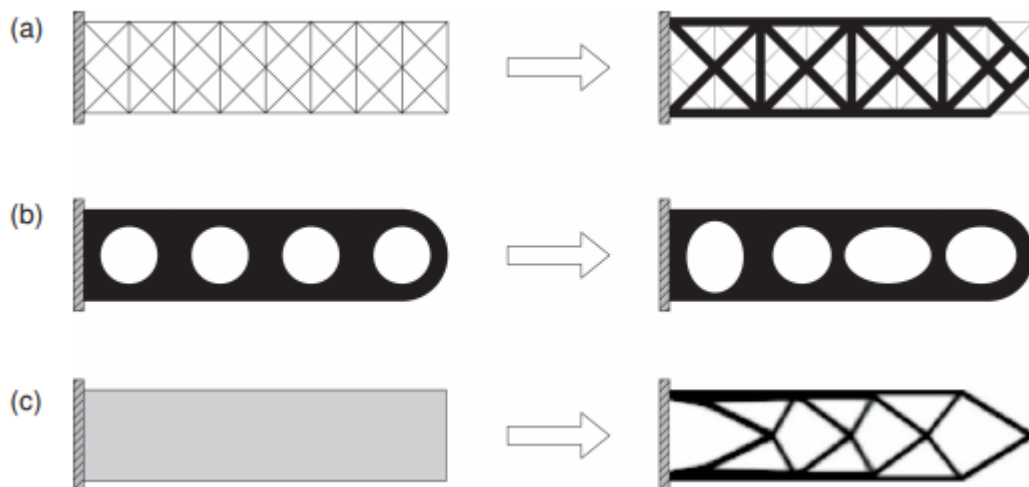


Figura 5-5. Categorías de optimización de celosías: (a) Optimización Paramétrica. (b) Optimización de Forma. (c) Optimización Topológica.

Fuente: [49]

### 5.7. OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA

Este método consiste en discretizar un dominio de diseño continuo, con la finalidad de crear una malla de nodos interconectados entre ellos, generando una gran variedad de posibles geometrías.

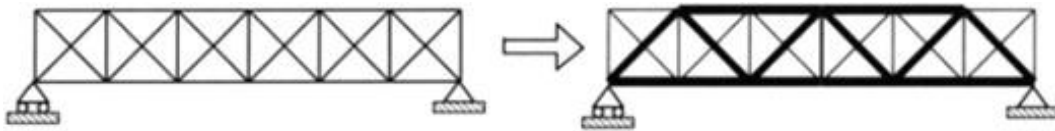


Figura 5-6. Optimización Paramétrica- Sizing Optimization.  
Fuente: [50]

### 5.8. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

El objetivo de este método es encontrar la mejor distribución del material dentro de un volumen de diseño pre-establecido, esto en base a como se distribuyen los esfuerzos a través del dominio cada vez que se somete el mismo, a una carga  $P$  y se retira material (área perteneciente al dominio de diseño).

En este problema se dispone inicialmente solo del sistema de apoyos y de cargas al cual está sometido y restringido el dominio de diseño, luego se introducen cavidades en el mismo, de acuerdo con unos criterios de selección de celdas por cuantía de esfuerzos.



Figura 5-7. Ejemplo de Optimización Topológica de un Dominio de Diseño en Voladizo.  
Fuente: [49]

## 5.9. LÍNEAS ISOSTÁTICAS

Este método se basa en el estudio de la distribución de esfuerzos en un dominio sometido a una fuerza  $P$ , esto en base a la tangente del estado de esfuerzos de cada posible punto de estudio dentro del dominio de diseño, produciendo líneas que atraviesan el diseño con valores de esfuerzos uniformes.

El uso de las líneas isostáticas facilita el estudio del comportamiento de los esfuerzos en un dominio, ya que se muestra de manera bidimensional y lineal la dirección de los esfuerzos internos del dominio estudiado. Estos elementos son usados con el fin de obtener una malla de estudio acorde a las sollicitaciones del caso, en lugar de establecer una malla genérica, la cual no tiene en cuenta el sistema de carga y restricciones del dominio.

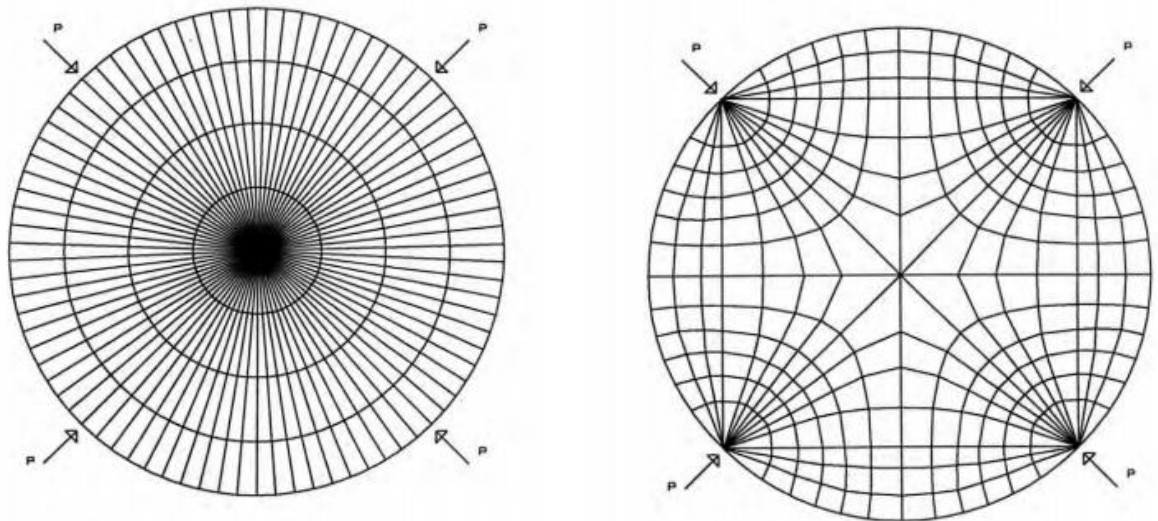


Figura 5-8. Malla En Base A Las Líneas Isostáticas Generadas Por El Sistema De Cargas Inicial.

Fuente: [51]

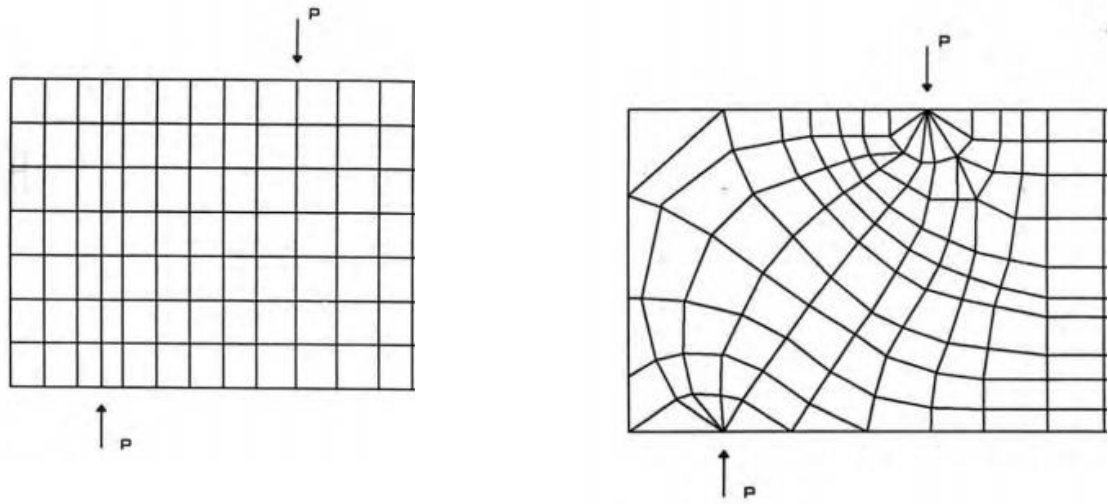


Figura 5-9. Malla Isostática De Un Dominio Rectangular Sometido A Dos Fuerzas P.

Fuente: [51]

## **6. ESTATUTOS LEGALES**

En el presente capítulo se observan las diferentes posturas normativas y legislativas entorno a las construcciones civiles sísmos resistentes.

Tras el impacto constructivo de los materiales metálicos; las diferentes regulaciones sismo resistentes han desarrollado normativas para la construcción de obras civiles de esta índole; la siguiente tabla muestra las diferentes normativas nacionales e internacionales que regulan las construcciones en acero.

Tabla 6-1. Marco Legal de Estructuras Metálicas

<b>NORMA</b>	<b>INCISO</b>	<b>RESUMEN</b>	
NSR-10	<b>TITULO A</b>	Las especificaciones generales del diseño sismo resistente se encuentran conglomeradas en este inciso.	<b>NACIONAL</b>
	<b>TITULO B</b>	Este título especifica la normativa de los requisitos mínimos de las cargas a las cuales las estructuras pueden ser sometidas.	
	<b>TITULO F</b>	Las especificaciones de construcción de estructuras metálicas están consideradas en este inciso de la norma.	
NTC	<b>NTC 5689</b>	Especificación para el diseño y análisis de estructuras en acero.	<b>NACIONAL</b>
	<b>NTC 5832</b>	Prácticas normalizadas para la fabricación de estructuras metálicas industriales.	
ASCEM	<b>EUROCODIGO 0</b>	Bases para el diseño estructural con elementos metálicos.	<b>INTERNACIONAL</b>
	<b>EUROCODIGO 1</b>	Acciones mecánico plásticas de las estructuras.	
	<b>EUROCODIGO 3</b>	Diseño de estructuras en acero.	
	<b>EUROCODIGO 4</b>	Diseño de estructuras mixtas de acero y hormigón.	

	<b>EUROCODIGO 8</b>	Diseño sísmico de estructuras civiles.
NORMATIVA NORTE AMERICANA	<b>AISC 360/ ANSI</b>	Especificaciones del diseño de estructuras metálicas. / Perfiles laminados en frío.
	<b>AISC 341/ ANSI</b>	Provisión sísmica para estructuras metálicas.
	<b>ANSI</b>	Instituto nacional de estándares americanos.
	<b>ASCE</b>	Diseño de cargas mínimas para estructuras civiles.
	<b>ASTM</b>	Especificaciones sobre la calidad de acero.
	<b>AWS</b>	Código de soldadura estructural.
	<b>HSS LRFD AISC</b>	Diseño de carga y factor de resistencia para secciones de acero huecas.

Fuente: Autor

## 7. METODOLOGÍA

La metodología a seguir para el desarrollo de este proyecto está dividida en el desarrollo de 4 etapas, las cuales se basan en la elaboración del módulo de discretización o en mallado, módulo de análisis estructural, módulo de análisis de diseño y, por último, el módulo de optimización.

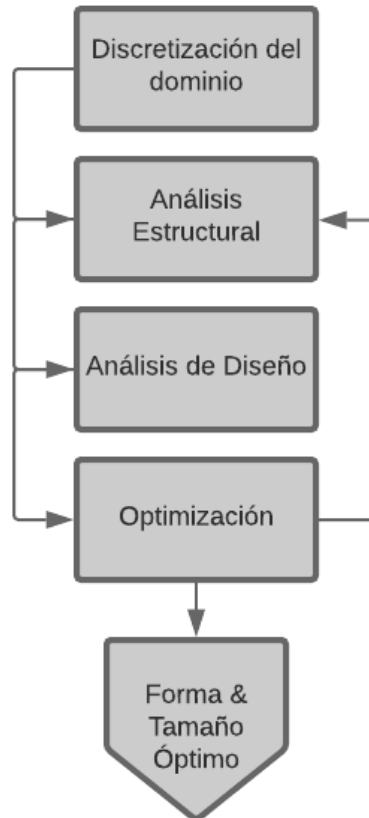


Figura 7.1. Estructura metodológica del proyecto.  
Fuente: Autor.

- **Discretización del dominio**

Se realizará la discretización del dominio planteado por el usuario, donde como datos de salida, se tendrán los nodos y las barras que compondrán la estructura. Por consiguiente, se realizará el análisis de la estructura inicial planteada; la cual nos brindará las cargas a las cuales estarán sometidos nuestros elementos.

- **Análisis Estructural**

Se utilizará la teoría del análisis matricial ya antes mencionada y explicada, para el desarrollo del análisis estructural de las soluciones propuestas durante el proceso de optimización, donde como información de entrada tendrá la información brindada por el módulo de discretización, es decir, **los nodos y las barras**, y como **información de salida**, este, se centrará en las **cargas axiales** a las cuales estarán sometidos los elementos y las deformaciones presentes en los nodos.

- **Análisis de diseño**

El desarrollo de **los parámetros para el análisis de diseño**, se han establecido de acuerdo a las normativas vigentes para proyectos de esta índole, dentro del estudio del estado del arte, se ha seleccionado la **norma extranjera AISC**, la cual resulta ser un aliciente para la formulación de las diferentes normativas colombianas inherentes al proyecto.

- **Optimización**

Tras la discretización y el análisis matricial que resultan ser el insumo para la etapa de optimización, la cual se realizará por medio de **algoritmos genéticos**, los cuales tendrán modificaciones en su programación fuente; modificaciones pensadas con el fin de facilitar la obtención de la solución óptima buscada por el diseñador.

Después de haber realizado todos estos procesos, actividades y análisis, se unirán los diferentes módulos para crear la estructura final del **algoritmo de optimización** utilizado para el desarrollo de este proyecto.

Como se evidencia, la estructura del proyecto está ligada a los análisis de estado del arte actual y futuro, cumpliendo con las expectativas requeridas para el buen desarrollo de una solución, o un acercamiento a la respuesta que nos aflige en la actualidad; ¿Cómo diseñar y construir de manera más eficiente?

Véase el **anexo E (Manual de Epidemia)**, para seguir el ejemplo práctico planteado y complementa la información con la brindada en el inciso **“Estructura del algoritmo Epidemia”**.

## **7.1. RESULTADOS ESPERADOS**

Tras el correcto desarrollo y la adecuada ejecución de las actividades planteadas para alcanzar la culminación del proyecto, se espera alcanzar resultados, que logren encaminar en la dirección correcta **futuros trabajos de optimización de estructural**, tanto a nivel regional, nacional e incluso internacional.

Así que, el principal resultado a esperar tras la culminación de este proyecto resulta ser, **La Optimización de forma y tamaño de estructuras metálicas tipo cercha morfológicamente no definidas, a través del algoritmo genético.**

Tabla 7.1. Resultados Esperados de Acuerdo a los Objetivos Planteados.

<u>RESULTADO</u>	<u>INDICADOR</u>	<u>OBJECTIVO RELACIONADO</u>
Artículos, tesis, libros y Reseñas sobre optimización estructural	Base de Datos	Implementar un algoritmo para optimización de estructuras tipo cercha morfológicamente definidas, a través del algoritmo genético, Epidemia.
Algoritmo de Optimización	Código (.m)	Implementar los algoritmos genéticos como medio iterativo de resolución de problemas de optimización estructural en una plataforma de análisis matricial, para facilitar la interacción con el usuario.

Fuente: Autor.

Dentro de la correcta ejecución de las diferentes actividades inmiscuidas en el desarrollo de este proyecto, se han planteado los siguientes entregables tangibles e intangibles como producto final de la culminación de las metas planteadas para el proceso del adecuado termino de esta tesina.

Los entregables de gran extensión serán en un medio de almacenamiento digital, tal como lo es; una Unidad Flash o un CD-ROM.

- Compendio de datos sobre perfiles metálicos comerciales y estado del arte sobre optimización estructural.  
**Intangible:** Catalogo de Perfiles.  
**Intangible:** Base de Datos- Artículos Científicos.
- Algoritmo de Optimización estructural basado en la búsqueda evolutiva, un algoritmo Genético.  
**Tangible:** Código de Programación en formato (.m).
- Resultados de diversos dominios a dos aguas expuestos al algoritmo Epidemia.  
**Tangible:** Análisis de Resultados.
- Comparación de resultados obtenidos en el problema clásico de 10 barras con los diferentes mostrados en el marco referencial.  
**Tangible:** Peso y puesto en el Ranking.

## 7.2.IMPACTOS

La culminación del presente proyecto tendrá la capacidad de permear diversos aspectos, los cuales rondan desde el carácter social, hasta un entorno netamente científico; es así que, sean planteado posibles impactos, donde cada será estudiado brevemente para presentar la posibilidad y la capacidad de incidir en el aspecto comprendido para el mismo.

Tabla 7.2.Impactos Pertinentes al Proyecto.

<b><u>ASPECTO</u></b>	<b><u>IMPACTO</u></b>	<b><u>SUPUESTO</u></b>	<b><u>PLAZO</u></b>
<b>SOCIAL</b>		<i>Brindar una nueva estrategia de diseño que permita la evolución infraestructural de la nación en pos del post-conflicto</i>	Largo
<b>AMBIENTAL</b>		<i>Reducción de los impactos ambientales producidos por la explotación, al disminuir el gasto de los mismos.</i>	Largo
<b>ECONÓMICO</b>		<i>Reducción de los presupuestos destinados a la construcción de obras públicas y/o privadas gracias a la mínima utilización de materia prima.</i>	Largo
<b>CIENTÍFICO</b>		<i>Permitir observar las ventajas que ofrecen las estrategias de optimización en la evolución del a ingeniería estructural y todas sus profesiones afines.</i>	Mediano

Fuente: Autor

## **8. FUNDAMENTOS MATEMATICOS DE LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL**

En este inciso se tratan las diferentes estrategias, metodologías, principios y reglas, tanto aritméticas, físicas y matemáticas, que se involucran en el desarrollo de cualquier técnica de optimización, enfatizando la optimización de elementos tipo cercha.

