



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

**OPTIMIZACION DE UNA TORRE RETICULAR CONCENTRADORA DE ENERGÍA TERMO-SOLAR A TRAVÉS DEL MÉTODO DE ALGORITMOS GENÉTICOS**

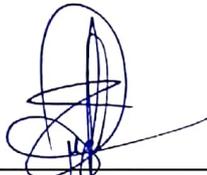
Opción de titulación  
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**Maestro en Ciencias (Estructuras)**

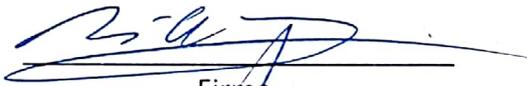
Presenta:  
**Ing. Alvaro Vera Murillo**

Dirigido por:  
**Dr. Jaime Moisés Horta Rangel**

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
**Presidente**

  
Firma

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
**Secretario**

  
Firma

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras  
**Vocal**

  
Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala  
**Suplente**

  
Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
**Suplente**

  
Firma

  
Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad de Ingeniería

  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Agosto 2018



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

**OPTIMIZACION DE UNA TORRE RETICULAR CONCENTRADORA DE ENERGÍA TERMO-SOLAR A  
TRAVÉS DEL MÉTODO DE ALGORITMOS GENÉTICOS**

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**Maestro en Ciencias (Estructuras)**

Presenta:  
**Ing. Alvaro Vera Murillo**

Dirigido por:  
**Dr. Jaime Moisés Horta Rangel**

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
**Presidente**

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
**Secretario**

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras  
**Vocal**

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala  
**Suplente**

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
**Suplente**

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad de Ingeniería

\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Agosto 2018

El fracaso es simplemente la oportunidad para comenzar de nuevo, en esta ocasión con más inteligencia.

(FORD, HENRY)

Al realizar el diseño de una estructura es importante incluir, en el mismo proceso, las consideraciones del diseño y optimizaciones teóricas, así como las circunstancias que afectan durante el proceso constructivo y durante el periodo de la vida útil de la estructura. Con un análisis multi-objetivo en una función objetivo de “peso propio” se obtiene una optimización completa de las estructuras. Para solventar las optimizaciones multi-objetivo, conteniendo las consideraciones teóricas y prácticas, en este trabajo se procede a encontrar la mejor topología posible de una torre reticular de acero de uso para un campo de heliostatos de torre central concentradora de energía termo-solar. Para la obtención de la topología se hace una comparativa simple de tres diferentes formas estructurales, donde se toma en consideración el peso propio, los desplazamientos laterales producto del viento, la funcionalidad, la eficiencia de captación energética, constructibilidad, capacidad de ser optimizable, de ser modular y de ser transportable. Una torre reticular de base hexagonal, formada por módulos de marcos contraventeados (elegida como mejor topología), es usada para ser optimizada mediante un Algoritmo Genético Modificado, utilizando como restricciones los requisitos bajo cargas de diseño y servicio marcados en el Reglamento de Construcción del Distrito Federal versión 2017, y teniendo como función objetivo el peso y variables de tipo discretas en el análisis. Como herramienta para la evaluación de la función objetivo y sus restricciones, la torre se programó con lenguaje APDL, utilizando el Método de Elemento Finito. Producto de dicha optimización se redujo el peso en un 38.6% entre una generación inicial 1 de 15.93 Tn, y una generación final 48 de 9.78 Tn. La torre obtenida mediante la optimización con el algoritmo genético es un 25.71% más ligera a comparación de la obtenida mediante una optimización usando el programa comercial SAP2000 (12.30 Tn).

Palabras clave: **Algoritmo Genético, Campo de Heliostatos, Optimización, Topología, Torre Reticular**

When a structure is designed, it is important to include in the same process, the considerations of the design and theoretical optimizations, as well as the circumstances that are affected during the construction process and during the period of the useful life of the structure. With a multi-objective analysis in an objective function of "self-weight" a complete optimization of the structures is obtained. To solve the multi-objective optimizations, containing the theoretical and practical considerations, in this work we proceed to find the best possible topology of a lattice steel tower to be used in a heliostat field of a central tower concentrating thermo-solar energy. To obtain the topology, a simple comparison of three different structural shapes is made, taking into account the self-weight, the lateral displacements produced by the wind, the functionality, the efficiency of energy collection, constructability, capacity to be optimized, to be modular and transportable. A lattice tower with a hexagonal base, formed by modules of lateral-restricted frames (chosen as best topology), is used to be optimized by a Modified Genetic Algorithm, using as restrictions the requirements under design and service loads established in the "*Reglamento de Construcción del Distrito Federal versión 2017*", and having as objective function the weight and discrete variables in the analysis. As a tool for the evaluation of the objective function and its restrictions, the tower was programmed with APDL language, using the Finite Element Method. Product of this optimization was reduced the weight in a 38.6% between an initial generation 1 of 15.93 Tn, and a final generation 48 of 9.78 Tn. The tower obtained through optimization with the genetic algorithm is 25.71% lighter compared to that obtained through an optimization using the commercial program SAP2000 (12.30 Tn).

**Keywords: Genetic Algorithm, Heliostats Field, Optimization, Topology, Lattice Tower.**

## AGRADECIMIENTOS

---

A mis padres y mi hermano, ya que gracias a su apoyo incondicional tanto profesional como personal durante todo el transcurso de mi vida, pude desarrollarme como el profesionista con las habilidades necesarias para cursar y completar la maestría.

A mi novia, por estar a mi lado siempre, por el apoyo, amor y comprensión obtenido durante el desarrollo de la maestría.

A mis amigos y compañeros de la Maestría en Estructuras, por la unión tanto en gran amistad como de apoyo mutuo que tuvimos en el periodo que convivimos juntos dentro y fuera del cubículo.

Al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel por el apoyo y enseñanzas constantes como mentor, director de tesis, profesor y consejero.

A todos los catedráticos de la Universidad Autónoma de Querétaro con los que tuve el gusto de ser su alumno, por sus conocimientos y enseñanzas adquiridos durante el transcurso de la Maestría.

A mis compañeros y amigos de la Dirección de Proyectos de Obra Civil de la Secretaría de Obras Públicas del Estado de Guanajuato, cuya paciencia, amistad y enseñanzas me dieron la experiencia para tener un desarrollo integral de forma profesional y personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por el apoyo invaluable brindado para la culminación de este proyecto y de la obtención del grado de Maestro en Ciencia con línea terminal en Estructuras.

|   |            |
|---|------------|
| <b>RESUMEN.....</b>   | <b>III</b> |
| <b>SUMMARY .....</b>  | <b>IV</b>  |
| <b>AGRADECIMIENTOS.....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>CONTENIDO.....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>   | <b>6</b>   |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>   | <b>8</b>   |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>12</b>  |
| 1.1    GENERALIDADES.....   | 12         |
| 1.2    HIPÓTESIS .....  | 14         |
| 1.3    OBJETIVO GENERAL.....  | 15         |
| 1.4    OBJETIVOS PARTICULARES.....  | 15         |
| 1.5    ALCANCES Y LIMITACIONES.....   | 15         |
| <b>2. ANTECEDENTES .....</b>  | <b>17</b>  |
| 2.1    OPTIMIZACIÓN DE TORRES RETICULARES.....  | 17         |
| 2.2    OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS.....                         | 19         |
| 2.3    OPTIMIZACIÓN DE LA TOPOLOGÍA.....  | 20         |
| 2.4    EFECTOS DEL VIENTO EN TORRES RETICULARES.....  | 21         |
| 2.5    TORRES CENTRALES RECEPTORES DE ENERGÍA TERMO-SOLAR MEDIANTE CAMPO DE HELIÓSTATOS. .... | 22         |
| <b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>   | <b>31</b>  |
| 3.1    PRESIONES DE VIENTO .....  | 31         |
| 3.1.1 <i>Clasificación de las estructuras según su importancia .....</i>                      | 32         |
| 3.1.2 <i>Clasificación de las estructuras según su respuesta al viento .....</i>              | 32         |
| 3.1.3 <i>Presión dinámica de base .....</i>   | 33         |
| 3.1.4 <i>Análisis Estático .....</i>  | 33         |
| 3.1.5 <i>Análisis Dinámico.....</i>   | 34         |
| 3.2    DISEÑO DE LOS ELEMENTOS.....   | 35         |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.2.1     | <i>Elementos a tensión</i>  | 35        |
| 3.2.2     | <i>Elementos a compresión</i>                                       | 36        |
| 3.2.3     | <i>Elementos a flexión</i>  | 37        |
| 3.2.4     | <i>Elementos a cortante</i>   | 38        |
| 3.2.5     | <i>Elementos a flexo-compresión</i>                                 | 39        |
| 3.2.6     | <i>Elementos a flexo-tensión</i>                                    | 40        |
| 3.2.7     | <i>Elementos a flexo-cortante</i>                                   | 40        |
| 3.3       | ALGORITMOS GENÉTICOS  | 41        |
| 3.4       | PROCESO DE DISEÑO ESTRUCTURAL                                       | 44        |
| 3.5       | MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS   | 46        |
| 3.5.1     | <i>Descripción general</i>  | 46        |
| 3.5.2     | <i>Elemento finito "BEAM188"</i>                                    | 46        |
| 3.5.3     | <i>Elemento finito "LINK180"</i>                                    | 47        |
| 3.5.4     | <i>ANSYS y su programación APDL</i>                                 | 49        |
| <b>4.</b> | <b>METODOLOGIA</b>  | <b>50</b> |
| <b>5.</b> | <b>ELECCION DE LA TOPOLOGIA</b>                                     | <b>55</b> |
| 5.1       | CARACTERÍSTICAS DE LA FORMA ESTRUCTURAL                             | 55        |
| 5.1.1     | <i>Análisis de la eficiencia energética de la forma estructural</i> | 56        |
| 5.1.2     | <i>Análisis de la estructuración de la forma estructural</i>        | 59        |
| 5.1.3     | <i>Perfiles y materiales</i>  | 61        |
| 5.1.4     | <i>Capacidad de modulación</i>                                      | 62        |
| 5.1.5     | <i>Practicidad de transporte</i>                                    | 62        |
| 5.1.6     | <i>Practicidad de construcción</i>                                  | 63        |
| 5.1.7     | <i>Facilidad de ser programable y optimizable</i>                   | 63        |
| 5.1.8     | <i>Normatividad</i>   | 64        |
| 5.2       | METODOLOGÍA DE LA COMPARATIVA DE LAS TOPOLOGÍAS                     | 64        |
| 5.2.1     | <i>Generalidades</i>  | 64        |
| 5.2.2     | <i>Requerimientos técnicos de espacio</i>                           | 64        |
| 5.2.3     | <i>Cargas muertas</i>   | 65        |
| 5.2.4     | <i>Cargas vivas sobre la torre</i>                                  | 66        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 5.2.5     | <i>Cargas de viento sobre la estructura</i> .....        | 66        |
| 5.2.6     | <i>Análisis de las estructuras</i> .....                 | 68        |
| 5.3       | PROPUESTAS DE FORMAS ESTRUCTURALES.....                  | 68        |
| 5.3.1     | <i>Topología Uno</i> .....                               | 68        |
| 5.3.2     | <i>Topología Dos</i> .....                               | 70        |
| 5.3.3     | <i>Topología Tres</i> .....                              | 72        |
| 5.4       | ELECCIÓN DE LA MEJOR TOPOLOGÍA.....                      | 74        |
| 5.4.1     | <i>Comparativa de las formas estructurales</i> .....     | 74        |
| 5.4.2     | <i>Conclusiones de comparativa</i> .....                 | 75        |
| <b>6.</b> | <b>ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS</b> .....        | <b>77</b> |
| 6.1       | GENERALIDADES.....                                       | 77        |
| 6.2       | DATOS INICIALES.....                                     | 78        |
| 6.3       | IMPORTACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LOS INDIVIDUOS.....    | 80        |
| 6.4       | MATERIALES EMPLEADOS.....                                | 81        |
| 6.5       | ANÁLISIS DE CADA INDIVIDUO.....                          | 81        |
| 6.5.1     | <i>Creación de nodos</i> .....                           | 81        |
| 6.5.2     | <i>Creación de líneas</i> .....                          | 83        |
| 6.5.3     | <i>Asignación de propiedades de perfiles</i> .....       | 84        |
| 6.5.4     | <i>Corrección de arriostramientos</i> .....              | 86        |
| 6.5.5     | <i>Elementos finitos y mallado</i> .....                 | 87        |
| 6.5.6     | <i>Acoplamiento de grados de libertad</i> .....          | 89        |
| 6.5.7     | <i>Asignación de apoyos</i> .....                        | 89        |
| 6.5.8     | <i>Peso propio de la torre</i> .....                     | 90        |
| 6.5.9     | <i>Análisis modal</i> .....                              | 90        |
| 6.5.10    | <i>Cargas por peso propio de la estructura</i> .....     | 90        |
| 6.5.11    | <i>Cargas sobre la azotea</i> .....                      | 91        |
| 6.5.12    | <i>Cargas en el cuarto de máquinas</i> .....             | 91        |
| 6.5.13    | <i>Cargas de viento</i> .....                            | 92        |
| 6.5.14    | <i>Combinaciones de cargas</i> .....                     | 92        |
| 6.5.15    | <i>Resumen de comportamiento de cada individuo</i> ..... | 94        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>7.</b> | <b>ALGORITMO GENETICO.....</b>   | <b>97</b>  |
| 7.1       | GENERALIDADES.....   | 97         |
| 7.2       | VARIABLES O GENES.....   | 98         |
| 7.2.1     | <i>Número de módulos con arriostadores.....</i>                                | <i>98</i>  |
| 7.2.2     | <i>Perfiles ocupados para las columnas de la torre.....</i>                    | <i>99</i>  |
| 7.2.3     | <i>Perfiles ocupados para las vigas de la torre.....</i>                       | <i>101</i> |
| 7.2.4     | <i>Perfiles ocupados para los contraventeos de la torre.....</i>               | <i>102</i> |
| 7.2.5     | <i>Perfiles ocupados para los rigidizantes de la torre.....</i>                | <i>103</i> |
| 7.3       | CÓDIGO POR INDIVIDUO.....  | 103        |
| 7.4       | MATRIZ DE POBLACIÓN INICIAL.....   | 105        |
| 7.4.1     | <i>Matriz binaria de población.....</i>  | <i>105</i> |
| 7.4.2     | <i>Matriz base decimal de población.....</i>                                   | <i>105</i> |
| 7.4.3     | <i>Matriz de población con valores reales.....</i>                             | <i>106</i> |
| 7.5       | FUNCIÓN OBJETIVO.....  | 107        |
| 7.6       | PENALIZACIÓN.....  | 108        |
| 7.7       | EVOLUCIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO.....  | 108        |
| 7.8       | SELECCIÓN DE LOS INDIVIDUOS MÁS APTOS.....                                     | 109        |
| 7.8.1     | <i>Orden ascendente de los valores de la función objetivo amplificada.....</i> | <i>109</i> |
| 7.8.2     | <i>Selección natural condicionada de individuos.....</i>                       | <i>110</i> |
| 7.9       | PROCESO DE REPRODUCCIÓN DE LOS INDIVIDUOS.....                                 | 111        |
| 7.10      | CONFORMACIÓN DE NUEVA POBLACIÓN.....   | 112        |
| 7.11      | PROCESO DE MUTACIÓN.....   | 113        |
| 7.12      | TORRE ÓPTIMA Y CONVERGENCIA.....   | 114        |
| <b>8.</b> | <b>RESULTADOS.....</b>   | <b>115</b> |
| 8.1       | RESULTADOS DEL ALGORITMO GENÉTICO.....   | 116        |
| 8.2       | TORRE OPTIMIZADA EN PESO CON EL A.G.....                                       | 125        |
| <b>9.</b> | <b>DISCUSION DE RESULTADOS.....</b>  | <b>131</b> |
| 9.1       | TORRE OPTIMIZADA CON EL SAP 2000 (TOSAP).....                                  | 132        |
| 9.2       | COMPARATIVA ENTRE TOAG Y TOSAP.....  | 136        |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| <b>10.</b> | <b>CONCLUSIONES .....</b> | <b>139</b> |
| <b>11.</b> | <b>REFERENCIAS.....</b>   | <b>142</b> |
| <b>12.</b> | <b>ANEXOS.....</b>        | <b>147</b> |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 2-1 Tabla de centrales experimentales de energía termo-solar (Muñoz, 2015)<br>..... | 24  |
| Tabla 5-1 Combinaciones de carga.....   | 68  |
| Tabla 5-2 Secciones de los perfiles de la Topología Uno. ....                             | 69  |
| Tabla 5-3 Secciones de los perfiles de la Topología Dos.....                              | 71  |
| Tabla 5-4 Secciones de los perfiles de la Topología Tres.....                             | 73  |
| Tabla 5-5 Resumen de características de las Topologías.....                               | 74  |
| Tabla 7-1 Sección de la Torre a Arristrar .....   | 99  |
| Tabla 7-2 Perfiles HSS para columnas .....  | 100 |
| Tabla 7-3 Perfiles HSS para Vigas.....  | 101 |
| Tabla 7-4 Perfiles PTR para Contraventeos y Rigidizantes .....                            | 102 |
| Tabla 7-5 Factores a utilizar por variable .....  | 106 |
| Tabla 7-6 Cantidad de reproducciones .....  | 110 |
| Tabla 8-1 Resultados del algoritmo genético .....   | 116 |
| Tabla 8-2 Resultados de combinación de carga "Servicio 1" y "Diseño 2" .....              | 117 |
| Tabla 8-3 Resultados de combinación de carga "Diseño 1" .....                             | 119 |
| Tabla 8-4 Resumen de Perfiles de A.G.....   | 126 |
| Tabla 8-5 Comportamiento de la torre óptima por generación .....                          | 127 |
| Tabla 8-6 Revisión de comportamiento de torre óptima.....                                 | 129 |

## ÍNDICE DE TABLAS

---

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 9-1 Perfiles y pesos de los elementos de la TOSAP ..... | 135 |
| Tabla 9-2 Comparativa entre TOAG y TOSAP .....                | 137 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2-1 Gráfica de planta termo-solar de torre central (Opex-energy,2017).....                                  | 23 |
| Figura 2-2 Mapa de centrales termo-solares en el mundo (google maps) .....   | 25 |
| Figura 2-3 Imagen de central termo-solar PS20 (Termosolar,2009) .....  | 25 |
| Figura 2-4 Imagen de torre Ivanpah, EUA (Terrain, 2014) .....  | 26 |
| Figura 2-5 Torre Eurelios, Italia (Archive Parodi,1982). .....   | 27 |
| Figura 2-6 Torre concentradora de campo experimental, Sonora México. Gaceta USON#265.....                          | 27 |
| Figura 2-7 Imagen de torre concentradora de campo experimental en Hidalgo, México. (Fotografía en campo).....      | 28 |
| Figura 2-8 Campo de Helióstatos perteneciente a la UAQ.....  | 29 |
| Figura 2-9 Fotos de torre de Heliostatós de la UAQ. A) Conexiones tipo en todos los nodos. B) Torre completa. .... | 30 |
| Figura 3-1 Gráfica de convergencia de la solución óptima (Moujahid, et.al.,2008) .                                 | 44 |
| Figura 3-2 Elemento Finito "Beam188" (SAS IP Inc, 2013).....   | 47 |
| Figura 3-3 Elemento Finito "Link180" (SAS IP Inc, 2013) .....  | 48 |
| Figura 4-1 Elección de la mejor topología .....  | 51 |
| Figura 4-2 Algoritmo de la Torre de Helióstatos .....  | 52 |
| Figura 4-3 Algoritmo de código Genético .....  | 53 |
| Figura 4-4 Resumen del Proceso General .....   | 54 |
| Figura 5-1 Posición de la energía solar sobre el receptor .....  | 57 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5-2 Distribución de energía en topología cuadrada.....     | 57  |
| Figura 5-3 Distribución de energía en topología circular .....    | 58  |
| Figura 5-4 Distribución de energía en topología hexagonal .....   | 59  |
| Figura 5-5 Estructuración de marcos contraventeados .....         | 59  |
| Figura 5-6 Estructuración a base de malla espacial .....          | 60  |
| Figura 5-7 Ejemplo de perfil HSS y PTR .....                      | 62  |
| Figura 5-8 Esquema de aplicación de cargas de viento .....        | 67  |
| Figura 5-9 Forma estructural de Topología Uno.....                | 69  |
| Figura 5-10 Forma estructural de Topología Dos.....               | 71  |
| Figura 5-11 Figura 4 10 Forma estructural de Topología Tres. .... | 73  |
| Figura 6-1 Topología Hexagonal de los nodos.....                  | 82  |
| Figura 6-2 Forma completa de la torre mediante los nodos. ....    | 83  |
| Figura 6-3 Reticula de vigas de azotea .....                      | 84  |
| Figura 6-4 Totalidad de líneas de la torre.....                   | 84  |
| Figura 6-5 Viga tipo HREC de ANSYS.....                           | 85  |
| Figura 6-6 Geometría con valor SEAR=2.....                        | 87  |
| Figura 6-7 Geometría con valor SEAR=3.....                        | 87  |
| Figura 6-8 Planos de apoyo para orientación.....                  | 88  |
| Figura 6-9 Mallado de los elementos de la Torre .....             | 89  |
| Figura 6-10 Apoyos empotrados en la base.....                     | 90  |
| Figura 7-1 Acomodo de variables (genes) de individuo .....        | 104 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 7-2 Ejemplo de matriz MPA.....   | 105 |
| Figura 7-3 Ejemplo de matriz MPD .....  | 106 |
| Figura 7-4 Ejemplo de matriz MVRE .....   | 107 |
| Figura 7-5 Ejemplo de matriz MFOI .....   | 108 |
| Figura 7-6 Ejemplo de matriz MFOA .....   | 110 |
| Figura 7-7 Ejemplo de primer padre.....   | 112 |
| Figura 7-8 Ejemplo de segundo padre .....   | 112 |
| Figura 7-9 Ejemplo de primer hijo .....   | 112 |
| Figura 7-10 Ejemplo de segundo hijo.....  | 112 |
| Figura 8-1 Algoritmo Genético: Gráfica de comportamiento del algoritmo. ....  | 123 |
| Figura 8-2 Algoritmo Genético: Gráfica de comportamiento del factor genético. ..  | 124 |
| Figura 8-3 Algoritmo Genético: Gráfica de comportamiento de esfuerzos de compresión y tensión en la combinación “Diseño 1”. ....                    | 125 |
| Figura 8-4 Algoritmo Genético: Gráfica de comportamiento de la restricción total. ....  | 125 |
| Figura 8-5 Geometría de la torre optimizada mediante AG .....   | 127 |
| Figura 8-6 Fuerzas axiales en Torre Optimizada .....  | 128 |
| Figura 8-7 Momentos flexionantes en Torre Optimizada.....   | 128 |
| Figura 8-8 Fuerzas cortantes en Torre Optimizada .....  | 129 |
| Figura 9-1 Geometría de la Torre Optimizada a optimizar con el SAP 2000. a) Geometría de la torre completa. b) Geometría de uno de los módulos..... | 133 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

|   |     |
|---|-----|
| Figura 9-2 Elementos mecánicos de TOSAP en combinación "Diseño 2". a) Momentos Flexionantes. b) Cortantes. c) Fuerzas Axiales ..... | 134 |
| Figura 9-3 Porcentajes de trabajo de los elementos de la TOSAP .....  | 135 |
| Figura 9-4 Desplazamientos máximos en la parte superior de la TOSAP.....  | 136 |

CAPITULO 1

# 1. INTRODUCCIÓN

---

1.1 Generalidades

La ingeniería siempre está en constante evolución, y hoy en día el uso de métodos de elemento finito (MEF) y de algoritmos matemáticos son más que necesarios para el diseño estructural (Toğan and Daloğlu, 2006). Uno de los principales enfoques en la mejora de las técnicas de diseño es la búsqueda e implementación de algoritmos de optimización que incida en el costo de las estructuras. Uno de los algoritmos más populares y utilizados para resolver problemas de búsqueda y optimización es el algoritmo genético (AG) (Erbatur et al., 2000).