## 8.1. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El objetivo de la optimización estructural es obtener un conjunto de valores para los cuales, la función objetivo se hace óptima (mínima o máxima dependiendo del problema) y de manera simultánea logre satisfacer las diferentes restricciones a las cuales está sujeta. En términos matemáticos esto se puede definir como:

Encontrar el conjunto de variables de diseño  $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^n \quad \forall n = 1, 2, 3$   
Que optimizan

$$H = F(\mathbf{X})$$

Sujeto al conjunto de restricciones:

$$g_i(\mathbf{X}) \quad \forall i = 1, 2, \dots, m$$

$$X_j^l \leq X_j \leq X_j^s \quad \forall j = 1, 2, \dots, k$$

Dónde:  $H$  es la propiedad estructural a optimizar (peso, resistencia, etc.),  $\mathbf{X}$  es el conjunto de variables de diseño definido por las propiedades de la estructura,  $k$  es el número de variables de diseño,  $g_i(\mathbf{X})$  es el conjunto de restricciones de diseño,  $m$  es el número total de restricciones de diseño [7].

## 8.2. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO MATRICIAL DE RIGIDEZ

Este método se basa en la relación de las fuerzas con los desplazamientos de los elementos de una estructura cualquiera, mediante un campo vectorial definido por su rigidez representado a través de una matriz. De acuerdo con en estas relaciones es posible obtener diversas ecuaciones que axiomáticamente tengan el mismo fundamento aplicando las ecuaciones constitutivas de los materiales y las ecuaciones de movimiento [52].

## 8.3. DEFORMACIONES LONGITUDINALES

Estas se dan en sentido de los ejes principales y describen las deformaciones más relevantes por efectos de las fuerzas a tracción o compresión.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{Deformación en el eje } X)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (\text{Deformación en el eje } Y)$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (\text{Deformación en el eje } Z)$$

Ecuación 8-1. Deformaciones Longitudinales De Un Medio Continuo.

#### 8.4. DEFORMACIONES ANGULARES

Describen las deformaciones de las fuerzas tangenciales o de corte.

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

Ecuación 8-2. Deformaciones Angulares de un Medio Continuo.

#### 8.5. ECUACIONES CONSTITUTIVAS

##### 8.5.1 LEY DE HOOKE

Todos los cuerpos en su estado inicial de carga describen un comportamiento lineal, este, se rige por las “*ley de Hooke*”, la cual expresa que la proporcionalidad entre los esfuerzos y las deformaciones producidas en un cuerpo un tensor de cargas; una variable fundamental en este cálculo resulta ser la constante de proporcionalidad, la cual depende de las características del material [53], esto, se puede describir de la siguiente manera:

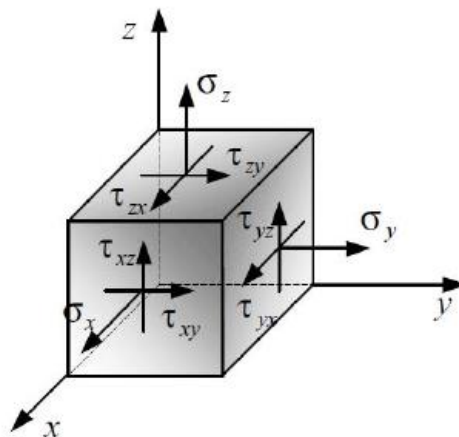


Figura 8-1. Estado del Esfuerzos de un Medio Continuo.

Fuente: [54]

## 8.6. ECUACIONES DE EQUILIBRIO

Este axioma establece que las condiciones de las cargas externas e internas de un cuerpo sometido a esfuerzos deben ser cero para cumplir con las leyes de la estática.

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ X + \frac{\delta\sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta\tau_{xy}}{\delta y} + \frac{\delta\tau_{xz}}{\delta z} &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ Y + \frac{\delta\tau_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta\tau_{yz}}{\delta z} &= 0 \\ \sum F_z &= 0 \\ Z + \frac{\delta\tau_{zx}}{\delta x} + \frac{\delta\tau_{zy}}{\delta y} + \frac{\delta\sigma_z}{\delta z} &= 0\end{aligned}$$

Ecuación 8-3. Ecuación Constitutiva (Ley de Hooke).

Tras obtener los fundamentos de la teoría de la elasticidad (equilibrio, elasticidad y esfuerzo-deformación) es posible encontrar la solución a problemas, simplemente sustituyendo de manera sucesiva todas las ecuaciones, todo esto, para obtener las **Ecuaciones de Navier**, las cuales son la base de la teoría de la elasticidad y del método matricial.

$$\{F_c\} + [A]^T \{k\} [A] \{d\} = \{0\}$$

Ecuación 8-4. Ecuación Fundamental del Equilibrio.

### 8.6.1 GRADOS DE LIBERTAD Y CONDICIONES DE CONTORNO

Este concepto hace referencia al número mínimo de parámetros reales necesarios para lograr describir el tensor de deformaciones de una estructura. Los grados de libertad, se asignan a los nodos.

### 8.6.2 ANÁLISIS MATRICIAL DE UNA ARMADURA

Las cerchas son estructuras que se encuentran conformadas por un cierto número de barras conectadas entre sí, de tal modo que estos tienden a **formar triángulos**. En este sentido, el número mínimo de barras para tener una cercha es de tres; con una gran particularidad presente en las estructuras tipo cercha, y esta es, que sus elementos están sometidos principalmente y en algunos casos, solo a **cargas axiales**, es decir que entre ellos no se transmitirán momentos flectores ni torsiones.

Para desarrollar la teoría del diseño de cerchas, se consideran las siguientes suposiciones:

- La relación existente en los esfuerzos y deformaciones es **lineal** (Teoría de la Elasticidad).
- Las conexiones entre los elementos se consideran en una **articulación perfecta**.
- El único tipo de fuerzas presentes en los elementos serán las que estén aplicadas a lo largo del eje principal del mismo, (**solo fuerzas axiales**).
- No hay efectos de flexión en los elementos, por lo tanto, se consideran **totalmente rectilíneos**.
- Las deformaciones generadas por el cambio de longitud no son consideradas, es decir se supone que la **relación de Poisson del material es cero**.
- Las cargas serán aplicadas, únicamente en los nodos del sistema.

Basados en que la cercha solo tendrá desplazamientos longitudinales (sin rotación), el vector de desplazamiento  $\{U\}$  tendrá solo tres componentes para el caso de una cercha tridimensional (Estructura Reticular) o dos componentes para una cercha normal, los cuales corresponderán a los grados de libertad en direcciones de los ejes coordenados.

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{Bmatrix}$$

Ecuación 8-5. Vector de Desplazamientos.

De manera análoga, se puede definir el vector de Fuerzas  $\{F\}$  como:

$$F = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix}$$

Ecuación 8-6. Vector de Fuerzas.

Así que, para obtener la matriz de rigidez  $[K]$ , que relaciona las fuerzas con los desplazamientos, es necesario aplicar el concepto de desplazamientos unitarios en cada una de las direcciones principales de análisis.

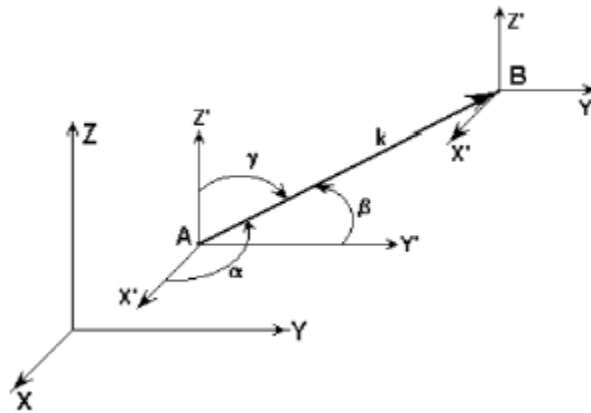


Figura 8-2. Elemento Biarticulado de una Armadura espacial Con Rigidez K.  
Fuente: [54]

Desarrollando el concepto del desplazamiento unitario en cada dirección principal se logran alcanzar las siguientes fuerzas.

## 8.7. MODELOS MATEMÁTICOS

El desarrollo de modelos matemáticos con la capacidad de describir de manera precisa, acertada y oportuna, los efectos de los sistemas de fuerzas sobre un cuerpo rígido, es imperativo, es por esto, que se crearon los siguientes modelos matemáticos ligados a condiciones físicas específicas, a las cuales estarán sometidas los diferentes modelos físicos estudiados y optimizados.

$$\begin{aligned} F_{xA} &= k * \cos^2 \alpha & F_{xB} &= -k * \cos^2 \alpha \\ F_{yA} &= k * \cos \alpha \cos \beta & F_{yB} &= -k * \cos \alpha \cos \beta \\ F_{zA} &= k * \cos \alpha \cos \gamma & F_{zB} &= -k * \cos \alpha \cos \gamma \end{aligned}$$

Ecuación 8-7. Fuerzas en los Extremos de un elemento Biarticulado.

Dónde:  $\alpha$  (alfa) representa el ángulo medido del eje z al eje axial del elemento prismático,  $\beta$  (beta) es el ángulo obtenido de la misma relación anterior, solo que esta vez se usa como punto de referencia, el eje y.

Estos ángulos se conocen como los “**Ángulos de Euler**”, los cuales son definidos a través de la transformación de un sistema de coordenadas a otro, mediante una matriz de cosenos directores o **matriz de transformación**. La rigidez del sistema se puede obtener a través del concepto de desplazamientos unitarios uniendo la anterior matriz con los valores de K, lo que da como resultado lo siguiente:

$$[K_g] = \begin{bmatrix} c^2\alpha & cac\beta & cac\gamma & -c^2\alpha & -cac\beta & -cac\gamma \\ cac\beta & c^2\beta & c\beta c\gamma & -cac\beta & -c^2\beta & -c\beta c\gamma \\ c\gamma c\alpha & c\beta c\gamma & c^2\beta & -c\gamma c\alpha & -c\gamma c\beta & -c^2\gamma \\ -c^2\alpha & -cac\beta & -cac\gamma & c^2\alpha & cac\beta & cac\gamma \\ -c\beta c\alpha & -c^2\beta & -c\beta c\gamma & c\beta c\alpha & c^2\beta & c\beta c\gamma \\ -c\gamma c\alpha & -c\gamma c\beta & -c^2\gamma & c\gamma c\alpha & c\gamma c\beta & c^2\gamma \end{bmatrix} * \frac{EA}{L}$$

Ecuación 8-8. Matriz de Rigidez Global.

El anterior tensor, también se puede expresar en términos de cosenos directores, la cual es la más común.

$$[K_g] = \begin{bmatrix} l^2 & lm & ln & -l^2 & -lm & -ln \\ lm & m^2 & mn & -lm & -m^2 & -mn \\ ln & mn & n^2 & -ln & -mn & -n^2 \\ -l^2 & -lm & -ln & l^2 & lm & ln \\ -lm & -m^2 & -mn & lm & m^2 & mn \\ -ln & -mn & -n^2 & ln & mn & n^2 \end{bmatrix} * \frac{EA}{L}$$

Ecuación 8-9. Matriz de Rigidez Global en Función de los Cosenos Directores.

Donde l, m y n son los cosenos directores, y definen la relación entre los grados de libertad en coordenadas globales y locales:

$$l = \frac{x_j - x_i}{L} \quad m = \frac{y_j - y_i}{L} \quad n = \frac{z_j - z_i}{L}$$

Ecuación 8-10. Cosenos Directores de las Direcciones Principales.

Tras aplicar la ley de Hooke, se logra obtener la relación entre las fuerzas y los desplazamientos en los puntos A y B del elemento.

$$\begin{Bmatrix} F_{xA} \\ F_{yA} \\ F_{zA} \\ F_{xB} \\ F_{yB} \\ F_{zB} \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L} * \begin{bmatrix} l^2 & lm & ln & -l^2 & -lm & -ln \\ lm & m^2 & mn & -lm & -m^2 & -mn \\ ln & mn & n^2 & -ln & -mn & -n^2 \\ -l^2 & -lm & -ln & l^2 & lm & ln \\ -lm & -m^2 & -mn & lm & m^2 & mn \\ -ln & -mn & -n^2 & ln & mn & n^2 \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} d_{xA} \\ d_{yA} \\ d_{zA} \\ d_{xB} \\ d_{yB} \\ d_{zB} \end{Bmatrix}$$

Ecuación 8-11. Expresión Matricial de una Armadura.

$$\begin{Bmatrix} F_A \\ F_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{AA} & k_{AB} \\ k_{BA} & k_{BB} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} d_A \\ d_B \end{Bmatrix}$$

Ecuación 8-12. Expresión General para el Análisis Matricial de una Cercha.

Dónde:

- $F_A$  = Vector de fuerzas aplicadas (conocidas).
- $F_B$  = Reacciones en los apoyos (desconocidas).
- $d_A$  = Vector de desplazamientos en los nudos libres (desconocidos).
- $d_B$  = Vector de desplazamientos en los apoyos (conocidos).

## **9. ANALISIS DE DOMINIOS BIDIMENSIONALES**

En este capítulo se profundiza las aplicaciones de los principios matemáticos anteriormente estudiados en conjunto con las estrategias y técnicas de optimización anteriormente tratadas, todo en función del análisis y estudio de medios continuos bidimensionales.

### 9.1. ANÁLISIS DE CERCHAS MORFOLÓGICAMENTE DEFINIDAS POR MEDIO DE DOMINIOS CONTINUOS DE DISEÑO.

De acuerdo con la finalidad del desarrollo de la metodología de optimización, es necesario la creación, de un sistema de análisis que tenga la capacidad de describir de manera matemática los diferentes fenómenos físicos a los cuales estará sometido el dominio de diseño, ya que se evaluara este, como un cuerpo rígido, estableciendo sus características dentro de las permitidas por los modelos matemáticos propuestos anteriormente.

El uso de un dominio, supone un reto, entorno a la ejecución de los diferentes principios físicos que deben regir a estos sistemas, es por eso que se han simplificado los modelos, en sencillos campos vectoriales con la capacidad de adaptarse, transformarse y de representar de manera precisa, el comportamiento de esta estructura metálica tipo cercha morfológicamente definida, es decir, el uso de un dominio de diseño, el cual tendrá toda la información pertinente para el análisis, desratización y diseño.

### 9.2. ANÁLISIS DE CUERPO RÍGIDO A DOMINIOS CONTINUOS DE DISEÑO ISOSTÁTICOS

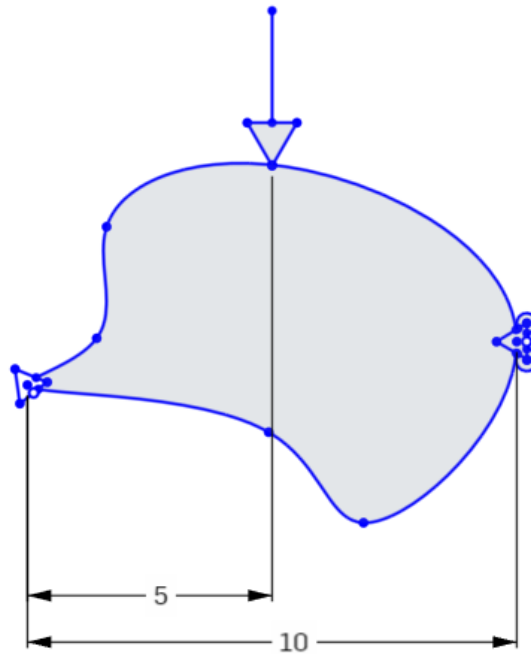
Se han desarrollado tres modelos matemáticos, los cuales juntos, tienen la capacidad de simular los diferentes efectos que los sistemas de cargas puedan provocar en el dominio, estos modelos, así que a continuación, tan solo hondara en la forma resumida de su aplicación.

Estos tres modelos describen diferentes efectos físicos, no obstante, es necesario, el encontrar la forma de unificar estos modelos, con la finalidad de realizar el análisis con el menor gasto computacional, sin perder precisión en los cálculos. Así que, en función a esto, surge el siguiente modelo matemático:

### 9.3. MODELO UNIDIMENSIONAL

Este modelo se basa en el uso de restricciones isostáticas alineadas entre sí, es decir, no hay un delta de altura entre los apoyos, lo que reduce el análisis a un problema unidimensional.

$$\begin{pmatrix} \bar{R} \\ R_A \\ R_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{l-x}{l} & 0 \\ 0 & \frac{x}{l} \end{pmatrix}^* \begin{pmatrix} \bar{P} \\ P \\ P \end{pmatrix}$$



$L=10$  mts  
 $X=05$  mts  
 $P=10$  kN

$$\begin{bmatrix} R_A \\ R_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{10-5}{10}\right) & 0 \\ 0 & \left(\frac{5}{10}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 10 \\ 10 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R_A \\ R_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 5 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

La ecuación que describe este modelo de forma sencilla y precisa es la siguiente:

$$f(\xi) = \vec{R} \therefore \{\xi \in [0, l]\}$$

Nótese que el campo vectorial está limitado por la elongación del dominio, en x o en y, pero nunca en ambas direcciones, es decir, el análisis se centra, en las

interacciones de las restricciones frente a las **tendencias de giro** del dominio generadas por el sistema de cargas.

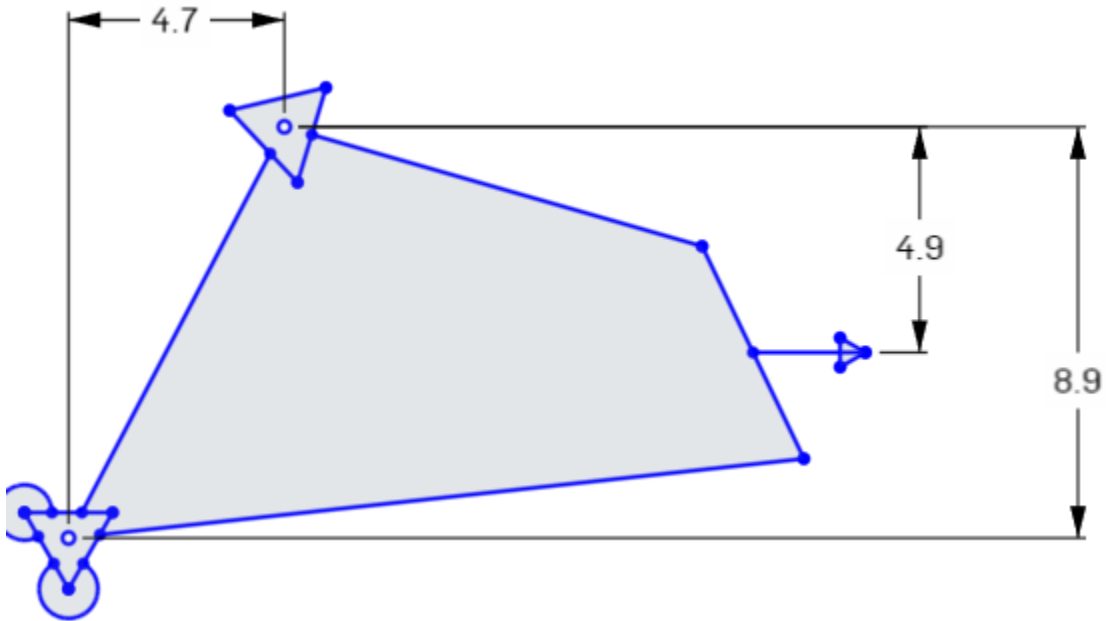
$$x_p \geq x_r \wedge P \leq 0 \Rightarrow M(X) \geq 0$$

Ecuación 9-1. Restricciones Constitutivas del Modelo Unidimensional.

#### 9.4. MODELO BIDIMENSIONAL

El modelo bidimensional es un recurso usado para caracterizar de manera completa el dominio de diseño (área planteada por el diseñador); es decir, tiene la capacidad de estudiar las tendencias de giro de todo el dominio sin importar su eje de acción, esto representa un gran avance ya que, simplifica la relación de los efectos del sistema de cargas en el x y los mismos efectos en el eje y.

$$\begin{bmatrix} R_Y \\ R_X \\ R_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{l}{ba}\right) & \left(\frac{l-x}{ba}\right) & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{x}{l}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p \\ p \\ p \end{bmatrix}$$



Ba= 4.7 mts  
L= 8.9 mts  
X =4.9 mts  
P= 10 kN

$$\begin{bmatrix} R_Y \\ R_X \\ R_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{8.9}{4.7}\right) & \left(\frac{8.9 - 4.9}{4.7}\right) & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{4.9}{8.9}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R_Y \\ R_X \\ R_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10.42 \\ -10 \\ 5.50 \end{bmatrix} kN$$

La ecuación general que describe este modelo es la siguiente:

$$f(\eta) = \vec{R}_{(x,y)} \therefore \{\eta \in [0, l] \wedge [0, x]\}$$

Nótese que la solución está dada en un tensor bidimensional, lo cual significa, que las cargas con efectos múltiples pueden ser evaluadas sin necesidad de ser descompuestas en sus componentes principales (componente x y componente y); esto resulta ser muy práctico al momento de someter elementos bidimensionales a sistemas de cargas que pueden producir efectos axiales, flectores, cortantes, etc.

## 9.5. DISCRETIZACIÓN DE DOMINIOS CONTINUOS DE DISEÑO

Los nodos resultan ser el elemento más importante en el desarrollo del diseño de una estructura reticular, ya que, de ellos, no solo depende su morfología, sino también factores, como la distribución de esfuerzos, la distribución de los elementos a lo largo del dominio de diseño, la magnitud de la carga crítica que el sistema estructural puede soportar, etc.

En consecuencia, a esto, encontrar la manera más adecuada de ubicarlos a través del dominio, resulta ser imperativo, es por ello que se han desarrollado metodologías para la creación de nodos dentro del dominio de diseño, ya que cada uno de ellos resultara ser una posible parte de la solución, por que como se mencionó antes, estos terminarán definiendo todas las características de la estructura.

Así que en función a estas necesidades se han desarrollado las siguientes metodologías de discretización basadas en los parámetros iniciales, a los cuales está ligado el dominio de diseño: sistema de cargas y sistemas de restricciones de movimiento.

### 9.5.1 METODOLOGÍA DE DISCRETIZACIÓN RXP

Este método de discretización se basa en la implementación de campos de distribución de esfuerzos o afectaciones que pueden tener las cargas sobre el dominio, es decir, cada carga, según su magnitud, afecta diferentes áreas del dominio en diferentes proporciones.

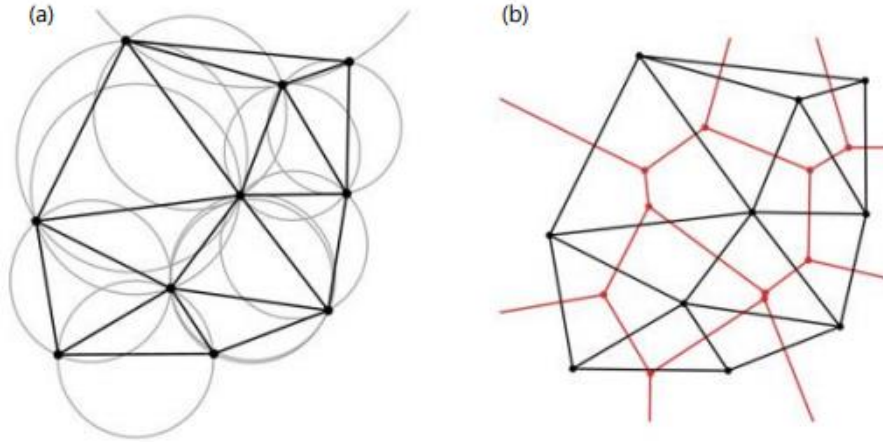


Figura 9-1. (a) Discretización por medio de RTxP  
Figura 9-2.(b) Discretización por medio de RxP.  
Fuente: Autor.

Usando este principio se creó un modelo matemático con la capacidad de expresar de manera numérica esta condición. Este modelo se basa en crear círculos que representan el área de influencia de la carga sobre el dominio, influencia discriminada por su magnitud, de esta forma, se obtendrán diferentes áreas, de diferentes magnitudes, luego de obtener estos círculos, los puntos en el que dos o más de ellos se cruzan, se crea un nodo, siguiendo el principio de que, en estos puntos exactos, las influencias de las cargas serán mayores, haciendo necesario la existencia de un nodo y posiblemente un elemento estructural.

$$\Gamma_i = \frac{\varphi \text{Sen}\left(\frac{\alpha}{\varphi}\right) + \varphi \text{Cos}\left(\frac{\beta}{\varphi}\right) + x}{\varphi} = \xi$$

Ecuación 9-2, Radio de Discretización en Función de la Dirección de los Esfuerzos.

Como se evidencia en la anterior ecuación, el valor de los radios de los círculos, que representan la influencia de la carga en el dominio, está dado por la interacción de sus componentes con el espacio que las rodea, dicho espacio, comprendido entre los nodos que definen a los segmentos, es por esto, que este modelo aborda la distribución de influencia como la definición del estado del dominio.

$$\frac{dx}{d\Gamma} = \xi(x, y) \Rightarrow \frac{2b \pm \sqrt{(2b)^2 - 4[b^2 - \Gamma i^2 + (x_i - \alpha)^2]}}{2}$$
$$Y_{i_n} = \frac{2b \pm \sqrt{(2b)^2 - 4[b^2 - \Gamma i^2 + (x_i - \alpha)^2]}}{2}$$

Ecuación 9-3. Discretización Radial por medio de Factores de Esfuerzo.

Así que al final, por el principio de superposición, el compendio de todos estos radios es la afectación total de las cargas sobre el dominio.

$$y_{i_n} \left( \Gamma i \left( \vec{P}, \bar{x}(\Gamma i_n) \right) \right)$$

Al final, la función que describe la variabilidad de la zona de influencia depende del cambio del radio, que a su vez depende de dos factores, la magnitud de la carga, su ubicación, y las condiciones de contorno del segmento en el cual se encuentra la carga.

### 9.5.2 METODOLOGÍA DE DISCRETIZACIÓN RTXP

Este método de discretización se caracteriza por ser más ortodoxo, su funcionalidad se puede dividir en tres pasos fundamentales, los cuales están basados en el desarrollo de la distribución estocástica de los nodos en una línea de influencia. Los pasos antes mencionados, son los siguientes:

El primer paso, consta de la discretización de los segmentos, esta discretización, solo busca encontrar de manera estocástica puntos críticos en cada uno de estos segmentos, dando como producto final, un segmento con diversos nodos en él; este proceso debe aplicarse la misma cantidad de veces que segmentos existan en el dominio.

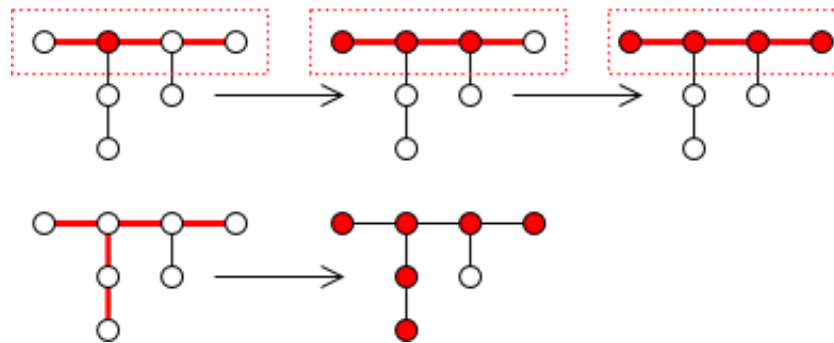


Figura 9-3. Discretización de los Segmentos.

El segundo paso, crea una línea que interconecta los nodos de los segmentos creando una malla rectangular interna, esta malla tiene la función de identificar las zonas de cruce, es decir, aquellos puntos que tienen una alta posibilidad de convertirse en una solución.

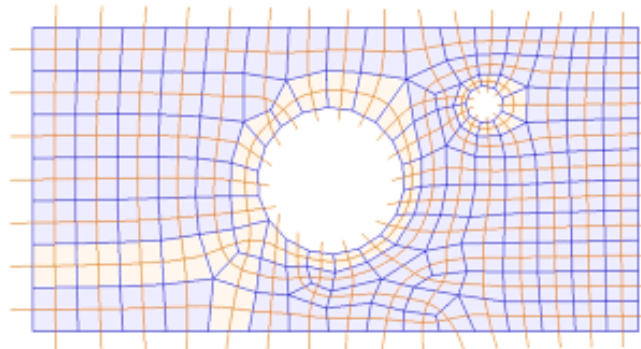


Figura 9-4. Malla Interna Producida por la interconexión de los nodos de los segmentos.

El tercer y último paso, cumple una de las funciones más importantes, en este punto, la malla creada es demasiado ortogonal y muy poco practica para los fines de la investigación es por eso, que se realiza el desvanecimiento de la malla interna, conservando solo los nodos, ya que estos son, en última estancia, los que definirán la solución al problema.

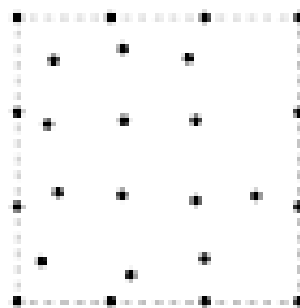


Figura 9-5. Distribución de Nodos Dentro Del Nudo.

Todo esto basado en el desarrollo del algoritmo genético, el cual, tiene la capacidad de mutar la posición de los nodos, lo que aumenta de manera exponencial, la probabilidad de encontrar la combinación de estos que produzca la estructura óptima para el sistema de cargas y restricciones ofrecidas por el usuario.

## **10. METODOS DE VALIDACIÓN Y COMPARATIVA DE RESULTADOS.**

En el presente inciso se explica el principal método de validación y evaluación de los algoritmos y estrategias de optimización, junto con la recopilación de resultados de diferentes autores ante este método.

## 10.1. MÉTODOS DE VALIDACIÓN

Desde que se desarrollaron los diferentes métodos de optimización, se ha buscado desarrollar formas para validar la eficiencia de estos, el primero en hacer esto fue De Jong [55] que estableció una serie de funciones donde los métodos de optimización convencionales fallaban. El criterio que estableció fue, que, si un algoritmo era capaz de localizar los puntos óptimos de una función en menor tiempo que otro, esta última era mejor, no obstante, posteriormente se estableció que un algoritmo no puede funcionar correctamente en todos los casos.

Rajan [8] estableció una serie de problemas para validar y evaluar la bondad de los métodos de optimización aplicados al enfoque estructural; entre esos problemas se encuentra uno de los problemas clásicos más importantes en la optimización de estructuras: el problema de la estructura de seis (6) nodos y diez (10) barras, (ver Figura 5); Donde, para esta estructura, la distancia entre los nodos 1-2, 2-3 y 3-4 es de 9140 mm quedando el resto de la geometría definida por estos nodos. La fuerza  $F$  aplicada en los nodos 2 y 3 es de 445 kN, siendo el material empleado para la fabricación de la estructura un aluminio con un módulo de elasticidad  $E= 68950$  MPa y una densidad  $\rho= 2,76 \cdot 10^{-6}$  kg/m<sup>3</sup>. Los nudos restringidos son el 1 y el 6 que trabajan como una articulación; la deformación máxima admisible medida sobre los tres ejes es de 50,8mm y una tensión máxima admisible de 172 MPa

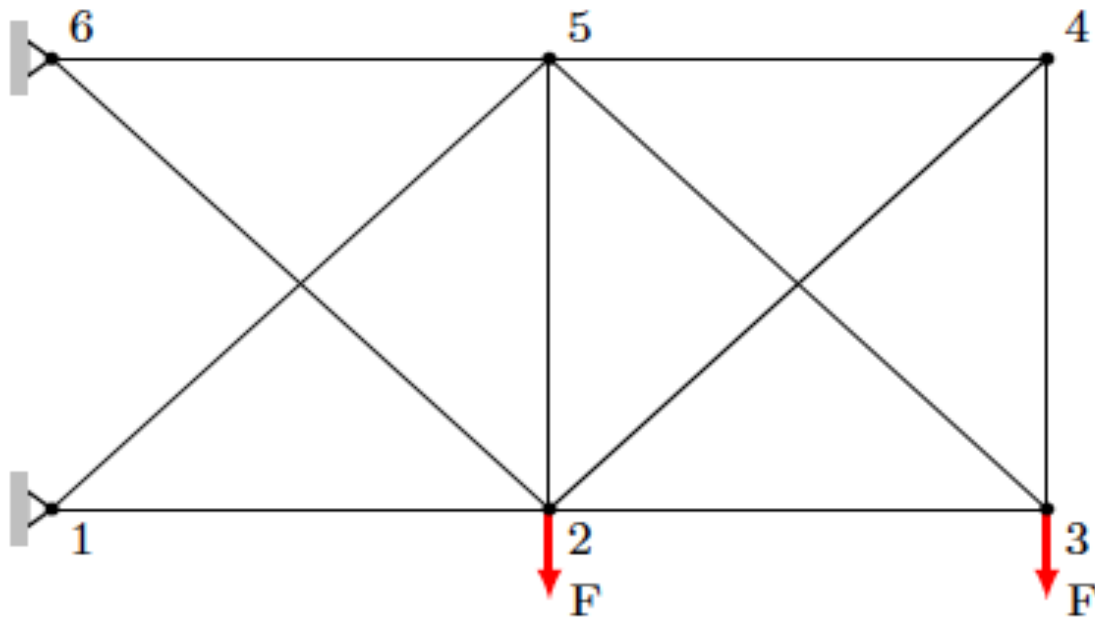


Figura 10-1. Estructura de diez (10) barras y seis (6) nudos  
Fuente: [32]

Este problema ha sido el pináculo en la validación de la bondad de las metodologías desarrolladas por los investigadores, como se muestra en la Tabla 9-1; sin embargo,

cabe aclarar que los algoritmos que no lograron la mejor solución para este problema bajo el postulado de De Jong [55] siguen siendo eficientes para otro tipo de problemas.

Tabla 10-1. Comparativa de los resultados obtenidos por diferentes autores sobre el problema estructural clásico de 10 barras y 6 nodos.

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Peso (kN)</b>	<b><math>\delta_{max}</math> (mm)</b>	<b><math>\sigma_{max}</math> (Mpa)</b>	<b>Algoritmo</b>
Ebenau [56]	2005	12,04	50,8	131,5	ES
Balling [45]	2006	12,17	50,8	131,9	GA
Tang [46]	2005	12,52	50,795	127,1	GA
Rajan [8]	1995	14,27	50,546	107,2	GA
Ai & Wang [57]	2011	14,31	n.d.	n.d.	GA
Groenwold [42]	1999	18,66	n.d.	n.d.	GA
Kaveh [58]	2006	19,27	n.d.	n.d.	GA
Shutte [40]	2003	20,5	n.d.	n.d.	PSO
Lee & Geem [59]	2005	20,8	n.d.	n.d.	HS
LI [41]	2007	20,81	n.d.	n.d.	PSO

Fuente: Autor

## **11. ESTRUCTURA DEL ALGORITMO EPIDEMIA**

En el presente inciso se aborda el funcionamiento del pseudo-código junto a sus estrategias y metodologías para el desarrollo de la búsqueda del estado más apto para las condiciones planteadas.

## 11.1. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE FORMA Y TAMAÑO “EPIDEMIA”

Epidemia es una aglomeración de estrategias y métodos de optimización estructural basado en los principios de la programación enfocada a objetos y codificadas en base a los algoritmos evolutivos, los cuales, como se ha mencionado antes, imitan el proceso evolutivo de una especie sometida a diferentes estímulos.