El presente trabajo se estructura en varios temas esquematizados en capítulos. En el primer capítulo se muestra una introducción del proyecto, donde se sintetiza el proyecto, se muestra la hipótesis, los objetivos y los alcances. En este capítulo se muestra la importancia de la realización del proyecto, la problemática a solucionar y un resumen de la metodología empleada.

En el segundo capítulo se señalan los antecedentes generales del proyecto, donde se muestran las investigaciones ya realizadas de optimizaciones de torres reticulares, investigaciones de optimizaciones mediante algoritmos genéticos, optimización y elección de topologías. Se señalará la investigación que se ha realizado respecto al impacto de las fuerzas de viento sobre torres reticulares. Se muestra un resumen de las torres de heliostatos de campos generadores de energía termo-solar que existen en México y en el mundo.

Como tercer capítulo se muestra de forma general una descripción del proceso del algoritmo genético (Sánchez, 2012), un resumen de la obtención de las fuerzas de viento a ser aplicadas sobre una torre reticular (CFE, 2008), el diseño de los elementos de acero (Administración Pública de la Ciudad de México, 2017), además del resumen del proceso clásico que se realiza en el diseño estructural .

En el cuarto capítulo se describe la metodología que se va a desarrollar para alcanzar las finalidades del proyecto. Mediante diagramas de flujo se explicará el procedimiento a llevar a cabo en el trabajo.

Dentro del quinto capítulo, se va a mencionar paso a paso el proceso de selección de las distintas topologías iniciales y el proceso de comparación y eliminación para obtener la mejor.

En el sexto capítulo se desarrollará el proceso de creación del algoritmo para la modelación de la torre de heliostatos que funcionará como la función objetivo a desarrollarse en el lenguaje ADPL del ANSYS, donde incluirá la topología seleccionada y las variables de *sizing* y de *configuration*.

Siendo parte del séptimo capítulo, se describirá el proceso del algoritmo genético junto con todos sus parámetros donde se combinará con el algoritmo en APDL para obtener la propuesta de torre de heliostatos optimizada.

En el octavo capítulo se desarrollan los resultados del proceso descrito en la metodología, desde las propuestas de topologías, la topología seleccionada, y el resultado del algoritmo genético aplicado a la topología seleccionada.

En el noveno capítulo se validarán los resultados mediante la comparativa con otros métodos de optimización ya establecidos en los programas de diseño utilizados.

En el décimo capítulo se describirán las conclusiones de todo el trabajo, se verificará la hipótesis y se señalarán los posibles trabajos e investigaciones que se puedan generar a partir del presente trabajo.

### 1.2 Hipótesis

Mediante la implementación de un algoritmo genético modificado y la elección de una topología acorde a la funcionalidad de la estructura, se obtendrá una torre reticular de acero optimizada en peso, estableciendo las dimensiones y secciones de sus miembros.

### 1.3 Objetivo general

Obtener el algoritmo para el diseño estructural de una torre de heliostatos, optimizado en peso, que posea una configuración modular y practicidad constructiva, mediante una programación en software en elemento finito y la implementación de un algoritmo genético, que cumpla con las normativas mexicanas de construcción.

### 1.4 Objetivos particulares

- a. Elaborar tres propuestas de topología de torres de heliostatos distintas mediante la consulta del estado del arte, que cumplan con las normativas de construcción mexicanas.
- b. Elegir la propuesta de topología de torre de heliostatos más viable, mediante un criterio de eficiencia energética, practicidad constructiva y viabilidad de funcionamiento.
- c. Programar un algoritmo mediante lenguaje APDL en el cual se introduzcan los requerimientos técnicos y topología seleccionada para obtener las dimensiones y secciones de elementos.
- d. Obtener el diseño optimizado de la torre reticular mediante el uso de algoritmos genéticos y el algoritmo de la torre desarrollado.
- e. Comparar el peso del diseño optimizado contra los obtenidos la optimización de perfiles del programa SAP-2000 V16

### 1.5 Alcances y limitaciones

El proyecto tiene como limitantes la capacidad de procesamiento del equipo computacional disponible. Si se llegara a tener una mayor capacidad se podría

aumentar el número de perfiles distintos a utilizar, así como el número de secciones en que se dividiría la torre para poder obtener un resultado con una mayor precisión en su optimización.

CAPITULO 2

# 2. ANTECEDENTES

---

## 2.1 Optimización de torres reticulares

Dentro de la optimización una parte fundamental es la elección de las variables de diseño, donde para obtener un resultado con un mejor comportamiento se deben de considerar variables con valores discretos y continuos (Couceiro et al., 2016).

En este tipo de torres, la estructuración está enfocada en que los elementos solo trabajen ante cargas axiales, y donde los perfiles tengan una capacidad a compresión similar al de su resistencia a tensión. A partir del estudio de pruebas de una muestra de torres de transmisión reticulares, se concluyó que las fallas más comunes de los elementos en dichas torres se desarrollan antes de su capacidad última (Prasad Rao et al., 2010). Los elementos más propensos a fallar son las columnas y contraventeos ubicados cerca de la altura media de la torre. Así como se analiza la alta similitud de un análisis no lineal con uno tradicional lineal.

Para tener conciencia de los esfuerzos generados por las fallas más comunes en las torres reticulares, se compararon las fallas con las obtenidas mediante un modelo de elemento finito de la torre (Prasad Rao et al., 2012). Con ello se corroboran los resultados de las fallas y se concluye en que las variables que provocan la mayoría de las fallas de la torre provienen de un mal proceso de construcción, de materiales deficientes y conexiones más colocadas.

Dentro de los análisis a torres reticulares, se ha utilizado como opción en torres de soporte para turbinas de viento la optimización de los elementos utilizando como parámetro el mismo perfil en toda la altura de la torre, solo variando sus espesores dentro de la optimización, notando la optimización del peso y el buen comportamiento global de la torre (Zwick et al., 2012).

Dentro del proceso de optimización de una torre de soporte de líneas de transmisión, se debe de conducir la optimización hacia tres variables: la topología, el área de las secciones transversales de sus miembros y la posición de los nodos. Para tener una estructura modular con una funcionalidad óptima, se utilizará una topología modular previa al proceso del algoritmo de optimización (de Souza et al., 2016). Dicha topología se elegirá entre las topologías ya existentes de torres de líneas de transmisión, y dicha topología se introducirá en el algoritmo para optimizar

la posición de sus nodos y el área de sección de sus elementos en una función multi-objetivo.

Al revisar los modelos matemáticos de torres reticulares estructurados con elementos a base de perfiles de ángulos mediante un análisis no lineal se encuentra que no corresponden a la realidad de las torres existentes, esto debido a los comportamientos a compresión de los ángulos (Prasad Rao and Kalyanaraman, 2001). Por lo que se debe de buscar validar los modelos para afirmar que la idealización matemática corresponda con la realidad.

### 2.2 Optimización de estructuras mediante algoritmos genéticos

Utilizando los principios de optimización mediante algoritmos genéticos, el método de aproximación de optimización estructural mediante programación genética optimiza la topología y las secciones de los elementos de una estructura reticular, esto lo realiza mediante el uso del uso de diagrama de árboles para ejemplificar las propiedades de las variables (Assimi et al., 2017).

En torres de soporte de turbinas de viento el uso de un algoritmo genético es una opción viable para la optimización del diámetro y espesor del elemento tubular de soporte. Con dichas variables se hace el proceso iterativo del proceso de adaptación genético del algoritmo hasta llegar a la solución óptima (Gentils et al., 2017).

En la optimización multi-objetivo de una armadura plana, el algoritmo genérico optimizará de forma análoga el *sizing*, *configuration* y *topology*. Donde se utilizará un método analítico para la evaluación de los esfuerzos y desplazamientos de la estructura. En caso de la estructura no cumpla con los criterios de diseño, se procederá a aplicar una penalización, donde ésta dependerá de la magnitud del criterio que no cumpla (Cazacu and Grama, 2014).

Hay varios componentes que integran el algoritmo genético, como lo son los operadores genéticos (número de individuos, factor de cruza, de mutación, la función

objetivo, las penalizaciones y la codificación de las variables. La codificación se sugiere que sea un número por variable, ya que la numeración binaria resultaría en un consumo de mayores recursos por el mayor tamaño del código. Para el operador de reproducción se sugiere que se desechen a la mitad de los menos adaptados. El factor de cruce es de dos y el operador de mutación tiene un índice bajo para evitar una solución prematura (Dede et al., 2011).

La optimización de las estructuras mediante algoritmos matemáticos suele utilizar como función objetivo el obtener un peso mínimo de los materiales. Lo anterior puede resultar en una estructura con bajo peso pero con altos costos de constructibilidad y de costo de producción, por lo que la función objetivo debe de contener una penalización de acuerdo al número de materiales y perfiles distintos que impliquen un aumento de las dificultades de los procesos (Jin et al., 2017).

Dentro de una optimización multi-objetivo (*sizing, topology y configuration*) de una estructura reticular se pueden considerar variables discretas y continuas, donde la clave para el procesamiento está en la codificación de dichas variables de diseño (Noilublao and Bureerat, 2011). Al asignar al código su correspondiente numeración, donde cada número tendrá características discretas y continuas, lo que permitirá el poder desarrollar la función objetivo.

### 2.3 Optimización de la topología

Para considerar los efectos de inestabilidad de las topologías el análisis debe de abarcar un estudio más profundo del comportamiento de éstas. El análisis no lineal de la topología debe ser implementado dentro de su optimización para evitar problemas de inestabilidad geométrica y garantizar que la topología sea funcional (Li and Khandelwal, 2017).

Ante el inminente crecimiento de la sociedad, las necesidades de construcciones civiles están en aumento, por lo que la construcción de elementos modulares, con recursos y propósitos sustentables y prefabricados son una opción más que viable para reducir el impacto ambiental, disminuir costos, obtener tiempos eficientes de obra y optimizar el sector de la construcción (Generalova et al., 2016).

Para crear una estructura modular es importante tener todos los casos o limitaciones que va a tener que cumplir. Y al tener una estructura final se debe de revisar la ventaja de tener una estructura modular que se va a replicar varias veces contra la construcción de varias estructuras diferentes (Dur??n et al., 2012).