En este caso epidemia representa una nueva versión y postura al desarrollo de algoritmos evolutivos, ya que el principio de un algoritmo evolutivo es encontrar el individuo más apto a través de diferentes iteraciones, generando en cada una de ellas un individuo con las características necesarias para afrontar los parámetros a los que estará sometido, ese es el funcionamiento básico de un algoritmo evolutivo (**algoritmo genético**), estrategia que funciona muy bien cuando el modelo a optimizar se puede describir a través de una función que converja, algo que no siempre sucede, y aunque podrían considerarse casos aislados, es nuestro caso, el desarrollo de la morfología de una cercha isostática puede variar de acuerdo a las especificaciones requeridas, a los parámetros a los que está sujeta, la normativa de diseño e incluso el estado en el que se encuentra en un tiempo  $T=x$ , puede definir el estado en el que estará en un tiempo  $T=x+1$ .

Es por esto, que epidemia, representa una metodología diferente, aun basada en procesos evolutivos, pero supeditada a estrategias probabilísticas que definen la amalgama de soluciones y de acuerdo con el peso de afinidad de cada una, precisa cuál de ellas se adapta mejor a las condiciones de contorno planteadas; permitiendo interactuar las características esenciales del diseño morfológico sin ninguna restricción.

Así que epidemia imita el brote de un virus en un población determinada, de la cual se han definido parámetros como tasa de natalidad, tamaño, características individuales y distribución dentro del conjunto (**Dominio de diseño**), y usando estos parámetros evalúa la probabilidad de que cada uno de los individuos se vea afectado por este brote, y de ser así, con qué grado de levedad se verán afectados y como esto variara el comportamiento de la población, todo esto para lograr encontrar el valor fitness de cada individuo, el cual representa cuan apto o cuan resistente es al brote en ese periodo; con esta información y usando la base de datos recopilada, epidemia usa sus herramientas (**mutación, cruce, selección y discriminación**) para lograr encontrar el estado con el valor fitness más eficiente, y así lograr encontrar el óptimo de la función.

La flexibilidad de las herramientas principales y secundarias, además sus diferentes protocolos internos, le permite a epidemia establecer y variar sus estrategias de optimización, consintiendo el ajuste automático de los parámetros de diseño morfológico, solucionando el problema de modelos divergentes.

La versatilidad de epidemia se basa en la capacidad de ejecución de sus procesos y subprocesos con diferentes parámetros enfocados en una misma meta, lo que le permite **experimentar en diferentes grados diferentes características de diferentes individuos**, recopilando diferentes datos y sopesándolos estadísticamente para poder definir que herramienta o estrategia usara a continuación con el conjunto, o con el individuo.

Epidemia, no solo imita el proceso de un **brote pandémico**, sino que también imita el **proceso evolutivo** de la población afectada; lo primero para poner a prueba las características unitarias y globales, y lo segundo, para lograr encontrar estado de la población en la cual la misma muestra la mejor respuesta a dicho brote. La imitación de estos procesos es posible a través de herramientas tales como: **cruce, mutación, selección y discriminación**; que a su vez cuentan con subherramientas que permiten la recopilación de información y la toma de decisiones; a continuación, se abordaran las herramientas y sus estrategias.

## **11.2. BROTE**

Esta estrategia es la cúspide del desarrollo de todas y cada una de las herramientas planteadas para la ejecución de epidemia; ya que la herramienta cruce es la encargada de definir los **parámetros individuales y colectivos base**, para los cuales las herramientas mutación, selección y discriminación usaran para el desarrollo de sus metodologías.

Es decir, cruce nos dirá que características son esenciales, primordiales y de prioridad al momento de ejecutar todas y cada una de las rutinas y subrutinas de optimización planteando la siguiente hipótesis para dar uso a esta estrategia.

Dentro del episodio de un brote viral que es capaz de adaptarse y evolucionar, es necesario que la población afectada, tenga una tasa de natalidad que supere la tasa de mortalidad dictada por el brote, de no ser así, dicha población se extinguirá antes de alcanzar los rasgos evolutivos necesarios para afrontar la epidemia, no obstante, sabiendo que la natalidad es un subproceso imperativo solo porque permite tomar las mejores características de los individuos existentes y crear nuevos de ellos con un valor fitness más considerable, es posible simular esta, a través de la siguiente estrategia:

El brote viral ataca la población inicial, la cual está sujeta a unas condiciones de contorno y varios parámetros que definen sus características tanto como conjunto como individuos, lo que permite encontrar un valor Fitness para cada uno de los elementos, lo cual, a su vez, permite definir las características generales de aquellos con el mejor valor fitness, con el peor valor fitness, y lo que es más importante, la predicción de su comportamiento con el cambio de parámetros.

La estrategia brote, es el vector de las funciones divergentes, lleva todas y cada una de las soluciones a través del mismo camino, sopesando diferentes características, permitiendo encontrar el punto de estabilidad del modelo.

### 11.2.1 NATALIDAD

No obstante, cruce cuenta con una subrutina o subproceso, la estrategia de natalidad es una forma en este caso de diversificar la población existente para lograr encontrar mayores variaciones en la relación de sus valores fitness y sus características, cabe destacar que esta subrutina es no es una estrategia principal de optimización como lo es en los algoritmos genéticos, en este caso, dicha estrategia tan solo una herramienta minúscula utilizada para generar cambios en las características individuales y locales.

Así que la subrutina de natalidad sopesa ciertas características básicas de cada individuo, y con ello, crea uno nuevo en la siguiente iteración, lo que conlleva a la reestructuración y evaluación de toda la población.

### 11.3. INFECCIÓN

La estrategia infección, está ligada a la **hipótesis evolutiva**, la cual sostiene que pequeñas variaciones en los individuos pueden causar grandes efectos en la comunidad, es decir cambiar pequeños factores y/o parámetros específicos de los individuos y luego evaluar su respuesta a través de diferentes generaciones al brote, puede generar un cambio colectivo significativo, el cual puede ser positivo o negativo.

Como se menciona antes, los efectos de esta herramienta es variar la configuración actual, es decir la configuración de  $T=x$ , para lograr encontrar su respuesta en  $T=x+1$ , y compararla con los resultados de  $T=x$ ; la eficiencia de esta estrategia se encuentra en que la evaluación realizada por cruce, se conoce las características y parámetros individuales que son un factor relevante para el desempeño del conjunto frente al brote, así que, de acuerdo a las características iniciales de la población y a través de un proceso aleatorio (imitando a las **variaciones genéticas** producidas por la evolución) se generan pequeños cambios en individuos seleccionados por la estrategia **selección**.

Esta herramienta genera su utilidad en función, de que cada cambio que realiza ha sido previsto en su base de datos, es decir, se tiene información recolectada de como responden las diferentes características a diferentes escenarios, teniendo en cuenta, que la base de datos es limitada y los escenarios a estudiar, también lo son.

Los parámetros que se pueden cambiar o variar, ya están preestablecidos, son tan solo pequeños grupos de información que se agrupan y conglomeran para crear el conjunto que conforma el individuo, características tales, como lo son: la ubicación

de sus nodos, longitud, área transversal, entre otros parámetros de diseño de estructuras tipo cercha.

Estos parámetros se establecen en las cadenas de información o cromosomas, los cuales tienen la estructura de las características y parámetros que definen al individuo en su totalidad, como se explica a continuación:

#### 11.3.1 CADENA DE CROMOSOMAS

Esta subrutina, están solo la expresión de los parámetros individuales de la población de todo el conjunto, es decir, tan solo es la **agrupación de información** más relevante en **subconjuntos organizados y vinculados** entre sí, creando una red variable de características y respuestas.

En otras palabras, esta subrutina, tan solo acopla la información relevante, en grupos, donde, los parámetros incluidos compartan características similares, lo que facilita su manipulación, y la evaluación de su respuesta.

No obstante, el proceso de modificación es aleatorio, probabilístico y estadísticamente ínfimo, es decir, las variaciones no son generales, no son de amplio espectro, y pocas veces suceden no solo en una generación, sino que también en varios individuos. Es por eso que los cambios realizados deben ser precisos, y evaluados de tal manera, que permita encontrar realmente su influencia en la población y en el individuo, esto realizándose a través de la estrategia de cruce, la **interconexión entre cada estrategia y subrutina** es la clave para lograr encontrar el punto óptimo en el conjunto.

#### 11.4. BROTE ESPECIAL

Esta rutina, es quizá la más importante, ya que a través de ella se toma la decisión de **eliminar a individuos**, moldeando el conjunto poblacional hacia su forma más  $\leq$  óptima, la toma de esta decisión, no más que el hecho de sopesar los resultados obtenidos con anterioridad de las diferentes rutinas y subrutinas, la comparación de los valores fitness de los individuos y el valor fitness del conjunto, la afección que genera el brote y sus efectos generales e individuales, la probabilidad única de cada individuo de resistir el brote, la probabilidad de ser afectados por la subrutina de natalidad e incluso el nivel de mortalidad del brote en el periodo evaluado.

Todas y cada una de las características anteriormente mencionadas son sopesadas para tomar la decisión de eliminar a individuos del conjunto, para modelar así, la población ideal para el brote que la afecta.

Discriminación funciona de forma muy sencilla, compara el valor fitness de cada individuo, el cual se obtiene a través de la evaluación de la influencia de todas las características mencionadas, este valor es comparado con, un valor referencia obtenido para el brote (parámetros iniciales), y a través de esta comparación y la

subrutina de compensación, se eliminan metodológicamente individuos hasta lograr conformar la población cuyas características se adaptan mejor a la influencia del brote.

#### 11.4.1 ADAPTACIÓN

Esta subrutina, se basa en la hipótesis de recuperación de un paciente, el cual padece una enfermedad que lo aflige, y funciona de manera muy sencilla, tan solo sopesa las probabilidades de que el individuo sea afectado por de manera positiva por las diferentes estrategias y subrutinas, y la respuesta de sus características, permitiéndole una nueva evaluación de su valor fitness, lo que le permitiría, evadir la muerte.

Así que esta herramienta están solo el cálculo probabilístico de que el rendimiento de un individuo con características definidas y evaluadas en una generación  $T=x$ , mejore para una generación  $T=x+n$ , donde  $n$  es el número de generaciones en el cual el individuo debe desarrollarse para lograr mejorar su rendimiento, así, el rendimiento del grupo.

## 12. ALGORITMO EPIDEMIA

### 12.1. METODOLOGÍA DE DISCRETIZACIÓN RXP

La matriz “segmentos” contiene la información relacionada a los límites del dominio que define la estructura, es decir, almacena las coordenadas de los vértices del dominio de estudio.

```
segmentos = zeros(n,7);  
%n es el número de nodos.
```

```
n_n = 1;  
cn = 1 ;
```

las variables usadas anteriormente funcionan como contadores y reguladores del ciclo *While*.

```
while (n_n < n)
```

```
    segmentos(n_n,1:2) = Coordenadas(n_n,1:2);  
    segmentos(n_n,3:4) = Coordenadas((n_n+1),1:2);  
    segmentos(n_n,5) = n_n;  
    segmentos(n_n,6) = Coordenadas(n_n,3);  
    segmentos(n_n,7) = Coordenadas((n_n+1),3);
```

```
    n_n = n_n +1;
```

el bucle reorganiza la información en la matriz ***segmentos*** mientras redefine sus dimensiones de acuerdo al tamaño de los vectores desglosados y anexados.

```
end
```

```
if (n_n == n)
```

```
    segmentos(n_n,1:2) = Coordenadas(n_n,1:2);  
    segmentos(n_n,3:4) = Coordenadas((1),1:2);  
    segmentos(n_n,5) = n_n;  
    segmentos(n_n,6) = Coordenadas(n_n,3);  
    segmentos(n_n,7) = Coordenadas((1),3);
```

la confirmación de la igualdad de los contadores permite verificar que la información agregada y reordenada que viaja de la matriz ***Coordenadas*** a la matriz ***segmentos***, este completa, comparando las dimensiones de los vectores y la matriz.

```
end
```

```
%% este segmento se encargara de realizar la discretizacion
%% RTxP
```

Tras ordenar la información se divide la matriz **segmentos** en vectores, los cuales en este caso contienen las coordenadas x e y del dominio de estudio.

```
Coor_x= segmentos(:,1);
Coor_y= segmentos(:,2);
```

Se encuentra el valor más alejado en el eje x y en el eje y.

```
x_lim = max (Coor_x); %% encuentra la coordenada x mas grande
y_lim = max(Coor_y); %% encuentra la coordenada y mas grande
```

se declaran las variables a usar en función al tamaño de los vectores ya definidos.

```
divisiones= 2*n;
df = divisiones-1;
nodos_f=zeros((df*n),3);
THETA = 0;
sas = 1;
d_f = 1;
fnd= df*n;
daf = 1;
```

```
while (sas <= n)
```

```
    while (d_f <=df)
```

este bucle encuentra la longitud de cada una de las aristas que conforman el dominio, usando las coordenadas y la **matriz de conectividad**.

```
        a = segmentos(sas,1) %% coordenada x inicial
```

```
        b =segmentos(sas,2) %% coordenada y inicial
```

```
        L = sqrt( ( segmentos(sas,1)- segmentos(sas,3) )^2 + (
segmentos(sas,2)- segmentos(sas,4) )^2 )
```

Se fragmenta la arista en un numero de secciones definido en relación al numero de vertices que definen en el dominio de estudio, usando las variables “**divisiones**” y “**d\_f**”.

$$L1 = (L / divisiones) * d_f;$$

$$THETA = \text{atand}(\frac{\text{segmentos}(sas,2) - \text{segmentos}(sas,4)}{\text{segmentos}(sas,1) - \text{segmentos}(sas,3)});$$

Tras fraccionar estas aristas, se encuentra el valor de las coordenadas de los nuevos nodos creados sobre la misma.

$$Y = \text{sind}(THETA) * L1;$$

$$X = \text{cosd}(THETA) * L1;$$

**if**(sas == n)

$$a = \text{segmentos}(1,1);$$

$$b = \text{segmentos}(1,2);$$

**end**

se hace la corrección del valor de las coordenadas encontradas y son almacenadas en la matriz “**nodos\_f**”.

$$a = a + X; \text{%% coordenada x fianl}$$

$$b = b + Y; \text{%% coordenada y final}$$

$$\text{nodos\_f}(\text{daf},1) = a;$$

$$\text{nodos\_f}(\text{daf},2) = b;$$

$$\text{nodos\_f}(\text{daf},3) = sas;$$

**nodos\_f**

$$\text{daf} = \text{daf} + 1;$$

$$\text{d\_f} = \text{d\_f} + 1;$$

**end**

```
sas = sas + 1;  
d_f = 1;
```

*end*

el bucle anterior definió los nuevos nodos establecidos en el contorno del dominio, el siguiente bucle, definirá los **nodos interiores**. Nuevamente se declaran las variables, se establecen los contadores, y la matriz que almacenará la información,

```
vb=1;  
vbv = vb + df;  
vbv_i= vbv;  
d_f= 1;  
daf=1;  
puntos_RTxF=zeros(1000,2);  
cantt = 0;  
contad= 0;
```

**while** (vb < (fnd-df))

```
%division_R = randi([n 2*n]);  
division_R = randi([2 6]);
```

```
df_i = division_R-1;
```

```
while(vbv <= fnd)
```

```
while (d_f <= df_i )
```

```
a = nodos_f(vb,1); %% coordenada x inicial
```

```
b = nodos_f(vb,2); %% coordenada y inicial
```

```
L = sqrt( ( nodos_f(vb,1)- nodos_f(vbv,1) )^2 + ( nodos_f(vb,2)- nodos_f(vbv,2) )^2 );
```

```
L1 = (L / division_R)*d_f;
```

```
THETA = atand( ( nodos_f(vb,2)- nodos_f(vbv,2)
)/( nodos_f(vb,1)- nodos_f(vbv,1) ) );
```

```
Y = sind(THETA)*L1;
```

```
X = cosd(THETA)*L1;
```

```
a = a + X; %% coordenada x final
```

```
b = b + Y; %% coordenada y final
```

este condicional borra los nodos que no se encuentren **dentro del domino o sobre el mismo**, depurando el ruido de los datos obtenidos.

```
if(a > x_lim)
```

```
kl =randi([1 n]);
```

```
a = x_lim -(kl/10);
```

```
end
```

```
if(b > y_lim)
```

```
kl =randi([1 n]);
```

```
b = y_lim -(kl/10);
```

```
end
```

```
puntos_RTxF(daf,1) = a;
```

```
puntos_RTxF(daf,2) = b;
```

```
d_f = d_f + 1;
```

```
daf = daf +1;
```

```
cantf = cantf +1;
```

```
end
```

```
vbv = vbv + 1;
```

```
d_f = 1;
```

**end**

$vb = vb + 1;$

$vbv = (\text{nodos\_f}(vb,3)*df) + 1;$

**end**

se almacenan los nodos que conforman la malla de discretización junto con su conectividad en la matriz “**nodos\_RTxP**”

$\text{nodos\_RTxP} = \text{puntos\_RTxP}(1:\text{cantt}, 1:2);$

## 12.2. BROTE

Ya estando definidos el número de elementos (barras, población de estudio), se establece como referencia para el desarrollo de la metodología de cruce.

$L\_Ft = \text{length}(Ft);$  % esta variable contiene el número de elementos de Ft

Se establecen las variables a usar, definidas con los valores máximos, mínimos y medios del vector “**Ft**”

$Ft\_max = \text{max}(Ft);$

$Ft\_med = \text{mean}(Ft);$

$Ft\_min = \text{min}(Ft);$

$\text{Int\_med} = [(\text{Ft\_med} + (.3 * \text{Ft\_max})) (\text{Ft\_med} - (.3 * \text{Ft\_max}))];$  %%% [ mayor menor]

%%%%%%%%% BAJOS %%%%%%%%%%

Se evalúan todos los miembros de la población actual en el siguiente bucle

**con** = 1;

**while** (Ft\_min < 1)

el condicional junto al ciclo “**switch**” clasifican a los miembros de la población.