Dentro de la optimización de una topología modular hay varios parámetros que se deben de considerar y que son de gran inferencia en el costo y utilidad de la estructura. Dichos parámetros son la evaluación de las conexiones entre los elementos, el análisis de las dimensiones de la estructura junto con sus costos respectivos, las distancias de transporte entre el lugar donde se elabora y el lugar de la obra, los costos por el uso probable de grúas de montaje y los materiales a utilizar (Salama et al., 2015).

Para obtener la mejor topología se utiliza un mecanismo de cuerpo multi rígido, en el cual se deben de evaluar la funcionalidad y sus requerimientos respectivos de la topología, también se debe de evaluar la estructuración adecuada y se concluye con las dimensiones para determinar la geometría final (Wang et al., 2017).

Dentro de la optimización de una topología en un sistema estructural se propone realizarlo mediante el análisis de su comportamiento dinámico, donde destacan el estudio del dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia natural (Zhu et al., 2017).

### 2.4 Efectos del viento en torres reticulares

El viento es uno de los factores de mayor interés en el diseño de torres reticulares, convirtiéndose en la mayoría de los casos en el caso de diseño crítico. Por lo que

dentro de un estudio de una torre de telecomunicaciones, se obtuvo su factor de confiabilidad ante cargas de viento, resultando en un factor muy similar entre el análisis estático y el dinámico, y concluyendo que el diseño ante cargas de viento, con la presión más desfavorable resultan en un diseño conservador (Tessari et al., 2017).

El amortiguamiento de la estructura de torres reticulares no es el único que actúa en el sistema global cuando se consideran las fuerzas de viento, también afecta el amortiguamiento aerodinámico. Éste surge cuando el movimiento relativo entre la torre y el viento es considerable (Holmes, 1996), por lo que ésta fuerza de amortiguamiento por unidad de altura es proporcional a la velocidad de la estructura. Donde el amortiguamiento está en función de la masa modal y de la frecuencia de los modos de vibrar.

### 2.5 Torres centrales receptores de energía termo-solar mediante campo de helióstatos.

Es un sistema dedicado a la captación de energía solar, para que, mediante un sistema termodinámico, transformarla en energía eléctrica. Dicho sistema de generación de energía eléctrica está formado por tres componentes principales:

- El concentrador de energía solar (Helióstatos).
- El receptor de energía que se comporta como caldera del ciclo termodinámico.
- Torre central

Los helióstatos, son un conjunto de espejos planos cuya superficie es reflejante, una estructura de soporte y mecanismos de control. Los cuales se distribuyen ordenadamente sobre el terreno de la planta, cuya orientación es variable dependiendo la posición del sol a lo largo del día. Su función es la de reflejar la

radiación solar directa que incide sobre ellos hacia un receptor de energía en la altura de una torre central. Un esquema de lo anterior mostrado se muestra en la Figura 2-1.

El calor recibido mediante el receptor, es dirigido hacia a un fluido de trabajo (agua, sales fundidas, etc.), el cual transmite dicho calor hacia algún fluido para que se produzca el vapor que generará energía eléctrica mediante el movimiento de una turbina.

La torre central es la encargada de darle soporte al receptor, el cual debe colocarse a una altura considerable con respecto al nivel de los heliostatos, con el fin de asegurar que se minimicen las sombras y los bloqueos de la radiación solar.

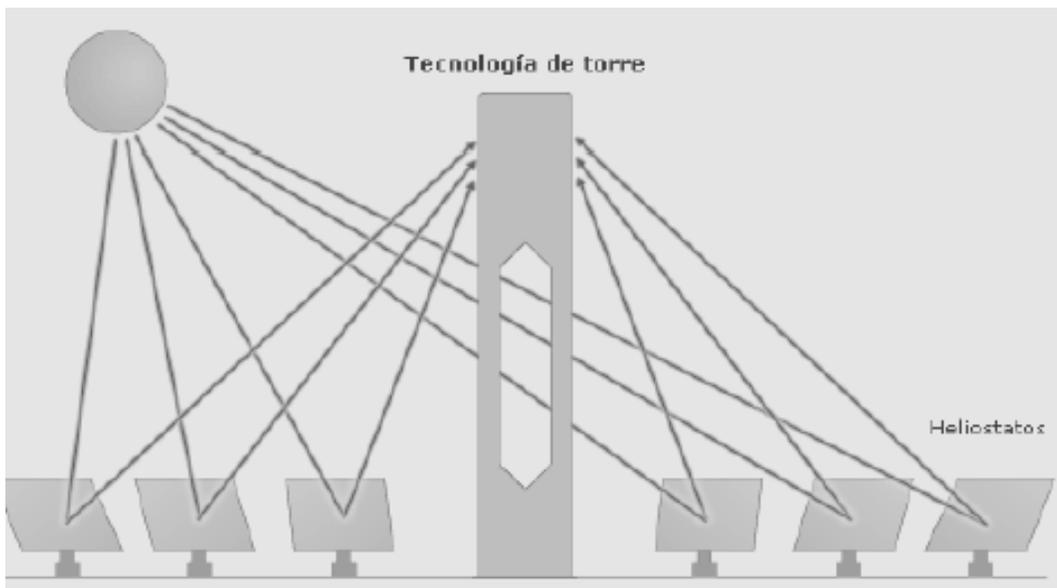


Figura 2-1 Gráfica de planta termo-solar de torre central (Opex-energy,2017)

Las centrales de energía termo-solar son una alternativa para la generación de energía eléctrica mediante el uso de recursos renovables usada alrededor del mundo desde las últimas décadas del siglo pasado. Un resumen de las plantas existentes se aprecia en la Tabla 2-1 y en la Figura 2-2.

Tabla 2-1 Tabla de centrales experimentales de energía termo-solar (Muñoz, 2015)

| Proyecto   | País    | Potencia (MW) | Fluido de Transferencia Térmica | Medio de Almacenamiento | Comienzo Operaciones |
|------------|---------|---------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------|
| SSPS       | España  | 0.5           | Sodio Líquido                   | Sodio                   | 1981                 |
| EURELIOS   | Italia  | 1             | Vapor                           | Sal Nitrato/Agua        | 1981                 |
| SUNSHINE   | Japón   | 1             | Vapor                           | Sal Nitrato/Agua        | 1981                 |
| Solar One  | EEUU    | 10            | Vapor                           | Aceite/Roca             | 1982                 |
| CESA-1     | España  | 1             | Vapor                           | Sal Nitrato             | 1982                 |
| MSEE/Cat B | EEUU    | 1             | Nitrato Fundido                 | Sal Nitrato             | 1983                 |
| THEMIS     | Francia | 2.5           | Sal de Alta Tecnología          | Sal de Alta Tecnología  | 1984                 |
| SPP-5      | Rusia   | 5             | Vapor                           | Agua/Vapor              | 1986                 |
| TSA        | España  | 1             | Aire                            | Cerámico                | 1993                 |
| Solar Two  | EEUU    | 10            | Nitrato Fundido                 | Sal Nitrato             | 1996                 |



Figura 2-2 Mapa de centrales termo-solares en el mundo (google maps)

Ubicada en Sevilla, España, se encuentra el campo de energía solar denominado PS20 (Figura 2-3), en el cual cuenta con un campo con 1,255 heliostatos y una torre concentradora a base de concreto armado de 165 m de altura.



Figura 2-3 Imagen de central termo-solar PS20 (Termosolar,2009)

La central Ivanpah Solar Electric Generating System (Figura 2-4) se encuentra en el desierto del Mojave en California, EUA. La central está conformada por 300,000 espejos reflectores y tres torres de 139 metros de altura. Las torres están estructuradas a base de elementos de acero en un acomodo reticular.



Figura 2-4 Imagen de torre Ivanpah, EUA (Terrain, 2014)

La planta de generación de energía termo-solar Eurelios, en Italia (Figura 2-5), cuenta con una superficie de 6200 m<sup>2</sup> y 182 helióstatos montados. La torre central de acero a base de una estructuración reticular cuenta con una altura de 55 metros (Gretz, 1981).



Figura 2-5 Torre Eureka, Italia (Archive Parodi,1982).

En México, las investigaciones en materia de generación de energía por medio de recursos renovables son llevada a cabo por el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la Universidad Nacional Autónoma de México. En asociación con el CIE la investigación en el país se hace en conjunto con las Universidades y centros especializados. Como ejemplos se pueden ver las plantas experimentales en Sonora (Figura 2-6) y en Hidalgo (Figura 2-7).



Figura 2-6 Torre concentradora de campo experimental, Sonora México. Gaceta USON#265



Figura 2-7 Imagen de torre concentradora de campo experimental en Hidalgo, México.

(Fotografía en campo).

La Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) tiene una participación activa en el tema de obtención de energías renovables. Dentro de su participación en este rubro se desarrolló el proyecto de la Construcción de un Campo de Helióstatos de Torre Central para la obtención de energía termo-solar. Este trabajo es parte de dicho proyecto general, por lo que los resultados producidos iban a ser parte del diseño final de la torre de concentración final.

Con motivo de que los tiempos del desarrollo de esta tesis y los tiempos del financiamiento federal y de la UAQ no coincidían, se desarrolló, por parte del autor de este trabajo junto con un equipo multidisciplinario de maestros y alumnos de la UAQ, la elaboración del proyecto estructural de dicha torre central (estructura general, estructura de escaleras de acceso y cimentación), proyecto estructural independiente a lo desarrollado en la tesis.

En las Figura 2-8 y Figura 2-9 se muestran fotos tomadas de la torre de acero ya montada en sitio.

El diseño de la torre se realizó mediante el programa SAP2000, y los perfiles elegidos fueron parte del catálogo de perfiles existentes que tenía la empresa

COMEMSA (Empresa encargada de la elaboración de las piezas). La torre tiene una altura de 30 m, una base hexagonal con dimensión máxima en terreno de 6 m. La estructura es a base de marcos de acero contraventeados. La cimentación es a base de losa de cimentación.



Figura 2-8 Campo de Helióstatos perteneciente a la UAQ



Figura 2-9 Fotos de torre de Heliostatós de la UAQ. A) Conexiones tipo en todos los nodos.

B) Torre completa.

CAPITULO 3

**3. MARCO TEÓRICO**

---

3.1 Presiones de viento

Como una forma certera y ampliamente desarrollada de la obtención de las presiones de viento sobre cierto tipo de estructuras se tiene el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad para diseño por viento versión 2008 (MDOC CFE VIENTO2008) (CFE, 2008).

### 3.1.1 Clasificación de las estructuras según su importancia

Las clasificaciones que marca el manual son las siguientes:

- Grupo A: Estructuras con una importancia alta, donde la falta de las mismas provoque una pérdida significativa de vidas y/o servicios indispensables para la atención de la población.
- Grupo B: Estructuras con una importancia media, donde la falta de las mismas tenga un impacto no de significancia vital en la población.
- Grupo C: Estructuras con una importancia baja, donde las mismas sean temporales o cuya pérdida no afecte a la población.

### 3.1.2 Clasificación de las estructuras según su respuesta al viento

Dependiendo el comportamiento del viento sobre la estructura se determina la siguiente clasificación:

- Tipo 1: Son estructuras que por su configuración y características son poco sensibles a los efectos dinámicos y a las ráfagas del viento. Donde tienen una relación de esbeltez es menor o igual a cinco y tienen un periodo fundamental de vibración del primer modo menor o igual que un segundo.
- Tipo 2: Son estructuras sensibles a las ráfagas de viento y a sus efectos dinámicos. Donde tienen una relación de esbeltez mayor que cinco y/o un periodo de vibrar mayor de un segundo.

- Tipo 3: Son un subgrupo del tipo 2, donde las oscilaciones que presenta son altas, donde se incluyen construcciones cilíndricas o prismáticos esbeltos.
- Tipo 4: Son las estructuras que presentan problemas aerodinámicos inestables. Ejemplos de ellos son las líneas de transmisión, los elementos colgantes, entre otros.

Por la estructuración de la estructura de la torre de helióstatos, dependiendo de sus características individuales se pudiera clasificar como tipo 1 o tipo 2.

### 3.1.3 Presión dinámica de base

Esta presión depende de las características del sitio donde va a estar la estructura y se obtiene mediante la Ecuación 3-1.

$$q_z = 0.0048 G V_D^2 \left( \text{en } \frac{kg}{m^2} \right) \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Donde:

$q_z$  = Presión dinámica de base

$G$  = Factor de corrección por temperatura y por altura sobre el nivel de mar

$V_D$  = velocidad básica de diseño

La Velocidad básica de diseño depende de la velocidad regional (obtenida mediante los mapas de isotacas y sus periodos de retorno acorde a su clasificación por importancia), de la topografía local y de la exposición de la estructura de acuerdo a su entorno.

### 3.1.4 Análisis Estático

Este análisis aplica para estructuras cuyo efecto del viento se clasifique en el tipo uno. Para el caso de la torre de helióstatos se obtendrán las fuerzas de acuerdo al apartado del manual "4.3.2.10.3 Torres de celosía aisladas". Las fuerzas a aplicarse se determinan con la Ecuación 3-2.

$$F_{at} = C_{at} A_{At} q_z$$

Ecuación 3-2

Donde:

Fat: Fuerza de arrastre puntual aplicada en la dirección del viento.

Cat: Coeficiente de arrastre.

Aat: Área de afectación del viento sobre la cara de los miembros.

qz: Presión dinámica de base

Para torres de sección cuadrada (se usará este inciso al no existir en el manual la forma hexagonal), con miembros de lados planos (HSS y PTR) y con una relación de solidez de la cara frontal mayor de 0.5, se consideran coeficientes de arrastre de 1.8 sobre una cara y de 2.3 sobre una esquina.

### 3.1.5 Análisis Dinámico

Este análisis se realiza para estructuras cuyos efectos del viento se clasifiquen en el tipo 2. Para el caso de la torre de helióstatos se utiliza el apartado “4.4.5. Fuerza dinámica equivalente en la dirección del viento,  $F_{eq}$ , para torres de celosía autosoportadas”. Donde las fuerzas de viento se obtienen mediante la Ecuación 3-3.

$$F_{eq} = C_{at} A_{ref} q_z F_{AD}$$

Ecuación 3-3

Donde:

Feq: Fuerza dinámica equivalente aplicada en la dirección del viento.

Cat: Coeficiente de arrastre.

Aat: Área de afectación del viento sobre la cara de los miembros.

qz: Presión dinámica de base

Fad: Factor de amplificación dinámica.

Como se puede observar, la Ecuación 3-3 es solo la multiplicación del factor de amplificación dinámica por la Ecuación 3-2. El factor de amplificación dinámica dependerá de las siguientes características:

- Factor de exposición dinámico
- Velocidad de diseño dinámica
- Un factor de corrección de masas que se considera unitario al obtener todos los parámetros mediante un análisis mediante el método de algoritmos genéticos.
- Constantes correctivas de la forma modal.
- Longitud de escala de la turbulencia
- Factor de respuesta de fondo
- Densidad de potencia
- Funciones de admitancia
- Factor de respuesta en resonancia
- Factor pico
- Índice de turbulencia

### 3.2 Diseño de los elementos

El diseño de los elementos será regido por las especificaciones que se marcan en el “Reglamento de Construcción del Distrito Federal en sus Normas Técnicas Complementarias versión 2017” (RCDF NTC2017) (Administración Pública de la Ciudad de México, 2017).

#### 3.2.1 Elementos a tensión

En los elementos cuyo comportamiento este regido por cargas axiales de tensión, su resistencia a dichas cargas será determinada mediante la Ecuación 3-4.

$$R_t = Fr_{tensión} A_{sección} F_y \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Donde:

$R_t$ : Fuerza resistente ante cargas de tensión.

$Fr_{tensión}$ : Factor de resistencia del elemento ante cargas de tensión.

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

$F_y$ : Esfuerzo de fluencia del material

### 3.2.2 Elementos a compresión

En los elementos cuyo comportamiento este regido por cargas axiales de compresión, su resistencia a dichas cargas será determinada mediante la Ecuación 3-5. Dicha ecuación podrá ser empleada para revisar el estado de pandeo por flexión de miembros rectangulares huecos sin elementos esbeltos.

$$R_c = Fr_{compresión} A_{sección} F_y \lambda \quad \text{Ecuación 3-5}$$

Donde:

$R_c$ : Fuerza resistente ante cargas de compresión.

$Fr_{compresión}$ : Factor de resistencia del elemento ante cargas de compresión.

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

$F_y$ : Esfuerzo de fluencia del material

$\lambda$ : Factor de reducción por esbeltez

El factor de reducción por esbeltez depende de la relación de esbeltez máxima del elemento a compresión, lo que se puede mostrar en la Ecuación 3-6.

$$\lambda = \left[ 1 + \left( \frac{F_y}{F_e} \right)^n \right]^{-\frac{1}{n}} \quad F_e = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{KL}{r} \right)^2} \quad \text{Ecuación 3-6}$$

Donde:

F<sub>y</sub>: Esfuerzo de fluencia del material.

F<sub>e</sub>: Esfuerzo crítico de Euler.

n: Coeficiente adimensional (n=1.4 para secciones PTR y HSS).

E: Módulo de elasticidad del acero.

KL/r: Relación de esbeltez máxima de la columna

K: coeficiente adimensional de longitud de pandeo (se usará K=1).

L: Longitud del elemento a revisar.

r: Radio de giro menor de la sección.

### 3.2.3 Elementos a flexión

Para elementos tubulares cuadrados o rectangulares laminados (HSS) con patines y almas compactas solo aplica la revisión por fluencia. Si las secciones son del tipo 3, es decir, con patines no compactos, también se revisará la condición de pandeo local del patín comprimido. El valor final utilizado como resistencia será el menor de las dos revisiones antes mencionadas.

Para la revisión por fluencia se utiliza la Ecuación 3-7.

$$M_n = M_p = F_y Z \quad \text{Ecuación 3-7}$$

Donde:

M<sub>n</sub>: Momento resistente por comportamiento a flexión.

$F_y$ : Esfuerzo de fluencia del material

$Z$ : Módulo de sección plástico alrededor del eje de flexión.

Para la revisión del pandeo local del patín comprimido se utiliza la Ecuación 3-8.

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S) \left( 3.57 \frac{b}{t_p} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 4 \right) \leq M_p \quad \text{Ecuación 3-8}$$

Donde:

$M_p$ : Momento plástico resistente de la sección.

$F_y$ : Esfuerzo de fluencia del material.

$S$ : Módulo de sección elástico alrededor del eje de flexión.

$b$ : Ancho del patín.

$t_p$ : Espesor del patín.

$E$ : Módulo de elasticidad del acero.

### 3.2.4 Elementos a cortante

Para elementos tubulares cuadrados o rectangulares laminados (HSS) con patines y almas compactas se calcula la resistencia a cortante en el alma con la Ecuación 3-9.

$$V_R = F_{r_{cortante}} 0.6 A_a F_y C_v \quad A_a = 2 h t$$

$$\text{Cuando } \frac{h}{t} \leq 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \quad C_v = 1.0 \quad \text{Ecuación 3-9}$$

Donde:

$V_R$ : Fuerza resistente ante esfuerzos cortantes.

$F_{r\text{cortante}}$ : Factor de resistencia del elemento ante esfuerzos cortantes.

$F_y$ : Esfuerzo de fluencia del material

$A_a$ : Área del alma a cortante

$h$ : Peralte del alma a cortante ( $h_{\text{ext}} - 3 \cdot t_{\text{alma}}$ )

$t$ : espesor del alma

$k_v$ : Para sección rectangulares huecas  $k_v=5$

$E$ : Módulo de elasticidad del acero.

### 3.2.5 Elementos a flexo-compresión

Para elementos tubulares cuadrados o rectangulares laminados (HSS) no esbeltos, la interacción entre fuerzas de flexión y de fuerzas de axiales de compresión está regida por la Ecuación 3-10.

$$\frac{P_U}{P_C} + \frac{0.85 M u_x}{M n_x} + \frac{0.85 M u_y}{M n_y} \leq 1.0 \quad \text{Ecuación 3-10}$$

Donde:

$P_U$ : Fuerza axial de compresión producto de cargas de diseño.

$P_C$ : Fuerza resistente ante esfuerzos de compresión.

$M_{u_x}$ : Momento actuante en X producto de cargas de diseño.

$M_{n_x}$ : Momento resistente ante esfuerzos de flexión en X.

$M_{u_y}$ : Momento actuante en Y producto de cargas de diseño.

Mny: Momento resistente ante esfuerzos de flexión en X.

### 3.2.6 Elementos a flexo-tensión

Para elementos tubulares cuadrados o rectangulares laminados (HSS), la interacción entre fuerzas de flexión y de fuerzas de axiales de tensión está regida por la Ecuación 3-11.

$$\frac{P_U}{P_T} + \frac{Mu_x}{Mn_x} + \frac{Mu_y}{Mn_y} \leq 1.0 \quad \text{Ecuación 3-11}$$

Donde:

P<sub>U</sub>: Fuerza axial de compresión producto de cargas de diseño.

P<sub>T</sub>: Fuerza resistente ante esfuerzos de tensión.

M<sub>Ux</sub>: Momento actuante en X producto de cargas de diseño.

M<sub>nx</sub>: Momento resistente ante esfuerzos de flexión en X.

M<sub>Uy</sub>: Momento actuante en Y producto de cargas de diseño.

M<sub>ny</sub>: Momento resistente ante esfuerzos de flexión en Y.

### 3.2.7 Elementos a flexo-cortante

Para elementos tubulares cuadrados o rectangulares laminados (HSS), la interacción entre fuerzas de flexión y de fuerzas de axiales de tensión está regida por la Ecuación 3-12.

$$\left(\frac{V_U}{V_R}\right)^2 + \frac{Mu_x}{Mn_x} \leq 1.0 \quad \text{Ecuación 3-12}$$

Donde:

V<sub>U</sub>: Fuerza cortante actuante producto de cargas de diseño.

$V_R$ : Fuerza resistente ante esfuerzos cortantes.

$M_{ux}$ : Momento actuante en eje principal a flexión.

$M_{nx}$ : Momento resistente en eje principal a flexión.

### 3.3 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Los AG son capaces de crear soluciones para problemas de la vida real, evolucionando los resultados parciales hasta obtener los valores óptimos.

Por las teorías evolutivas los genes de los individuos mejor adaptados se propagarán en sucesivas generaciones hacia un número de individuos con las mejores características, creando "superindividuos". Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayores serán sus probabilidades de que sus genes puedan conservarse en la reproducción.

El campo de aplicación de los AG es la solución de todos los problemas que no tengan técnicas especializadas, o en aquellos que, si las tengas, las mejora mediante una aplicación híbrida.