**if** con == 1

$\text{num} = Ft\_min * 10;$

**end**

```
    num = num * 10;
    con = con + 1;
end

switch con
  case 1
    Li = 10;
  case 2
    Li = 100;
  case 3
    Li = 1000;
  case 4
    Li = 10000;
end
```

Se define el intervalo de evaluación entre el punto medio y máximo, medio y mínimo, y mínimo y máximo.

```
Int_min = [(Int_med(1,2)-(1/Li)) Ft_min];
```

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
```

ALTOS

```
con = 1;
while (Ft_max < 1)

  if con == 1
    num = Ft_max *10;
  end

  num = num * 10;
  con = con + 1;
end
switch con
  case 1
    Li = 10;
  case 2
    Li = 100;
  case 3
    Li = 1000;
  case 4
    Li = 10000;
end
```

```
Int_max = [(Int_med(1,1)+(1/Li)) Ft_max];
```

Tras evaluar, comparar y clasificar a los miembros de la población, a través del ciclo “**For**”, se agrupan y ordenan de acuerdo con sus características.

```
for i=1:L_Ft
    if ( Ft(i) <Int_med(1,2) )
        %%% ESTADOS A=1 M=2 B=3
        PQ(i,1) = 3; %% baja
        PQ(i,2) = i ;
    else
        if ( Ft(i) >Int_med(1,1) )
            PQ(i,1) = 1;
            PQ(i,2) = i ;
        end
    end
end
```

Se define la matriz y vector con la información pertinente.

```
else
    PQ(i,1) = 2;
    PQ(i,2) = i ;
end
end
end
```

con la información ordenada y lista se define el tipo de evaluación al que la población actual será sometido.

```
%%%%%%%%%%%%%% BROTE 1 %%%%%%%%%%%%%%%
% 0-5  6-23  24-41  42-100
% A= 4 B= 2 C= 3 D= 1
```

La definición es totalmente pirobalística, permitiendo pequeñas variaciones en la ejecución del código, lo que conlleva a flexibilizar los patrones de evaluación ejecutados dando como resultados más precisos.

```
P_brote = randi([0 100]);
```

```
if (P_brote >= 5)
    Esc =1;
end
if ( P_brote >= 6 && P_brote <=23 )
    Esc =2;
end
if ( P_brote >= 24 && P_brote <=40 )
    Esc =3;
end
if ( P_brote >= 41 && P_brote <=100 )
    Esc =4;
end
```

### 12.3. INFECCIÓN

En brote se afectó a la población y se evaluó su respuesta.

```
%%% ESTADOS A=1 M=2 B=3
```

El condicional establece la relación del estado de cada miembro de la población en relación con el estado general de la misma, clasificando a cada uno como **sano o infectado**

```
if ( Int_A(1,1)>=P_muerte && Int_A(1,2)<=P_muerte)
    infectado = 1;
else
```

```
if ( Int_B(1,1)>=P_muerte && Int_B(1,2)<=P_muerte)
    infectado = 3;
else
    infectado = 2;
end
end
```

tras la clasificación de los elementos, se procede a la eliminación de aquello que están infectados.

```
%%%%%%%%%%%% ELIMINACIÓN DE LOS INFECTADOS
%%%%%%%%%%%%
```

El ciclo **for** ejecuta el condicional que evalúa si el individuo este o no infectado, y de ser así, se dirige a la **matriz NE**, la cual contiene los elementos y elimina al individuo en cuestión.

```
for i=1:L_Ft
    if (PQ(i,1) == infectado)
```

se indica que la posición evaluada en ese momento en la **matriz NE**, se haga nula, es decir, se elimina la información de aquella fila.

```
        NE(i,:) = [];
    end
end
```

el brote 2 es un **evento probalístico**, en el cual se vuelve a someter la población a la afección, evaluando y clasificando los individuos para definir si están o no infectados, y de ser así, eliminarlos.

```
%%%%%%%%%%%% BROTE #2
%%%%%%%%%%%%
```

Se define un valor para la probabilidad de que en ese instante suceda un brote 2.

```
P_brote2 = randi([0 100]);
```

El **condicional if** evalúa si la probabilidad de que suceda el brote 2 es menor al valor establecido, y de ser así ejecuta la clasificación de los individuos.

```
if ( P_brote2 <= 5) %%%% probabilidad del segundo brote es de un 5 porciento
```

```
    if (infectado == 2)
```

el **ciclo for** evalúa ejecuta el **condicional if** tantas veces como elementos existan.

```
    for i=1:L_Ft
```

```
        cb2 = Int_med(i,1) - 0.1*Int_med(i,1);
```

```
        if ( Ft(i) >= cb2 && Ft(i) <= Int_med(i,1))
```

se indica que la posición evaluada en ese momento en la **matriz NE**, se haga nula, es decir, se elimina la información de aquella fila.

```
            NE(i,:) = []; %%%
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
if (infectado == 3)
```

el **ciclo for** evalúa ejecuta el **condicional if** tantas veces como elementos existan.

```
    for i=1:L_Ft
```

```
        cb2 = Int_max(i,1) - 0.1*Int_max(i,1);
```

```
        if ( Ft(i) >= cb2 && Ft(i) <= Int_max(i,1))
```

se indica que la posición evaluada en ese momento en la **matriz NE**, se haga nula, es decir, se elimina la información de aquella fila.

```
            NE(i,:) = []; %%
```

```
        end
```

```
end

end
if (infectado == 1)

el ciclo for evalúa ejecuta el condicional if tantas veces como elementos existan.

for i=1:L_Ft

cb2 = Int_min(i,2) - 0.1*Int_min(i,2);

if ( Ft(i) >= cb2 && Ft(i) <= Int_min(i,2))

NE(i,:) = [];%

end

end

end

end

end
```

## 12.4. BROTE ESPECIAL

%%%%%%%% BROTE ESPECIAL PARA LA CONVERGENCIA EN EL PUNTO OPTIMO %%%%%%%%%

*Se definen los valores para que este evento suceda.*

```
W_Pob = sort(Weigth);
Pob = length(Weigth);
```

El ciclo evalúa el estado de las iteraciones, y si esta dentro del rango definido, afecta a la población de manera directa, de acuerdo con el estado de la evolución de esta, el cual se mide en el **número de iteraciones**.

El **condicional if** hace la comparación de las variables para ejecutar la afectación a la población.

```
if (ITERACION <= 50)
```

se afecta al 15% de la población de manera directa, siendo **Pob**, la cantidad de elementos se define **Y** como la cantidad de elementos o individuos que morirán.

```
Y = 0.15*Pob;  
Re_Pob = round(Y);  
end
```

```
if (ITERACION > 50 && ITERACION <101)
```

se afecta al 10% de la población de manera directa, siendo **Pob**, la cantidad de elementos se define **Y** como la cantidad de elementos o individuos que morirán.

```
Y = 0.1*Pob;  
Re_Pob = round(Y);  
end
```

```
if (ITERACION > 100)
```

se afecta al 05% de la población de manera directa, siendo **Pob**, la cantidad de elementos se define **Y** como la cantidad de elementos o individuos que morirán.

```
Y = 0.05*Pob;  
Re_Pob = round(Y);  
end
```

tras haber definido el porcentaje de la población que se vera afectada, se calcula la probabilidad de que suceda este evento.

```
P_Brote_Especial = randi([0 100]);
```

```
if ( P_Brote_Especial <= 34)
```

```
for i=1:Re_Pob
```

```
    CN((Weigth(i,2)),:) = [];
```

```
end
```

```
end
```

## 12.5. ADAPTACIÓN

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ADAPTACION%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Se declaran las variables, en este caso solo sería  $P_{adaptación}$ , que es la probabilidad de que suceda el evento.

$P_{adaptacion} = randi([0 100]);$

El **condicional if** evalúa si la probabilidad está dentro del rango establecido y ejecuta el **ciclo for**.

$if (P_{adaptacion} \leq 20)$

se ejecuta tantas veces como nodos existan; al ejecutarse esta sección los nodos seleccionados sufren variaciones en sus **parámetros iniciales**, es decir, su valor de  $x,y$  se verán afectados.

$for i=(n+1):ND$  %%  $ND$  es el numero de nodos en  $nudos\_SOL$

$P_a = randi([0 100]);$

$if (P_a \leq 2)$

$P_{az} = randi([0 1]);$

$if (P_{az} == 0)$

se varía el valor de la coordenada x del nodo seleccionado.

$nudos\_SOL(i,1) = nudos\_SOL(i,1) + .1;$   
 $nudos\_SOL(i,2) = nudos\_SOL(i,2) - .1;$

**else**

se varía el valor de la coordenada y del nodo seleccionado.

$nudos\_SOL(i,1) = nudos\_SOL(i,1) - .1;$   
 $nudos\_SOL(i,2) = nudos\_SOL(i,2) + .1;$

**end**

**end**

$if (P_a == 3)$

se varía el valor de la coordenada x del nodo seleccionado.

$nudos\_SOL(i,1) = nudos\_SOL(i,1) - .1;$   
 $nudos\_SOL(i,2) = nudos\_SOL(i,2) - .1;$

**end**

*if* (  $P_a == 5$  )

se varía el valor de la coordenada y del nodo seleccionado.

$nudos\_SOL(i,1) = nudos\_SOL(i,1) + .1;$   
 $nudos\_SOL(i,2) = nudos\_SOL(i,2) + .1;$

*end*

*end*

*end*

### **13. ANALISIS DE RESULTADOS**

En este inciso se manifiesta la información pertinente a los inputs-output, el análisis y cuestión de los resultados obtenidos para los ejemplos de diseño y dominios empleados en la validación e implementación del **pseudo-código *Epidemia***.

En primera estancia, se demuestra la validación del **módulo de análisis**, al ser analizados los resultados obtenidos por el mismo, en diferentes problemas expresados en la literatura pertinente. Luego de realizar la validación de este, se procede a someter diversos dominios con diversos parámetros iniciales al algoritmo *Epidemia* implementado esta estrategia de optimización con problemas de forma y tamaño, donde su desempeño es evaluado con el problema de las 10 barras.

### 13.1. VALIDACIÓN DEL MÓDULO DE ANÁLISIS

El módulo de análisis representa la piedra angular del proyecto, por eso es evaluado en términos de exactitud de resultados, velocidad y robustez con diferentes problemas reportados en la literatura. Para validar este módulo, se utilizan dos variables de desempeño: (i) Precisión y (ii) Tiempo de Ejecución.

- *Problema 6.1 Beer edic 8*

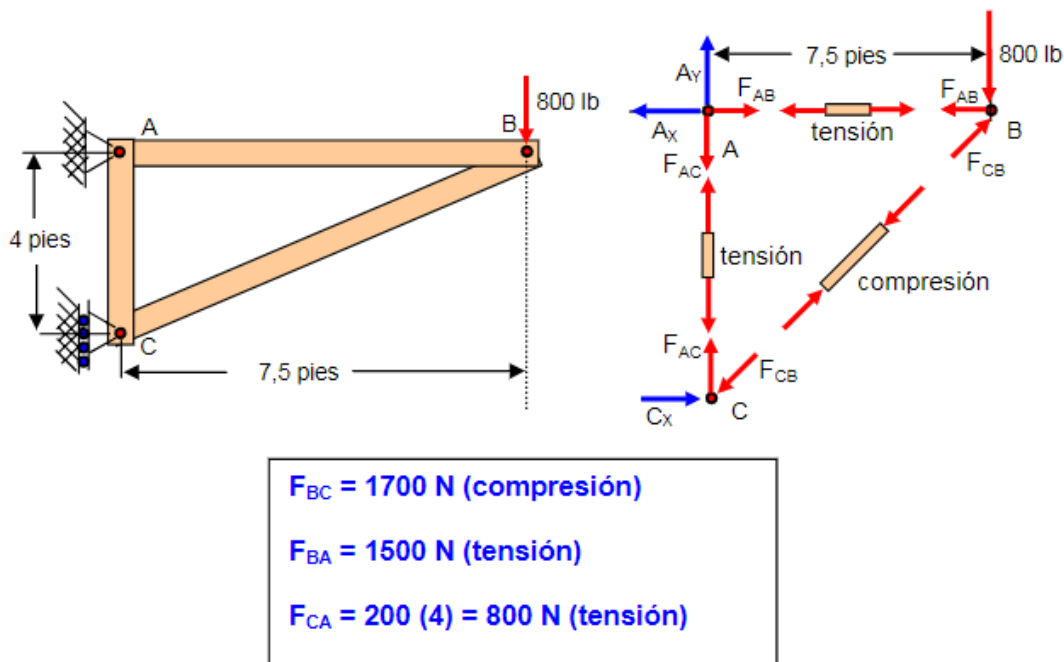


Figura 13-1. Problema 6.1 Beer Octava Edición problema de validación para el módulo de análisis.

Fuente: Autor.

Para este ejemplo las propiedades mecánicas de los elementos son despreciables, es por ello que se seleccionó, ya que, su solución propone un procedimiento netamente basado en la mecánica vectorial.

TABLA =

3×3 [table](#)

ELEMENTO	FUERZA_INTERIOR	ESTADO
"Elemento 1"	1700	"COMPRESION"
"Elemento 2"	1500	"TENSION"
"Elemento 3"	800	"TENSION"

ans =

'El tiempo gastado en el proceso fue de 2.011943e-01'

- *Problema 4.5 Estática Meriam edición tres*

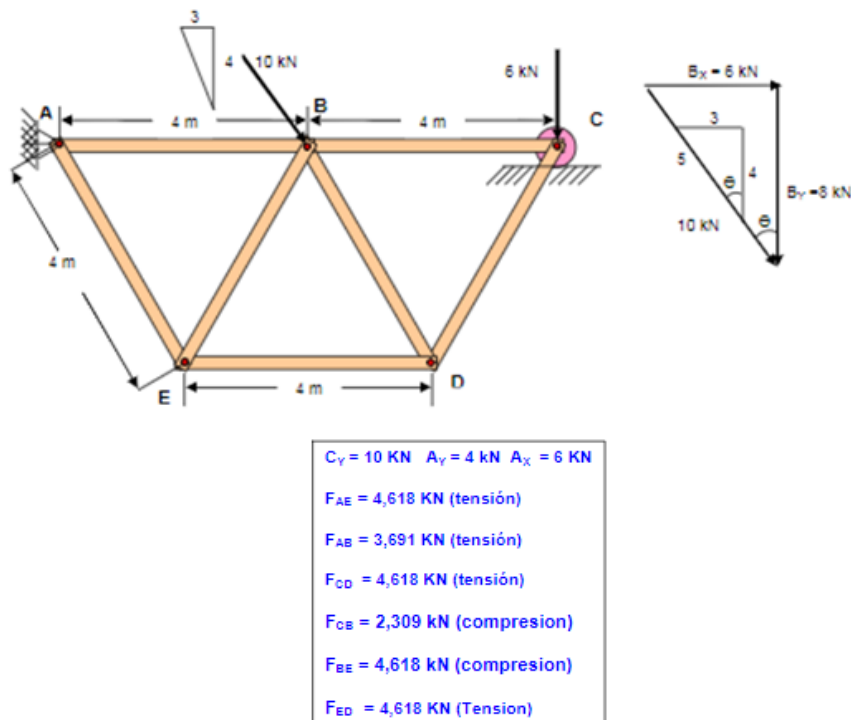


Figura 13-2. Problema 4.5 Estática Meriam Edición 3, problema de validación para el módulo de análisis.

El comando **length** encuentra la longitud de la matriz **nudos:SOL**, la cual contiene todos los nodos.

```
ND = length(nudos_SOL) ; %% numero de nodos...
```

```
%%%%%% desarrollo de los elementos del sistema (barras) %%%%
```

```
v = [1:ND];
```

se verifica la matriz de conectividad y se obtiene la cantidad de barras

```
CN = combnk(v,2); % conectividad que nodo esta conectado con cual
```

```
NE = length(CN); % la cantidad de barras
```

Se ordenan los nodos de las barras en vectores de nodos iniciales **NI** y nodos finales **NF**

```
NI = CN(:,1);
```

```
NF = CN(:,2);
```

```
for i=1:NE
```

```
    MR(i,1)=i;
```

```
    MR(i,2)=2 *NI(i)-1;
```

```
    MR(i,3)=2 *NI(i);
```

```
    MR(i,4)=2 *NF(i)-1;
```

```
    MR(i,5)=2 *NF(i);
```

```
end
```

```
x = nudos_SOL(:,1);
```

```
y = nudos_SOL(:,2);
```

en este **ciclo for** se definen las propiedades de las barras, como inercia, área transversal, longitud.