A continuación, se muestra de forma general el algoritmo genético simple o canónico.

```
BEGIN           /Com, Proceso Algoritmo genético
POB_INICIAL     /Com, Se crea la primera generación
FUNC_OBJ       /Com, Se aplica la función objetivo
DO, GEN1, CONDICION, THEN
                /COM, Se crea el ciclo iterativo
```

|              |  |
|--------------|--|
| SELEC_IND    | /Com, Se seleccionan los mejores           |
| REPRO_PADRES | /Com, Se combinan los padres               |
| MUT_HIJOS    | /Com, Se produce la mutación               |
| FUNC_OBJ     | /Com, Se aplica la función objetivo        |
| CONDICION    | /Com, Evaluar si se ha obtenido el mejor   |
|              | /Com, Si se encuentra la mejor se finaliza |
|              | /Com, Si no, se continua el ciclo.         |

END\_DO

/Com, Se obtiene el individuo mas apto

Todas las posibles opciones se llamarán individuos, que son un conjunto de características o parámetros (genes), los cuales están formados por valores (cromosomas). Se crea una función para determinar la adaptación de cada individuo. Mediante una selección basada en la ruleta sesgada los individuos mejor adaptados se escogerán varias veces y los menos adaptados tendrán por máximo una selección o ninguna.

Otro método para la selección de los individuos radica en la elección de un porcentaje de individuos con características superiores de acuerdo a lo definido en la función objetivo. A dichos individuos se les replicará un número ya establecido. Para completar la población que se va a reproducir, se le adicionarán a los individuos superiores y sus clones los individuos de la población anterior, restando los individuos con peores características.

Para obtener la nueva generación se utilizan los individuos, padres, antes obtenidos, los cuales se pueden duplicar en la nueva generación o se pueden cruzar (combinando sus genes) en un porcentaje del 50 al 100% de la nueva generación de individuos, hijos. En dicho proceso se ordenan los padres del mejor al peor según la

función objetivo y se dividen en dos grupos: los mejores y los de menores características. Se reproducen los padres de un grupo con otro procurando que exista una reproducción monógama.

En la cruce de genes, se selecciona el número de genes que se transmitirán a los hijos por parte de cada padre. Con esto se busca que los mejores genes de un padre se combinen con los mejores del otro para en un ciclo final obtener al individuo más adaptado.

Los hijos son sometidos a un proceso de mutación, en el cual se cambia de forma aleatoria alguno de los cromosomas de los genes, esto para garantizar que el proceso de optimización cubra todo el espacio de búsqueda. Se asigna un porcentaje de mutación de acuerdo al total de cromosomas del proceso de reproducción. Un porcentaje bajo es recomendado solo para eliminar mínimos locales y procurar que existan cambios de generación en generación. Un porcentaje alto solo ocasiona que exista pérdida de información genética y nunca se llegue a la generación con mayor adaptación.

Se siguen obteniendo nuevas generaciones hasta que la solución converja, lo que sucede cuando un porcentaje previamente establecido de individuos cuentan con uno o varios cromosomas iguales. Con forme las generaciones avanzan los resultados van convergiendo rumbo a la solución óptima. La solución se puede observar en la Figura 3-1.

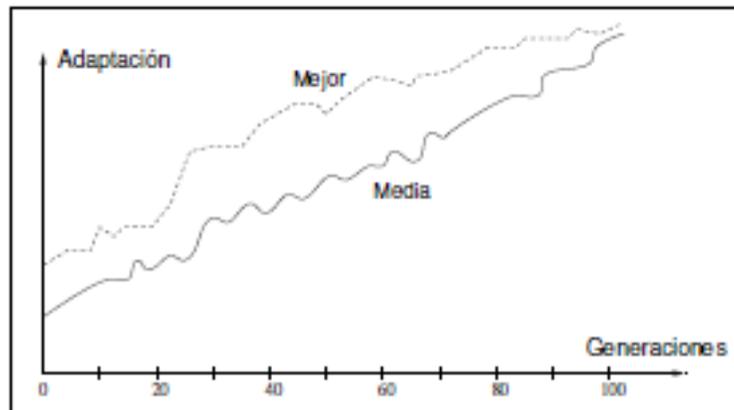


Figura 3-1 Gráfica de convergencia de la solución óptima (Moujahid, et.al.,2008)

#### 3.4 Proceso de diseño estructural

El análisis estructural significa la separación de la estructura en sus elementos constitutivos y la determinación de efecto de las cargas aplicadas a la estructura en cada elemento (González Cuevas, 2002).

En diseño estructural es el encargado de determinar la forma, dimensiones y características propias de una estructura, teniendo como objetivo que la estructura resista las fuerzas a las que va a estar sometida sin colapso ni mal comportamiento. Donde la estructura debe cumplir no solo con las funciones que está destinada a desempeñar, también debe resistir las distintas solicitaciones que se le presenten a través de todas las etapas de su existencia.

Un buen criterio estructural es parte del proceso creativo del diseño, donde no solo se contempla la intuición y los conocimientos prácticos, si no también debe estar fundamentado con los conocimientos teóricos.

De forma general el proceso del diseño estructural se realiza por etapas, donde directa o indirectamente se aplica cada una de ellas. Resumiéndolas se puede nombrar la estructuración, el análisis y el dimensionamiento.

En la estructuración se desarrolla la parte creativa del diseño, donde se elegirá el material y tipo de secciones o perfiles a usar, así como sus acomodos y características esenciales. Una buena estructuración concluye en un diseño óptimo y con un buen comportamiento durante toda su vida útil.

En el análisis se conoce la respuesta de los elementos de la estructura ante las cargas de diseño, es decir, se conoce su comportamiento global y local. Esto se logra mediante la idealización de la estructura mediante un modelo teórico que ejemplifique el comportamiento de la estructura, pero que se desarrolle de forma práctica y correcta. Para conocer la respuesta de la estructura se define y aplican las fuerzas actuantes sobre ésta, las cuales son las que la estructura deberá resistir en sus distintas etapas de vida útil.

Conociendo la respuesta de los elementos se procede al dimensionamiento, en éste se verifica si los elementos propuestos cumplen con las solicitaciones de las cargas, y se ratifican si cumplen o cambian si no lo hacen.

El obtener una solución utilizando los materiales y perfiles disponibles, procesos constructivos idóneos al proyecto y la inclusión de las restricciones impuestas por el cliente, son parte de los aspectos que se deben de considerar en el diseño estructural.

Como parte del diseño se debe de definir claramente las acciones y las respuestas que interactúan en el proyecto estructural. Las acciones se definen como las cargas o fuerzas que actúan sobre la estructura, es decir, todos los agentes externos que provocan esfuerzos y deformaciones sobre ésta. Las acciones pueden ser producto de cargas gravitacionales (cargas vivas y muertas), o fuerzas accidentales (viento, sismo, granizo, etc), efectos del suelo (empujes, hundimientos, expansiones), corrosiones, efectos de temperatura, entre otros. En base a los

reglamentos se pueden obtener los valores de dichas cargas dependiente de claros, alturas, zonificación y demás características propias de cada estructura.

La respuesta es la suma del conjunto de parámetros que resultan producto de las acciones, es decir, la respuesta son los esfuerzos, las fuerzas axiales, momentos flexionantes, fuerzas cortantes, desplazamientos, rotaciones y demás. Se debe de cuidar que los elementos y todo el conjunto de elementos resistan la respuesta de las acciones, donde se especifican factores de reducción de resistencias y criterios de diseño en los reglamentos de construcción.

En base a lo anterior, se debe de evitar pasar de un estado límite, el cual es el margen en que la estructura cuenta con una respuesta inaceptable.

### 3.5 Método de elementos finitos

#### 3.5.1 Descripción general

El método de elementos finitos es un procedimiento numérico para analizar estructuras y el continuo (Cook et al., 1989). El problema puede considerarse análisis de esfuerzos, transferencia de calor, movimiento de flujos, lubricación, campos eléctricos y magnéticos, entre otros. El proceso de este método produce varias ecuaciones algebraicas simultáneamente, las cuales son generadas y resueltas en una computadora digital.

#### 3.5.2 Elemento finito "BEAM188"

El elemento finito "Beam188" es utilizado para modelar estructuras tipo viga. El elemento está basado en la teoría de vigas de Timoshenko el cual incluye los efectos de deformación por cortante (SAS IP Inc, 2013).

El elemento incluye términos de esfuerzos producto de la esbeltez, considerados por default en cualquier análisis con amplias deflexiones. En la Figura 3-2 se muestra el esquema del elemento finito.

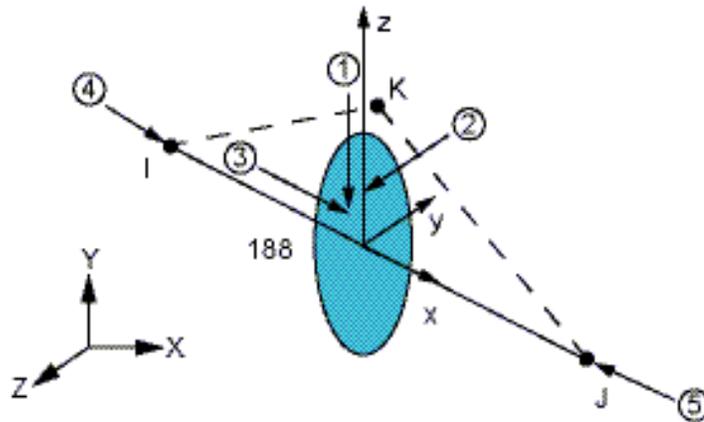


Figura 3-2 Elemento Finito "Beam188" (SAS IP Inc, 2013).

Consideraciones y restricciones del elemento:

- La viga no debe de tener longitud cero.
- Por default, el efecto de la restricción de deformación se considera insignificante.
- La falla de la sección transversal no se tiene en cuenta.
- Los grados de libertad rotacionales no están incluidos en la matriz de masas agrupada si existe un desfase.
- El elemento trabaja mejor con una solución completa Newton-Raphson.
- Solo vigas moderadamente esbeltas pueden ser analizada.
- El esfuerzo de rigidez está siempre incluido en el análisis geométrico no lineal.
- Cuando el elemento está asociado con secciones de vigas generales no lineales requieren restricciones adicionales.

### 3.5.3 Elemento finito "LINK180"

El elemento finito "Link180" es un elemento barra 3-D que es utilizado frecuentemente en aplicaciones de ingeniería. El elemento puede ser usado para modelar armaduras, cables, barras, resortes, y elementos similares. El elemento tiene un comportamiento uniaxial a flexión-compresión con tres grados de libertad en cada nodo: desplazamiento en las direcciones X, Y y Z. El elemento contempla además las opciones de solo tensión o solo compresión (SAS IP Inc, 2013). Dicho elemento se observa en la Figura 3-3.

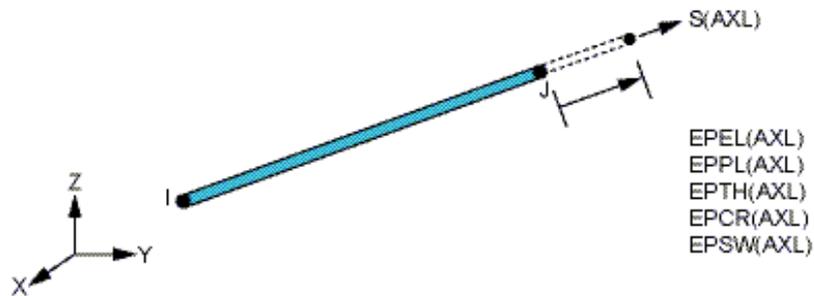


Figura 3-3 Elemento Finito "Link180" (SAS IP Inc, 2013)

Consideraciones y restricciones del elemento:

- El elemento barra asume una barra recta, axialmente cargada en el nodo final, y propiedades uniformes en toda su longitud.
- La longitud de la barra debe ser mayor a cero, de tal forma que los nodos i y j no coincidan.
- El área de sección transversal debe ser mayor que cero.
- Se asume que la temperatura varía linealmente a través de toda la longitud de la barra.
- El desplazamiento de las funciones de forma implican un esfuerzo uniforme en la barra.