```
for i=1:NE
```

```
    E(i)=200000;
```

```
    AREA(i)=10;
```

```
    PE(i,1)=E(i);
```

```
    PE(i,2)=AREA(i);
```

```
    Dx(i)=x(NF(i))-x(NI(i));
```

```
    Dy(i)=y(NF(i))-y(NI(i));
```

```
    b(1,i)=Dx(i);
```

```
    b(2,i)=Dy(i);
```

```
    L(i)= (Dx(i)^2+Dy(i)^2)^0.5;
```

```
    if (L == 0)
```

```
        error(['La longitud del elemento es igual a cero']);
        disp(i);
    end

    SENO(i)=Dy(i)/L(i);
    COSENO(i)=Dx(i)/L(i);

end

%----- MATRIZ DE RIGIDES PARA CADA ELEMENTO Y PARA EL SISTEMA --
-----%

K=zeros(2*ND);

Este ciclo for obtiene la matriz de rigidez de cada elemento

for i=1:NE

    %----- MATRIZ DE REIGIDES PARA CADA ELEMENTO -----
    ----%

    E = PE(i,1); A =PE(i,2);
    MKle = E*A/L(i) * [1,-1;-1,1];
    nx = b(:,1)/L(i);
    G = [nx,0,0;0,0,nx];
    MKe = G'*MKle*G;

    cm = sum(isnan(MKe));
    mc = sum(cm);

    if( mc ~= 0)

        i

    end
    if( mc ~= 0)

        disp(i)
        error('La matriz de rigides del elemento no es valida' );
        %#ok<UNRCH>
    end

    %%MKe

Se encuentra la matriz de rigidez global.
```

```
%----- MATRIZ DE RIGIDES PARA EL SISTEMA -----%

VRE = MR(:,2:5);
K(VRE(i,:),VRE(i,:)) = K(VRE(i,:),VRE(i,:)) + MKe ;

end

%----- REORGANIZAR LA MATRIZ -----%

VRM = 1:2*ND;
NR = 2; %input("\n\n NUMERO DE NODOS RESTRINGIDOS : '); %%% TENGO 2
PERO PUEDEN SER MAS
P = 0;
AUX = 0;
nsol = length (nudos_SOL);
posicion1 = nsol-(n+1);

este ciclo for define el estado de las restricciones de movimiento del sistema.

for i=1:NR

    NNR = posicion1 - Restricciones(i,3) - 1; % input("\n\n NUMERO DEL NODO
RESTRINGIDO : ');
    if ( Restricciones(i,1) == 1)
        RE = 0; % input("\n\n TIENE RESTRICCION TOTAL O PARCIAL ( 1-TOTAL,
0-PARCIAL) : ');
    else
        RE = 1;
    end

    if (RE == 1)

        VRM(2*ND-2*P) = 2*NNR;
        VRM(2*ND-1-2*P) = 2*NNR-1;
        VRM(2*NNR) = 2*ND-2*P;
        VRM(2*NNR-1) = 2*ND-1-2*P;
        AUX = AUX +2;

    else

        REXY = 0; % input("\n\n TIENE RESTRICCION CON
RESPECTO A X O Y (1-X, 0-Y) : ');

        if (REXY == 1)
            VRM(2*ND-2*P) = 2*NNR-1;
```

```
VRM(2*NNR-1) = 2*ND-2*P;

else
    VRM(2*ND-2*P) = 2*NNR;
    VRM(2*NNR) = 2*ND-2*P;

end
AUX = AUX + 1;

end
P = P + 1;
end

% ----- MATRIZ DE RIGIDES DEL SISTEMA ORGANIZADAD -----%
% ----- MATRIZ DE RIGIDES DEL SISTEMA ORGANIZADAD -----%
KM0 = zeros(2*ND);

for i=1:2*ND

    KM0(i,:) = K(VRM(i,:));

end

%KM0;

KM = zeros(2*ND);

for i=1:2*ND

    KM(:,i) = KM0(:,VRM(i));
end

%KM

%----- MATRIZ DE NUDOS LIBRES Y FUERZAS CONOCIDAS -----%

KNN = zeros(2*ND-AUX);
for i=1:2*ND-AUX

    KNN(i,:) = KM(i,1:2*ND-AUX);

end
%KNN
```

```
%----- MATRIZ DE DESPLAZAMIENTOS Y REACCIONES DE LOS APOYOS -
-----%
```

```
KAN=zeros([AUX,2*ND-AUX]);
AUX1 = 1;
```

```
for i=2*ND-AUX+1:2*ND
    KAN(AUX1,:) = KM(i,1:2*ND-AUX);
    AUX1 = AUX1 + 1;
end
```

```
%KAN
```

```
% ----- VECTOR DE FUERZAS APLICADAS Y CONOCIDAS -----
----- %
```

```
VF = zeros(2*ND,1);
```

```
NF = Pp ; %% input('\n\n INGRESE EL NUMERO DE NUDOS CON FUERZA: ');
```

Este **ciclo for** define que nodos están sometidos a cargas P, su magnitud y dirección.

```
for i=1:NF
```

```
    NN = Fuerzasx(i,1); % input('\n\n INGRESE EL NUMERO DEL NODO : ');
    %fprintf('\n NUDO %d: ',NN);
    %F = input('\n\n INGRESE LA FUERZA EN KN : ');
    %ANG = input('\n\n INGRESE EL ANGULO DE LA FUERZA EN GRADOS :
);
```

```
    %f(11) = 0.5e6*sin(pi/6); f(12) = -0.5e6*cos(pi/6);
    FX=Fuerzas(NN,1)/10; % F*cos(pi*ANG/180);
    FY=Fuerzas(NN,2)/10; % F*sin(pi*ANG/180);
```