- Los esfuerzos de rigidez son siempre incluidos en un análisis no lineal. Se pueden incluir esfuerzos de presfuerzo.
- Para simular las opciones de solo compresión o solo tensión, un proceso de solución mediante un análisis no lineal es necesario.

### 3.5.4 ANSYS y su programación APDL

Fundada en 1970, ANSYS es una compañía con cerca de 3,000 profesionales e ingenieros expertos en análisis de elemento finito, dinámica de fluidos computacionales, electrónicos, semiconductores, software embebido, y diseño optimizado.

Es un software de simulación ingenieril, el cual está desarrollado para simular elementos mediante la teoría de elemento finito para estructuras y de volúmenes finitos para fluidos.

ANSYS Parametric Design Language (APDL) es un lenguaje de programación usado para automatizar y modificar tareas en el programa ANSYS. El APDL combina comandos con ANSYS con funciones del lenguaje FORTRAN.

Con el APDL se pueden crear modelos paramétricos que realicen una rápida evaluación de cambios de diseño, crean macros para automatizar procesos o para repetición de tareas, importa y exporta información a documentos externos, trabaja con operaciones matriciales, vectoriales y escalares, crea menús y herramientas del programa.

CAPITULO 4

**4. METODOLOGIA**

---

El proceso de obtención de los objetivos del trabajo será desarrollado mediante un esquema de trabajo cíclico en varias de sus actividades. De forma general las actividades a realizarse en un principio, se muestran en la Figura 4-1.

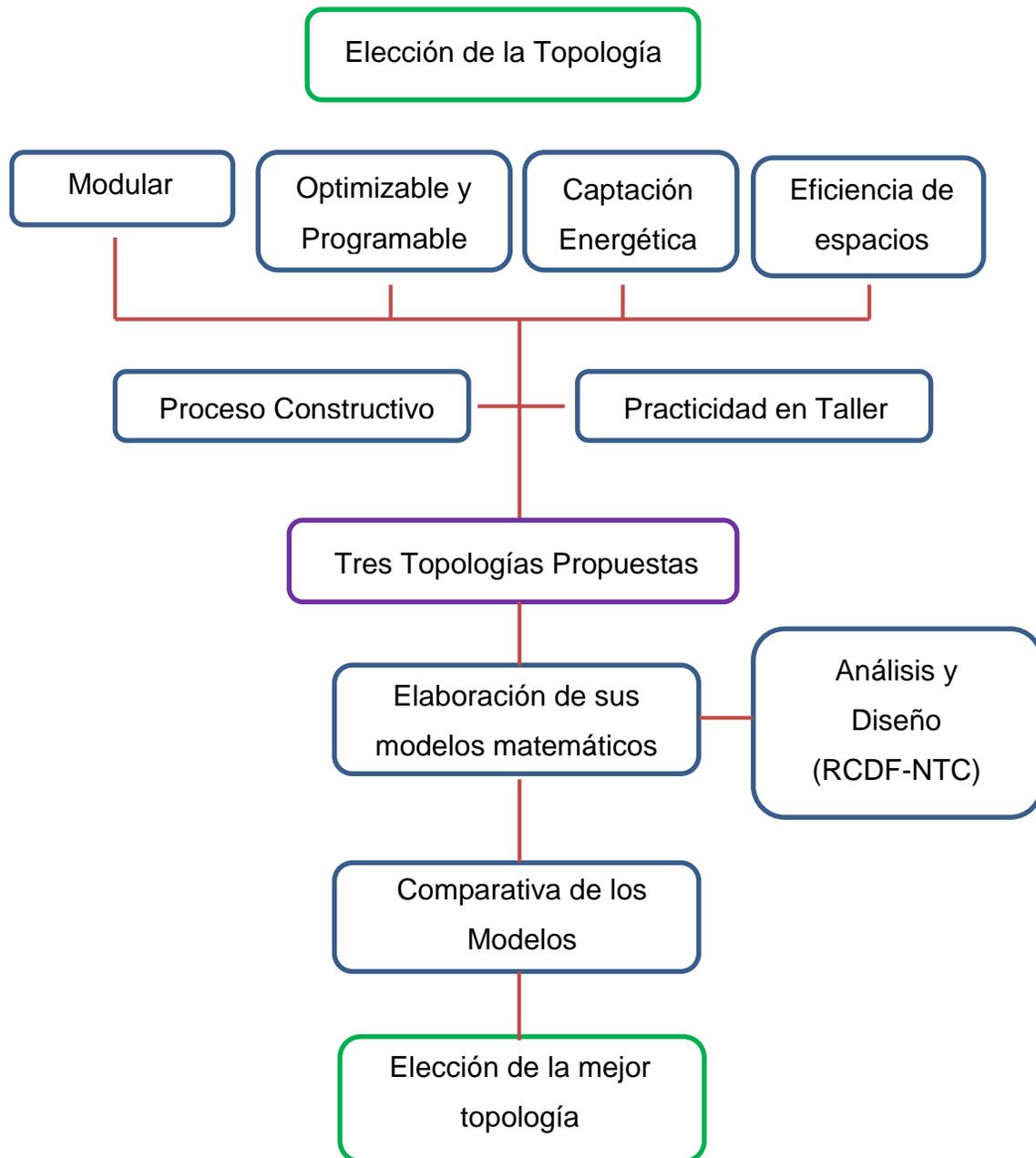


Figura 4-1 Elección de la mejor topología

Teniendo la mejor topología se elaborará un algoritmo para la torre de heliostatos en el lenguaje Algoritmo de la Torre de Heliostatos APDL (ANSYS

Parametric Design Language) del programa ANSYS. En dicho algoritmo se ingresará la información general de la torre (Altura, área libre de la base y ubicación) para posteriormente con el algoritmo se elabore un modelo matemático de la torre. Para las variables aplicables en el trabajo, el algoritmo tomará la información de cada individuo del código genético (perfil en columna, en vigas, etc). Posteriormente se obtendrán los valores de sus elementos mecánicos producto de la interacción de fuerzas actuantes. Lo anterior se puede observar en la Figura 4-2.

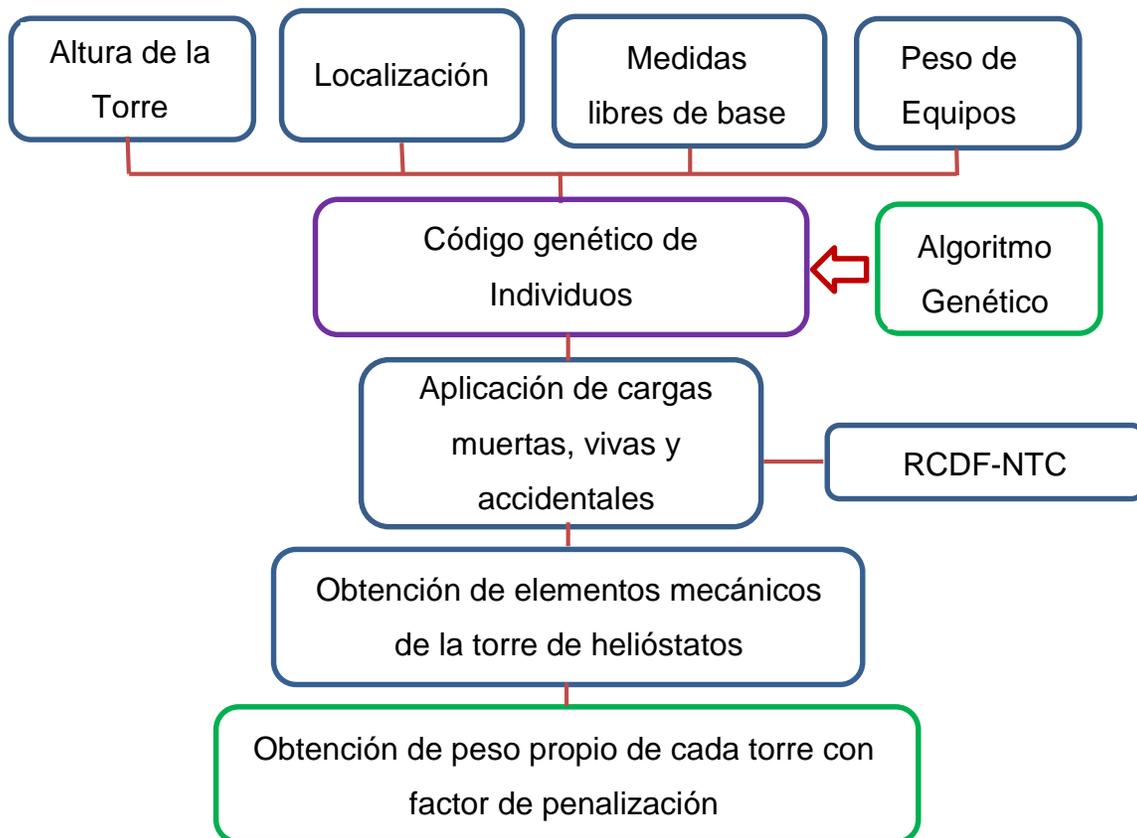


Figura 4-2 Algoritmo de la Torre de Helióstatos

El proceso de optimización se realizará mediante un algoritmo genético (Figura 4-3). Donde primero se establecerán las variables o genes junto con sus respectivos cromosomas, posteriormente se elegirá el tamaño de población y se creará la primera generación de individuos. La función objetivo

y su penalización se realizará mediante el algoritmo realizado anteriormente en APDL. Con la información de cada individuo se continuará con el proceso de selección, reproducción y mutación. Y se repetirán los pasos hasta obtener al individuo con mejores características.