```
    VF(2*NN-1,1) = FX;
    VF(2*NN,1) = FY;
```

```
end
```

```
%VF
```

```
%----- VECTOR DE LAS REACCIONES EN LOS APOYOS -----%
```

```
VFA = KAN*DNL;
```

```
%VFA
```

```
%----- VECTOR DE LAS FUERZAS INTERNAS DE LOS ELEMENTOS -----
```

```
-%
```

```
E = PE(:,1);
```

```
for i=1:NE
```

```
    C(i)=AREA(i)*E(i)/L(i);
```

```
    C1(i)=COSENO(i)*(DTN(MR(i,4))- DTN(MR(i,2)));
```

```
    C2(i)=SENO(i)*(DTN(MR(i,5))-DTN(MR(i,3)));
```

```
    S(i)=C(i)*(C1(i) + C2(i)); % KN
```

```
end
```

```
% PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
```

```
% OPTIMIZACIÓN DE FORMA Y TAMAÑO MEDIANTE UN PSEUDO-ALGORITMO GENÉTICO
```

```
% DE ESTRUCTURAS METALICAS TIPO CERCHA MORFOLOGICAMENTE DEFINIDAS
```

```
% ESCRITA POR :
```

```
%         ANDRES F. PAZ
```

```
% DIRIGIDA POR:
```

```
%         PH.D JHON J. GIL
```

```
%         M.SC GEOVANNY MALDONADO
```

```
% DESCRIPCION MATEMATICA DEL MODELO.
```

```
tic;
```

```
COORDENADAS = [0 0;4 0;8 0;6 -2;2 -2]; %[MTS]
```

```
CONECTIVIDAD = [1 2;2 3;3 4;4 2;4 5;5 2;5 1];
```

```
FUERZAS = [0 0;6 8;0 6;0 0;0 0; 0 0]; %[KN]
```

```
AREA = [];
```

```
E = [];
```

```
I = [];
```

TABLA =

6×3 [table](#)

ELEMENTO	FUERZA_INTERIOR	ESTADO
"Elemento 1"	4.6189	"TENSION"
"Elemento 2"	3.6195	"TENSION"
"Elemento 3"	4.6189	"TENSION"
"Elemento 4"	-2.3095	"COMPRESION"
"Elemento 5"	-4.6189	"COMPRESION"
"Elemento 6"	4.6189	"TENSION"

Elapsed time is 0.050867 seconds.

ans =

'El tiempo gastado en el proceso fue de 8.510057e-04'

El módulo de análisis muestra una amplia capacidad para desenvolverse en problemas clásicos de análisis de mecánica vectorial, por eso se procede a someterlo a un problema de análisis matricial robusto.

### 13.1.1 PROBLEMA DE ANÁLISIS MATRICIAL

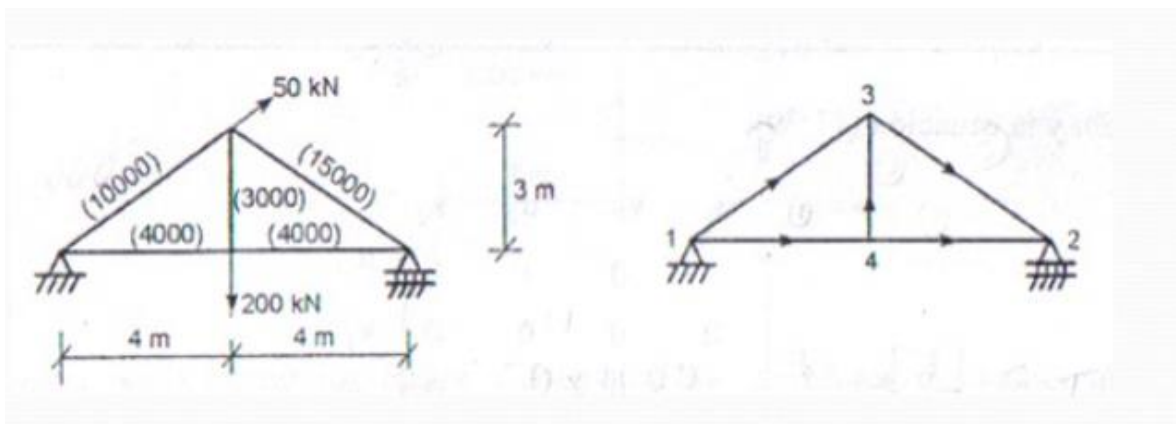


Figura 13-3. Problema de análisis matricial para la validación del módulo de análisis.

Fuente: [60]

Resuelva la estructura mostrada en la figura anterior, el material es acero estructural A36 y las áreas están dentro de los paréntesis.

4×2 [table](#)

DESPLAZAMIENTO	NODOS
0	"Nodo 1"
0.0003	"Nodo 2"
0	"Nodo 3"
0.00287	"Nodo 4"

TABLA =

5×3 [table](#)

ELEMENTO	FUERZA_INTERIOR	ESTADO
"Elemento 1"	403.69	"TENSION"
"Elemento 2"	-38.12	"COMPRESION"
"Elemento 3"	403.69	"TENSION"
"Elemento 4"	-78.47	"COMPRESION"
"Elemento 5"	107.13	"TENSION"

El módulo, solo tiene la capacidad de desarrollar un análisis de desplazamiento en una sola dirección, es por eso, que, para efectos de esta tesina, el algoritmo *Epidemia* no tiene en cuenta los desplazamientos para el cálculo de la función Fitness.

## 13.2. CÓDIGO EPIDEMIA

Para la evaluación de las capacidades del pseudo-código Genético implementado, se desarrolló el análisis de las morfologías dominantes de 3, 4 y 6 nodos. evaluando la de 6 nodos como el problema clásico de validación, se procedió a darle prioridad a los dominios a dos aguas compuestos por 3 nodos.

Los parámetros evaluados son: (i) el desempeño en relación coste computacional / tiempo gastado, (ii) Robustez, cuan grandes pueden ser los dominios antes de que

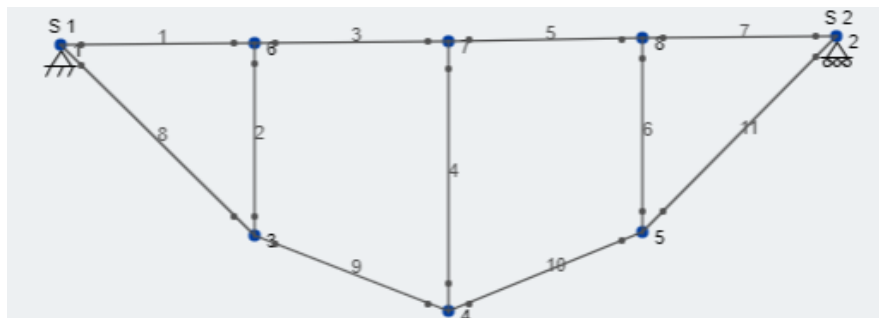
colapse el algoritmo y (iii) eficiencia, cual es peso promedio y tipología óptima que el algoritmo brinda.

### 13.2.1 DOMINIO DE ESTUDIO 1-RECTANGULO SIMETRICO

En el presente dominio de estudio se observa un rectángulo simétrico apoyado en sus nodos superiores y sometido a su propio peso con una concentración adicional de masa “ $m$ ” en su centro geométrico.



Dominio de estudio 1-rectangulo simétrico.

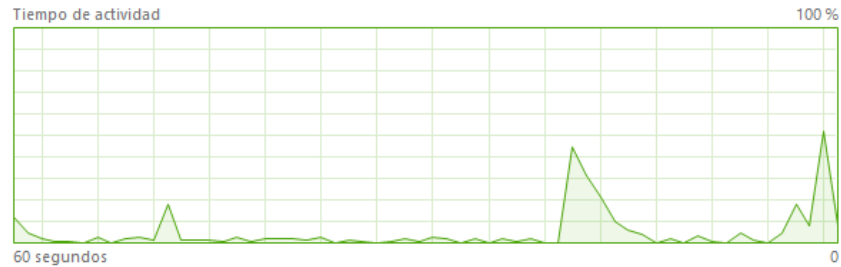


El resultado de la morfología para este dominio de estudio 1, se puede expresar como el desarrollo de una cercha invertida, donde predominan los elementos a tensión lo que reduce de manera notable la tendencia al pandeo por alabeo y la falla de los elementos por el efecto de columna corta, no obstante se puede evidenciar que los elementos con una mayor solicitud de área son el 2, 4 y 6, lo que permite concentrar la masa del sistema en su centro geométrico, reduciendo la cantidad de material necesario para alcanzar la estabilidad del sistema.

Para llegar a este resultado al algoritmo epidemia le tomo 352 iteraciones y un total de 5.83 horas, para parametrizar, evaluar y ejecutar las estrategias de optimización planteadas.

### Disco 0 (C:)

Intel Optane+238GBSSD



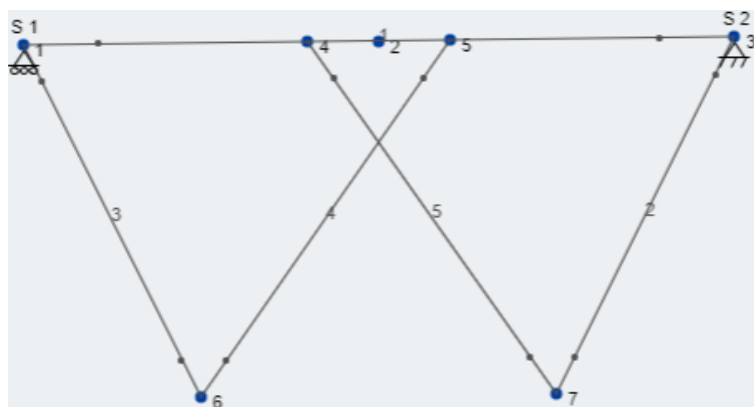
Gasto computacional.

### 13.2.2 DOMINIO DE ESTUDIO 2–PIRAMIDE TRUNCADA INVERTIDA.

En el presente dominio de estudio se observa una pirámide truncada apoyada en sus nodos superiores y sometido a cargas “P” en sus nodos inferiores.



Dominio de estudio 2-piramide truncada



La naturaleza del dominio de estudio, permitió desarrollar una morfología característica, en este caso podemos observar que los nodos 6 y 7, los cuales están sometidos cargas puntuales se ubican a  $\frac{1}{4}$  de la de los tramos 1-2 y 2-3, lo que genera que la cercha funcione como un sistema pendular, nuevamente, sometiendo los elementos más de mayor longitud a esfuerzos de tensión y generando los mayores esfuerzos en un solo tramo en específico, en este caso, el tramo 4-3.

Esta morfología planteada, se base en la sencillez de guiar los esfuerzos hacia el nodo 1, generando la mayor concentración de masa en el elemento allí ubicado, permitiendo al resto ser más esbeltas y finos.

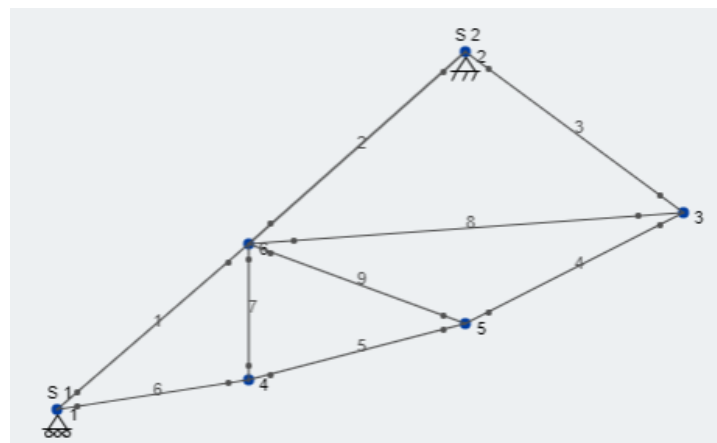
Se obtuvo este resultado tras 516 iteraciones y 9.03 horas.

### 13.2.3 DOMINIO DE ESTUDIO 3-RECTANGULO ASIMETRICO

En el presente dominio se observa un rectángulo asimétrico con restricciones de movimiento en sus vértices 1 y 3; la particularidad de esta geometría reside en el hecho de su falta de simetría lo que genera no solo efectos de desplazamientos verticales, sino que también presenta efectos de giro con su centro geométrico como punto pivot.



Dominio de estudio 3-rectangulo asimétrico.



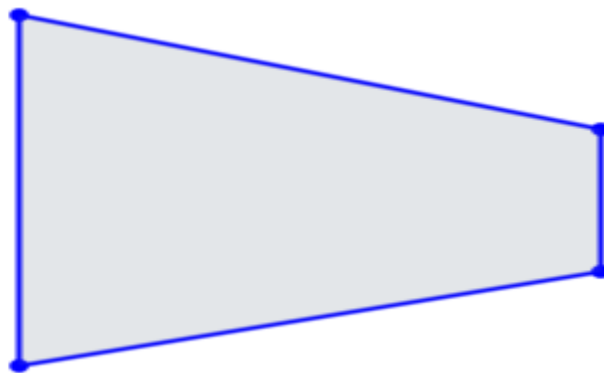
El nodo 3 está sometido a una carga P, la cual genera una tendencia de giro en la estructura, para resolver este inconveniente, Epidemia genero elementos que

conectan el punto pivote de manera directa con los nodos que presentan restricción de movimiento, esto para disminuir el desplazamiento de los nodos y dar una resistencia natural al giro en la dirección a la que estará sometida; la estructura planteada demuestra una mayor inercia en la dirección de giro en la cual la fuerza P tiende a rotarla.

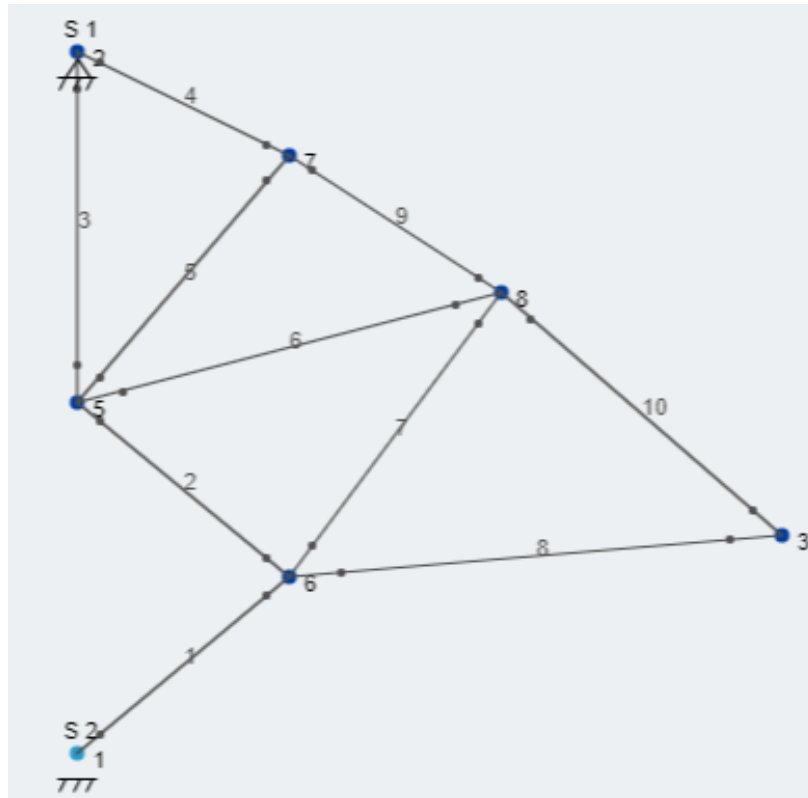
Epidemia demuestra que tiene la capacidad de adaptarse de diferentes escenarios de parámetros, siendo capaz de dar soluciones y esbozos de estas que sean validas y aplicables. Tomo 1027 iteraciones y 15.67 horas alcanzar esta solución.

#### 13.2.4 DOMINIO DE ESTUDIO 4-ROMBO

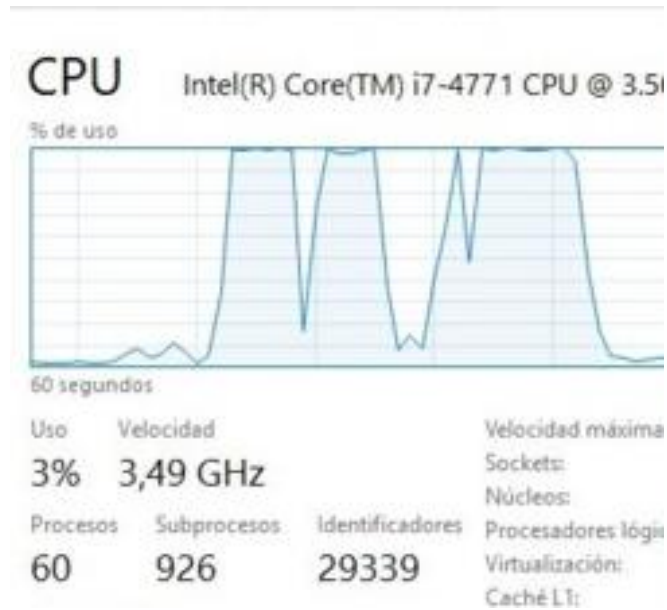
En este dominio observamos que en principio se intenta imitar una viga en voladizo, restringiendo el movimiento en el primer juego de nodos verticales y sometiendo a cargas P, el segundo juego de nodos; las consideraciones a tomar en este dominio se extienden al efecto de pandeo por alabeo, torsión lateral, falla por columna corta, elementos de fuerza cero, e incluso la tendencia de giro y la resistencia al mismo.



Dominio de estudio 4-rombo (viga en voladizo)



Se evidencia que la tendencia al giro es restringida por la barra 3, la cual funciona como rigidizador del sistema, transmitiendo todos los desplazamientos y esfuerzos debidos a la flexión, directamente a los nodos con restricción de movimiento, no solo eso, el nodo 5 se convirtió en la cúspide de encuentro de todos elementos, la razón de ser de esto, es que la suma de fuerzas totales del sistema en dicho se contra resta con su estabilidad, en otras palabras, la ubicación del nodo y las disposición de los elementos que se conectan a el , hacen que la totalidad de efectos generados por el sistema de carga y de restricciones se prácticamente cero.



Gasto computacional.

le tomo a epidemia 1953 iteraciones y 25.77 horas.

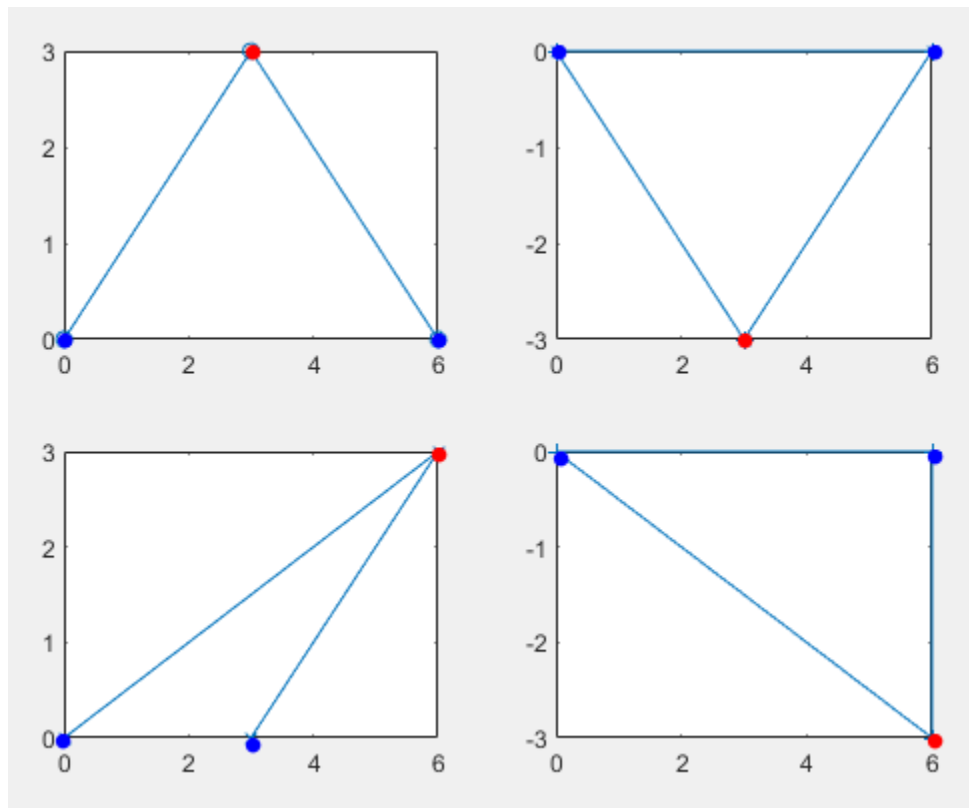


Figura 13-4. (a)-(b)-(c)-(d) Morfologías Dominantes En El Estudios De Cerchas A Dos Aguas.

Fuente: Autor.

Las morfologías mostradas resultan ser las dominantes en el estudio de cerchas a dos aguas, los nodos denotados en azul están restringidos y los nodos denotados en rojo están sometidos a una fuerza P. Tras obtener estos casos de estudio se procede a variar los parámetros de operación del algoritmo Epidemia, los cuales están determinados por un medio estocástico, lo cual supone un desarrollo probabilístico de los escenarios de optimización generando la diversa gama de soluciones mostradas a continuación.

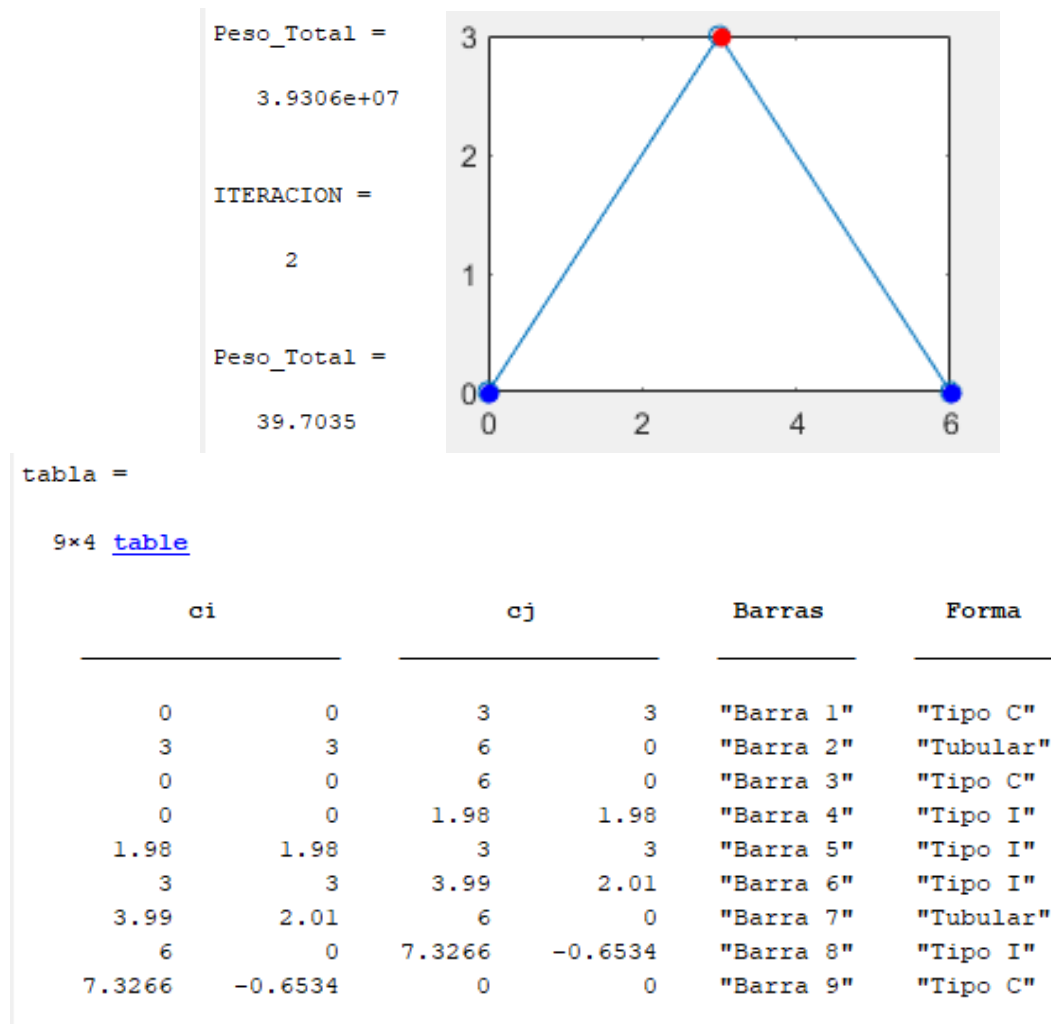


Figura 13-5. Optimización de forma y tamaño para morfología regular ascendente.

Tras correr el algoritmo, el resultado más notable es el mostrado anteriormente, en el cual se puede observar que, para una morfología regular ascendente, **Epidemia** arroja una discretización con una **tendencia nodal hacia el centroide del dominio** con una **tipología dominante para las cordones superiores e inferiores**.

La tipología de las diagonales y montantes presentan una variación considerable, la cual está en función de la **fuerza interna** a la cual están sometidas y a su **posición espacial**, no obstante, para **elementos perpendiculares o semi-perpendiculares** las tipologías dominantes resultan ser los **perfiles tubulares y tipo cajón**, y para elementos sometidos a **tensión**, los **perfiles tipo C**, resultan ser los aptos.

El desarrollo de *Epidemia* se basa en la selección óptima de la tipología de perfil estructural y su posicionamiento en el dominio estudiado, estimando el peso promedio que tendría la estructura si todos sus elementos se seleccionaran mediante un módulo, que buscará el perfil apto más liviano.

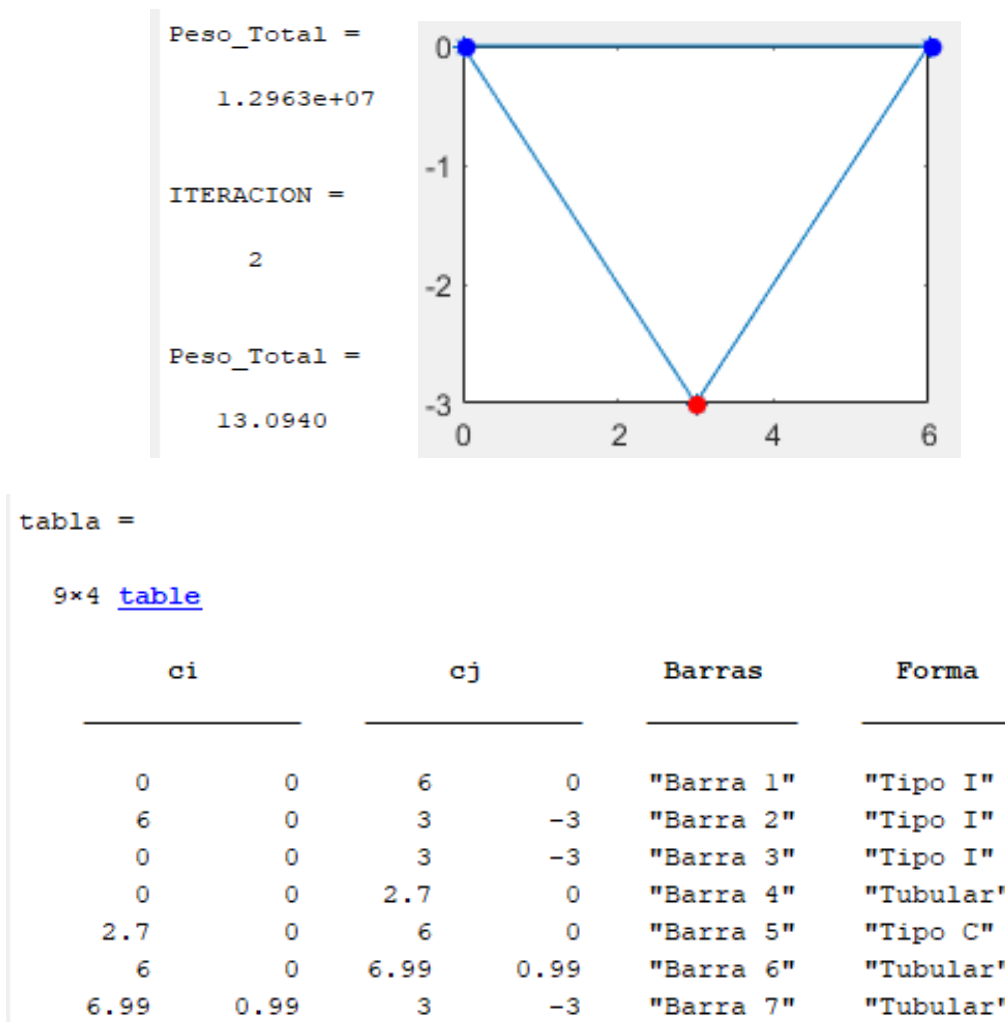


Figura 13-6. Optimización de forma y tamaño para morfología regular descendente.  
Fuente: Autor.

Como se menciona antes, los elementos sometidos a tensión tienden a ser **tipo C**, no obstante, los resultados para una **morfología regular descendente**, los perfiles más aptos para condiciones de tensión resultan ser los **perfiles Tubulares**, y se mantiene la tendencia de que los cordones superiores e inferiores sean compuestos por perfiles tipo I.

Para esta morfología, *Epidemia* desarrolla estructuras más livianas que para una morfología ascendente, ya que, en este caso, la predisposición de los elementos genera una ventaja mecánica en comparación a la de su hermana, la morfología ascendente.

### 13.3. METODO DE VALIDACIÓN

Para la validación del algoritmo, se utilizó el clásico problema de las 10 barras con varias modificaciones en sus parámetros de ejecución, las cuales afectan la completa legitimidad de los resultados; estas modificaciones se hicieron en pro de lograr alcanzar la mayor eficiencia del algoritmo *Epidemia*.

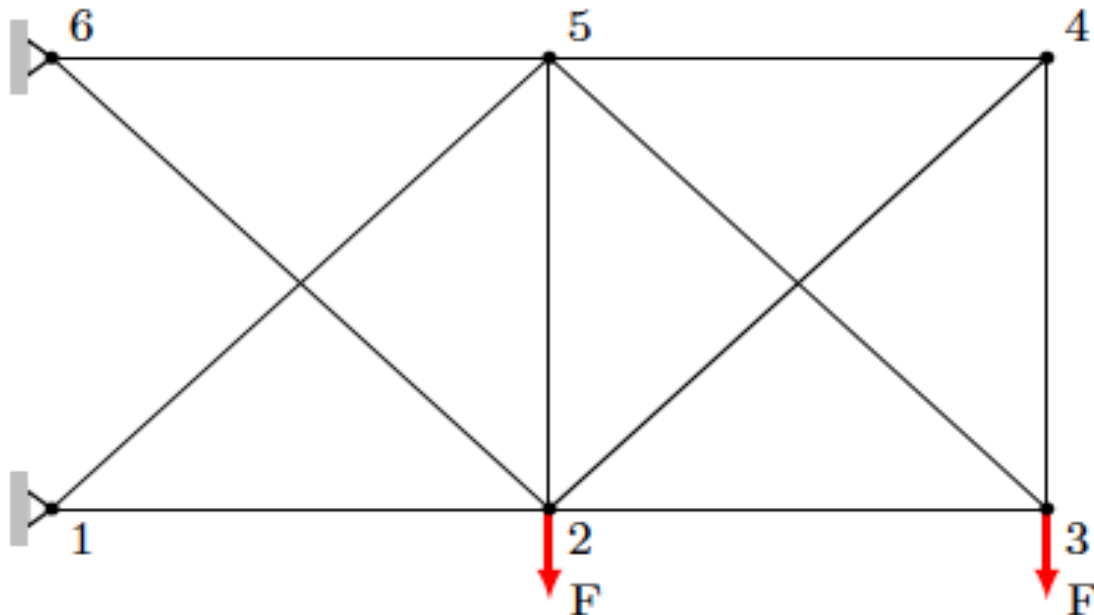


TABLA =

6×4 [table](#)

ELEMENTO	NODO_I		NODO_J		SECCION
_____	_____	_____	_____	_____	_____
"Barra 1"	0	0	18.28	0	0.0014
"Barra 2"	18.28	0	9.14	-9.14	0.0077
"Barra 3"	9.14	-9.14	0	0	0.0056
"Barra 4"	28.28	0	18.28	-9.14	0.0091
"Barra 5"	18.28	-9.14	9.14	-9.14	0.0046
"Barra 6"	9.14	-9.14	0	-9.14	0.0012

El peso total es de **81.696 KN**, no obstante, cabe aclarar la permisibilidad del algoritmo al cambio de forma y tamaño de las barras y/o estructura ya estipulada.

## **14. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

En el presente capítulo se aborda de manera breve el esbozo de los resultados obtenidos a través del ejercicio y aplicación de los capítulos anteriores.

Epidemia demostró tener la capacidad de abordar diferentes factores, parámetros y restricciones para alcanzar un resultado ideal dentro de lo esperado; en gran parte de los casos que se estudiaron se notó como la tendencia a encontrar una distribución de esfuerzos obligo al algoritmo a desarrollar nuevas estrategias como el desarrollo de puntos de pivot o elementos rígidos en los cuales se concentran gran parte de los esfuerzos.

El estudio de estos dominios enfáticos en geometrías simétricas, asimétricas y rotativas demostró que una forma eficiente para el desarrollo de estructuras tipo cercha por su naturaleza, resultan ser las cerchas invertidas, ya que la distribución de esfuerzos exige que gran parte de los elementos se encuentren a tensión y que los elementos a compresión sean los menos solicitados, permitiendo a la estructura de manera global alcanzar la estabilidad con un menor uso de material.

La evidencia muestra que el desarrollo de cerchas invertidas es una práctica ampliamente usada, y que en una parte relevante de los casos las cerchas diseñadas de este modo cuentan con una cantidad bastante inferior al esperado, la distribución de esfuerzos y desplazamientos le permite alcanzar la estabilidad con un menor número de elementos, lo que se traduce en menor gasto de material.

La naturaleza de las estrategias de optimización es probabilística, lo que genera controversia con sus resultados, ya que, aunque los datos de entrada son idénticos, las soluciones resultantes presentan variaciones, pero esto es debido y fundamentado, a la esencia del algoritmo, ya que el mismo está basado en algoritmos genéticos, que a su vez imitan el proceso de la evolución, proceso, que no es determinista, y que gracias a esa característica tiene la capacidad de evaluar diferentes factores y parámetros para generar individuos cada vez más aptos.

La estructura del algoritmo epidemia presenta problemas en su ejecución, ya que conlleva un gran gasto computacional como se logra evidenciar en los capítulos anteriores, el poder ejecutar los procesos y dentro de ellos, los subprocesos de todas cada una de las estrategias de optimización planteadas, uso de programación enfocada a objetos, la cual solo permite ejecutar un renglón de información al tiempo, cohibe el desarrollo de todos los módulos; es preciso variar la forma en que se ejecutan estos módulos para lograr reducir el tiempo de ejecución de un dominio general de 5 horas a un poco menos de un quinto de ese tiempo.

No obstante, el resultado más notable que se puede evidenciar de la ejecución de epidemia es el siguiente:

TABLA =

6×4 [table](#)

ELEMENTO	NODO_I		NODO_J		SECCION
_____	_____	_____	_____	_____	_____
"Barra 1"	0	0	18.28	0	0.0014
"Barra 2"	18.28	0	9.14	-9.14	0.0077
"Barra 3"	9.14	-9.14	0	0	0.0056
"Barra 4"	28.28	0	18.28	-9.14	0.0091
"Barra 5"	18.28	-9.14	9.14	-9.14	0.0046
"Barra 6"	9.14	-9.14	0	-9.14	0.0012

El peso total es de **81.696 KN**, no obstante, cabe aclarar la permisibilidad del algoritmo entorno al cambio de forma y tamaño de las barras y/o estructura ya estipulada.

Lo anterior es la evaluación y resultado de uno de los problemas clásicos de optimización usados para evaluar la bondad de los algoritmos, cabe aclarar que todo tipo de evaluación de la eficiencia y eficacia de un algoritmo y/o proceso de optimización es subjetivo, ya que estos no se comportan igual frente a todos los problemas y todos los parámetros, aun así, al tomar este problema como medida de calificación se ha alcanzado un valor relevante, no se encuentra entre los primeros resultados, pero es un valor prometedor, ya que como se expresa en los métodos de validación y su análisis, los resultados que se encuentran en el top 10 de este problema pertenecen a tesis doctorales y trabajos corporativos.

## **14.1. TRABAJOS FUTUROS**

Dentro del estudio del presente proyecto, es factible presentar como posibles líneas futuras de investigación:

- El desarrollo de una estrategia de enmallado basada en los esfuerzos y desplazamientos.
- Tratado sobre la optimización en los diferentes procesos inmersos en la ingeniería civil.
- La aplicación de programación de estructura de **simulink** para la mejora del rendimiento de la ejecución de procesos tardíos.

Estudio de la optimización de conexiones resistentes a cortantes, conexiones pernadas o soldadas.

- Aplicación de estrategias de optimización en la planeación, corrección, ejecución y toma de decisiones en el ámbito de la construcción.
- El desarrollo de software comercial para el ámbito de la construcción y las obras civiles.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Sanchez- Caballero, M. Á. Sellés, R. Pla-Ferrando y M. Á. Peydro Raserp, «Nuevas técnicas de optimización de estructuras,» *3ciencias*, vol. I, nº 1, pp. 1-19, publicada 28-11-2012.
- [2] R. Señas lopez, «Introducción y planteamiento. La relación entre la forma y la función estructural,» de *Optimización de mallas estructurales de acero*, Catalunya, 2014, pp. 92-104.
- [3] The World Steel Association, «Steel in the circular economy,» *Steel In The Circular Economy A life cycle perspective*, Vols. %1 de %2ISBN 978-2-930069-80-7, pp. 2-30, 2015.
- [4] o. Moller, J. P. Ascheri y R. O. Foschi, «Metodología de optimización de estructuras para construcciones sismoresistentes,» *Sul-Americana De Engenharia Estrutural*, vol. 11, nº 1, pp. 79-108, enero-junio 2014.
- [5] G. Galilei, *Discorsi E Dismostrazioni Matematiche Intorno A Due Nouve Scienze*, Italia: Ludovico Elzeviro, 1638.
- [6] H. P. y S. C., «Multiobjective optimum design in mixed integer and discrete design variable problems,» *AIAA Journal*, 1992, pp. 670-675.
- [7] A. H., «Integrated genetic algorithm for optimization of space structures,» *Journal of Aerospace Engineering*, 1993, pp. 315-328.
- [8] S. D. Rajan, Sizing, shape, and topology design optimization of trusses using genetic algorithm., *Journal Of Structural Engineering*, 1995.
- [9] G. Barricelli, «Symbiogenetic evolution processes realizaed by artificial methods,» S.I, 1997.
- [10] Y. J. y S. C.K., «Structural optimization by genetci algorithms with tournament selection,» *Journal of Computation in Civil Engineering*, 1997, pp. 195-200.
- [11] D. K. y G. S., «Desing of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms,» *Finite Elements in Analysis and Design*, 2001, pp. 447-465.
- [12] G. D., E. J. y W. G., «Single and multiobjective frame optimization by evolutionary algoritms and the auto-adaptive rebirth operator,» *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, nº 193, pp. 33-35, 2004.
- [13] T. W., T. L. y G. Y., «Improved genetic algorithms for design optimization of trss structures with sizing, shape and topology variables,» *International Journal for Numerical Metohds in Engineering*, nº 62, 2005.
- [14] P. G. M.B. y B. G. A., «A modified elitist genetic algorithms applied to the design optimization of complex steel structures,» *Journal of Constructional Steel Research*, 2006.
- [15] P. G. M.B. y B. G. A., «Design optimization of 3d steel structures: Genetic Algorithms vs Classical Techniques,» *Journal Constructional Steel Research*, 2006.

- [16] V. Srinivas y K. Ramanjaneyulu, An Integrated Approach For Optimum Desing Of Bridge Decks Using Genetic Algorithms And Artificial Neural Networks, *Advance In Engineering Software*, 2007, pp. 475-487.
- [17] V. Togan y A. T. Daloglu, An Improved Genetic Algorithm With Inital Population Strategy And Self-Adaptive Member Grouping, *Computer & Structures*, 2008.
- [18] N. Noilublao y S. Bureerat, Simultaneous topology, shape and sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms, *Computers & Structures*, 2011.
- [19] J. A. Barcat, «Robert Hooke (1635-1703),» *Scielo*, pp. 753-756, 2003.
- [20] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Samuel Pepys, 1687.
- [21] J. L. Rond D'Alembert, *Tratie De Dynamique*, Paris: Paris, 1743.
- [22] L. P. Euler, *Theoria Motus Corporum Solidorum Seu Rigidorum*, Rostochi, 1765.
- [23] C. Coulomb, *Sur une Application des regles de maximis et minimis a quelques problemes de statiqye relatifs a l'architecture*, Paris, 1789.
- [24] c. L. Navier, *Resume Des Lecons Donnees A l'Ecole Des Ponts Et Chaussées Sur L'application De La Mecanique A L'etablissement Des Construction.*, Deuxième, 1833.
- [25] B. P. Clapeyron, *L'equilibre Interieur Des Corps Solides Y La Stabilité Des Voutes*, Paris: Academia de Ciencias de Paris, 1856.
- [26] J. C. Maxwell, *On Reciprocal Figures, Frames, And Diagramas Of Forces expresa*, Edingurgo: Neill and C°, 1870.
- [27] J. Alfaro, *Desarrollo Sostenible en la Ingenieria*, U. Politecnica, 2013.
- [28] C. A. Castigliano, *the theory of equilibrium of elastic systems and its applications*, Oravas, 1879.
- [29] C. E. Greene, *Structural Machine*, Michigan: U. Michigan, 1897-1905.
- [30] J. McCormac y J. K. J. Nelson, *Structural Analysis: A Classical and Matrix Approach*, Segunda ed., Addison-Wesley, 1997, pp. 430-451.
- [31] H. Cross, *Continuos Frames of Reinforced Concrete*, USA: J. Wiley & Sons, 1932.
- [32] S. Caballero Sanchez, *Optimizacion Estructural y Topologica De Estructuras Morfológicamente No Definidas Mediante Algoritmos Geneticos*, Valencia: Universitat Politecnica De Valencia, 2012.
- [33] A. Mitchell, *The Limits OF Economy Of Material In Frame-Structures*, USA: *Philosophical Magazine Series 6*, 1904, pp. 589-597.
- [34] J. Barta, *On The Minium Weight Of Certain Redundant Structures*, *Acta Tech*, 1957, pp. 67-75.
- [35] G. Sved, *The Minimum Weight Of Certain Redundant Structures*, Australia: *Australian Journal Of Applied Science*, 1954, pp. 1-8.
- [36] I. H. Osman y J. P. Kelly, *Meta-Heuristics: Theory & Applications*, Kluwer Academic Publishers., 1996.

- [37] R. J. Balling, *Optimal Steel Frame Design By Simulated Annealing*, New York, N.Y.: Journal Of Structural Engineering New York, 1991.
- [38] W. Bennage y A. Dhingra, *Single And Multiobjective Structural Optimization In Discrete-Continuous Variables Using Simulated Annealing, Single And Multiobjective Structural Optimization In Discrete-Continuous Variables Using Simulated Annealing*, 1995.
- [39] L. Lamberti, *An Efficient Simulated Annealing Algorithm For Design Optimization Of Truss Structures*, *Computers & Structures*, 2008, pp. 19-22.
- [40] J. Schutte y A. Groendwold, *Sizing design of truss structures using particle swarms*. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2003, pp. 261-269.
- [41] L. Li, Z. Huang, F. Liu y Q. Wu, *A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures*, *Computers & Structures*, 2007, pp. 340-349.
- [42] D. E. Goldberg, *Computer-aided gas pipeline operation using genetic algorithms and rule learning*. PhD thesis, Michigan: Ann Arbor, MI, 1983.
- [43] D. E. Goldberg, *Computer-aided pipeline operation using genetic algorithms and rule learning*, 1984.
- [44] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization And Machine Learning*, Addison-Wesley , 1989.
- [45] R. J. Balling, R. R. Briggs y K. Gillman, *Multiple Optimum Size/Shape/-Topology Designs For Skeletal Structures Using A genetic Algrithm*, *Journal Of Structural Engineering*, 2006.
- [46] L. Guo, W. Tang y M. Yuan, «Simultaneous Topology And Sizing Optimization Of Trusses By Improved Genetic Algorithm,» de *In Techcnology And Innovation Conference 2009*, 2009.
- [47] N. Noilublao y S. Bureerat, «Simultaneous topology, shape and sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms.,» *Computers & Structure*, pp. 23-24, 2011.
- [48] V. Daglio, «Innovación Educativa,» UPM, [En línea]. Available: <http://innovacioneducativa.upm.es>. [Último acceso: 04 12 2017].
- [49] C. A. Meza Valencia, *Optimización Topológica en el Diseño de Elementos Estructurales Mecánicos*, Santiago de Cali: UAO, 2012.
- [50] Xunji, Briggs y K. Gillman, *Multiple Optimum Size/Shape/- Topology Designs For Skeletal Structures Using A genetic Algrithm*, *Journal Of Structural Engineering*, 2006.
- [51] A. Samartín Quiroga, *Mallas Isostáticas Bidimensionales en Elementos Finitos*.
- [52] O. Garcia, A. Islas, G. Ayala y D. Delgado, «Desarrollo de herramientas de análisis estructural,» *UNAM*.
- [53] E. W. V. Chaves, *Mecánica del Medio Continuo (Modelos Constitutivos)*, Ciudad Real, 2009.

- [54] R. Echeverri, «Metodología basada en Algoritmos Genéticos y Programación en Paralelo Para El Diseño Optimo De Armaduras,» *Pontificia Universidad Javeriana*, vol. I, nº 1, p. 158, 2014.
- [55] K. A. De Jong, *An Analysis Of The Behavior Of a Class Of Genetic Adaptive System (PhD THESIS)*, MICHIGAN, USA: Ann Arbor, 1975.
- [56] G. Ebanau, *An advanced evolutionary strategy with an adaptive penalty function for mixed-discrete structural optimization*, *Advances in Engineering Software*, 2005.
- [57] S. Ai y Y. Wang, *Applications of improved genetic algorithm in structural optimization design.*, vol. 236, I. a. M. Engineering, Ed., Berlin: Computer And Sciene, 2011.
- [58] A. Kaveh y M. Shahrouzi, *Simultaneous Topology And Size Optimization Of Structures By Genetic Algorithm Using minimal Length Chromosome*, *Engineering Computations*, 2006.
- [59] K. S. Lee y Z. W. Geem, *A new Meta-Heuristic Algorithm For Continuous Engineering Optimzation: Harmony Search Theory And Practice.*, *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering*, 2005.
- [60] J. M. P. Moreno, *Artist, Grupo de Modelamiento de Sistemas*. [Art]. 2016.
- [61] E. P. Wigner, «Theory of traveling wave optical laser,» *Phys. Rev.*, vol. 134, pp. A635-A646, 2005.
- [62] A. C. Sole, *Instrumentación Industrial*, Mexico: Alfaomega, 2006.
- [63] L. L. a. H. Miao, «A specification based approach to testing polymorphic attributes,» de *Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004*, Seattle, WA, USA,, November 8-12.
- [64] A. Rezi and M. Allam,, «Techniques in array processing by means of transformations,» de *Control and Dynamic Systems Vol. 69*, San Diego, Academic Press, 1995, pp. 133-180.
- [65] «TenSTEP,» [En línea]. Available: Cuando ha terminado de crear los objetivos y alcance, regrese y asegúrese de que todos están alineados. No debe tener objetivos que hagan referencia a entregables no definidos en los postulados del alcance. Si no está construyendo lo suficiente para satis. [Último acceso: 14 12 2015].
- [66] J. leon, «Optimización Topológica Estructural Aplicada En Ingeniería Mecánica,» *ResearchGate*, vol. 2, nº iii, p. 15, 2017.
- [67] Universidad De Sevilla, «Física Aplicada Iii,» Universidad De Sevilla - Departamento De Física Aplicada III, [En línea]. Available: <http://laplace.us.es>. [Último acceso: 03 11 2018].
- [68] M. J, «Diseño de Estructuras de Acero: Método LRFD,» *Universidad de los Andes-Venezuela*, vol. 2, pp. 512-585, 2001.
- [69] V. Escalante, «Diseño de Estructuras Metalicas,» vol. I, pp. 17-46, 2003.

- [70] Asociación Latinoamericana del Acero, «Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero,» *Alacero*, pp. 76-152, 2010.
- [71] Ellen MacArthur Foundation ANBI, «Unlocking the circular potential of the steel industry,» *The Ellen MacArthur Foundation*, vol. iii, nº 10, pp. 3-9, Oct-2017.
- [72] I. Fariza, «Los precios de las materias primas caen a su nivel más bajo en 16 años,» *El País*, 22 Nov 2015.