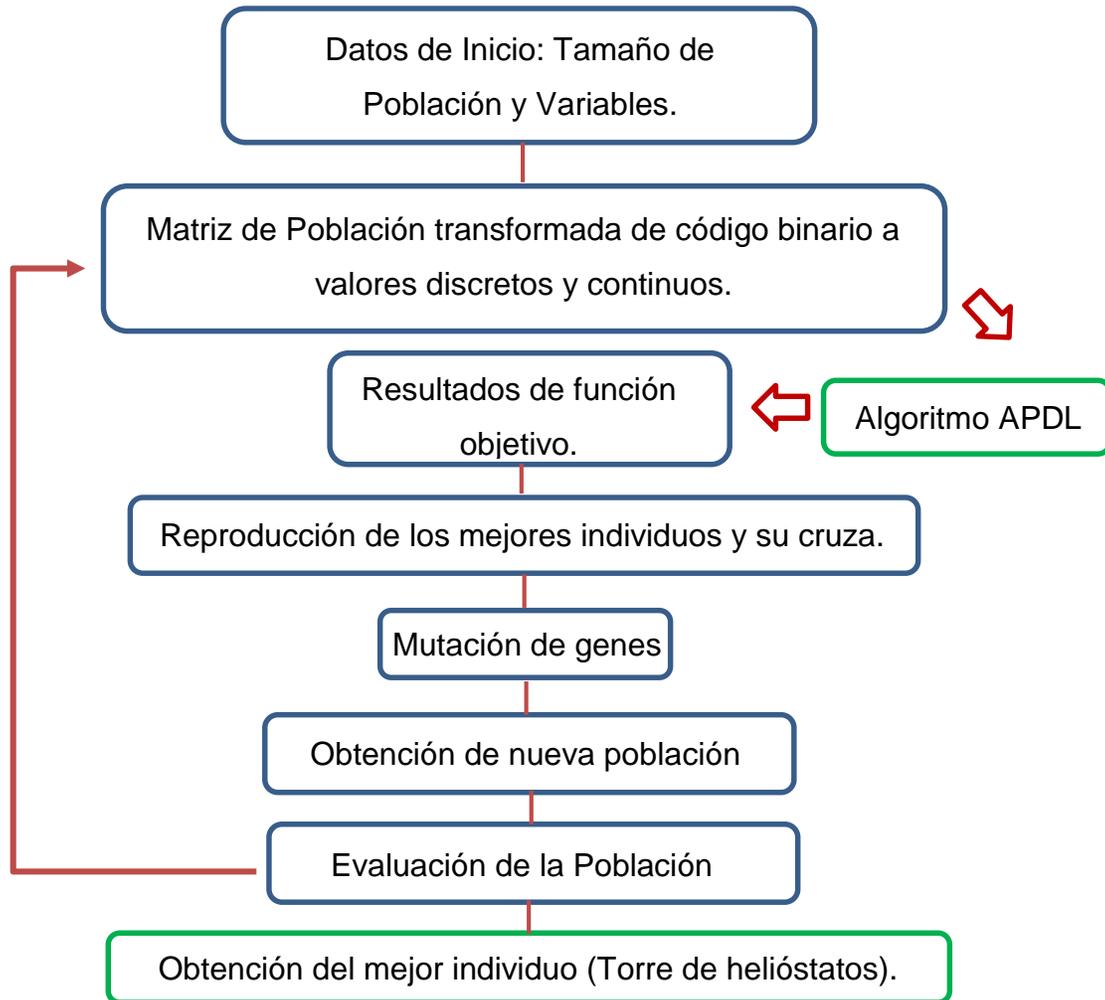


Figura 4-3 Algoritmo de código Genético

Los tres procesos anteriores se pueden resumir en el diagrama mostrado en la Figura 4-4.



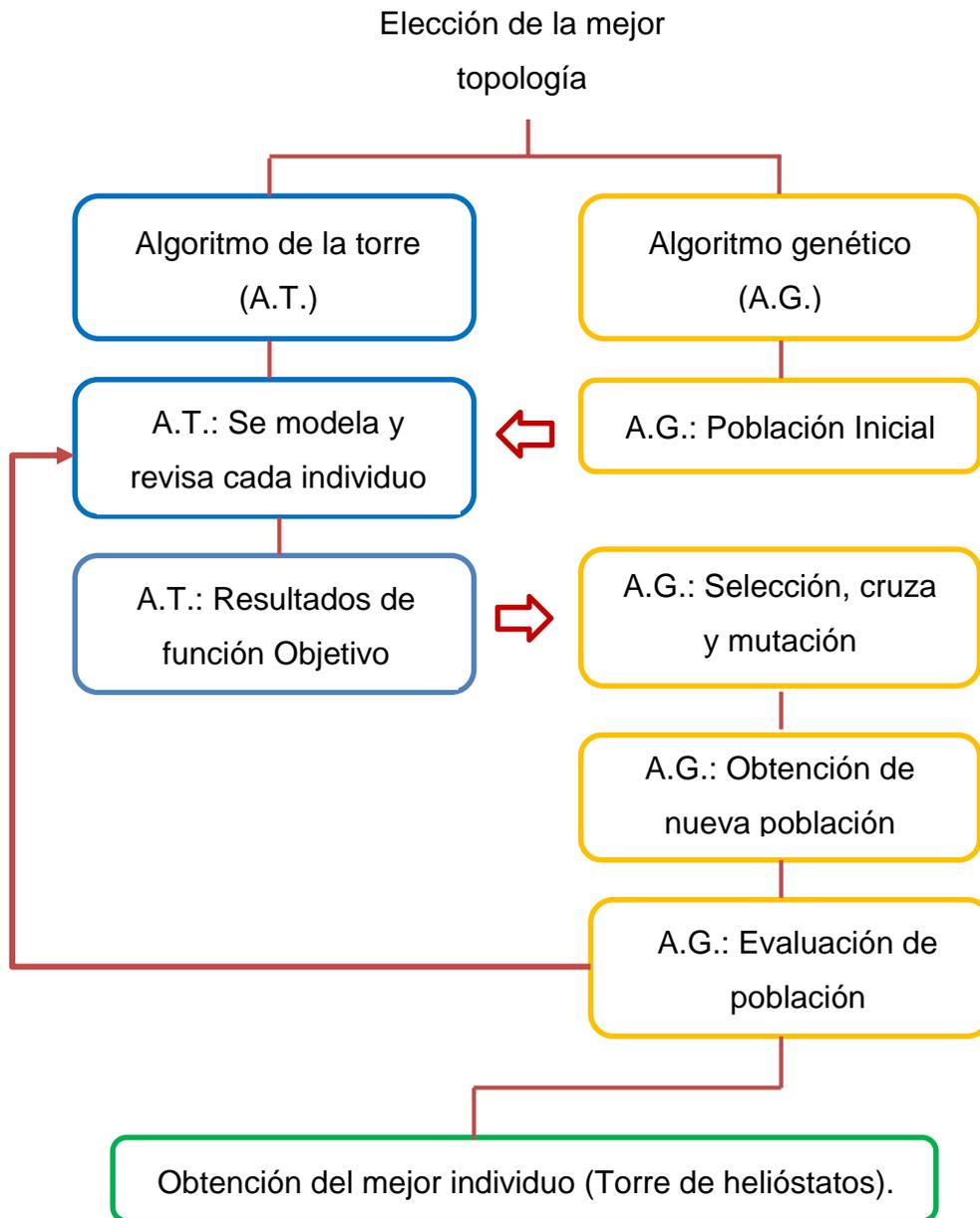


Figura 4-4 Resumen del Proceso General

CAPITULO 5

**5. ELECCION DE LA  
TOPOLOGIA**

---

5.1 Características de la forma estructural

La optimización estructural a realizar en la torre estará basada en tres factores: la optimización de las secciones de los miembros, de la localización de los nodos y la optimización de la forma estructural (topología).

En el desarrollo de este proyecto para obtener un resultado final con una alta eficiencia no solo en peso, sino también en factores de utilidad y de optimización de procesos y tiempos constructivos, se procederá a obtener una forma estructural pre-optimizada antes de la aplicación de un algoritmo evolutivo como es el genético.

En base a lo anterior se propondrán, conforme a criterios y características descritas a continuación, tres topologías distintas para su posterior comparativa entre ellas y obtener la mejor para ser sujeta al algoritmo de optimización de sus secciones transversales de elementos y de la localización de sus nodos.

### 5.1.1 Análisis de la eficiencia energética de la forma estructural

Las distintas torres existentes en el mundo tienen como un factor en la elección de su forma estructural, la de propiciar que el ángulo de los rayos solares (provenientes de los helióstatos) respecto al plano de los receptores de la torre formen un ángulo  $\theta$  de 90 grados. Al tener un ángulo de 90 grados no existe componente en X que sea reflejada, por lo que la captación de la energía es máxima. Al ser el ángulo distinto de 90° la componente en X se va incrementando, por lo que la captación de energía va disminuyendo. La determinación del ángulo  $\theta$  antes mencionado se esquematiza en la Figura 5-1. En todas las figuras de este subcapítulo se representan con flechas sin relleno la dirección de los rayos solares con  $\theta$  de 90 grados, y con relleno las demás.

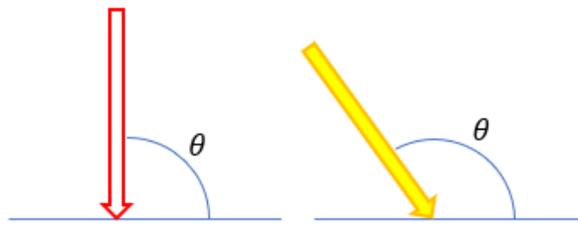


Figura 5-1 Posición de la energía solar sobre el receptor

Considerando una forma estructural cuadrada o rectangular, si la torre se encuentra en un costado del campo de helióstatos solo una de sus caras es la que recibe la energía proveniente de los helióstatos con ángulo theta de 90 grados, pero en el extremo de la cara se va a tener un menor ángulo respecto al rayo solar con la cara provocando pérdidas por reflexión. Si la posición de la torre es en el centro del campo de helióstatos se tiene una mayor captación de energía, al tener cuatro caras que pueden captar energía solar con ángulo theta de 90 grados, pero igual entre mas cercanía a los extremos se tendrán más pérdidas de energía. La situación antes descrita se esquematiza en la Figura 5-2.

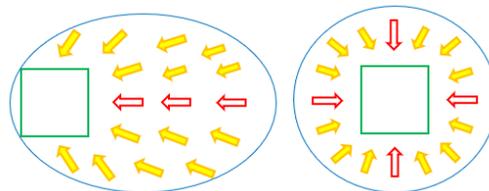


Figura 5-2 Distribución de energía en topología cuadrada

Sin importar la posición de la torre respecto al campo de helióstatos, la forma más eficiente es la circular. La eficiencia antes mencionada se puede observar en la Figura 5-3.

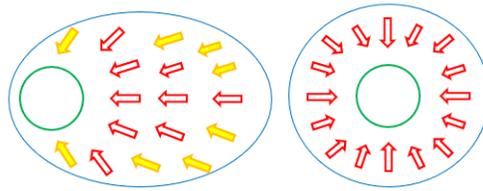


Figura 5-3 Distribución de energía en topología circular

Pero lograr esta forma mediante una estructuración reticular de acero es más complicado, esto debido a la alta cantidad de conexiones que se tendrían que hacer o por estar rolando el acero para que tome la curvatura deseada.

La topología más práctica por eficiencia que puede tomar la torre reticular de acero es de una base poligonal. Como ya se mencionó una base cuadrada tiende a tener altos índices de pérdidas de energía en los extremos de sus caras. El uso de una forma estructural pentagonal disminuye este problema, pero solo serviría para un campo circular, ya que solo tiene un eje de simetría, lo que constructivamente la vuelve más complicada.

Buscando que la propuesta tenga al menos dos ejes de simetría se considera viable una torre de base hexagonal u octogonal. Se podría usar una base de 10 caras o más, pero se volvería a tener un problema similar al de una base circular al momento de estructurarla.

Con una base hexagonal se tienen dos ejes de simetría, se evita en mayor medida la reflexión y las pérdidas de energía en los extremos de las caras comparada con una torre cuadrada. En estos criterios una torre octogonal es más eficiente que una hexagonal, aunque tiene otras características que no son tan viables como se mostrará en subcapítulos posteriores.

El esquema poligonal hexagonal se muestra en la Figura 5-4. Donde tiene más direcciones con  $\theta$  igual a 90 en comparación con la estructura cuadrada, y además en las demás direcciones, el ángulo es más cercano a 90 grados que la cuadrada.

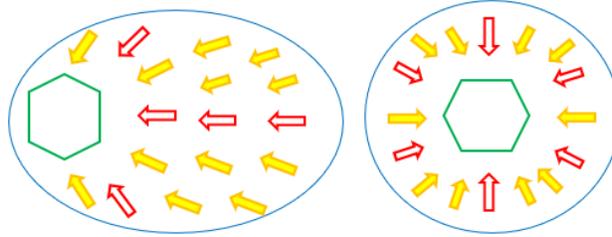


Figura 5-4 Distribución de energía en topología hexagonal

### 5.1.2 Análisis de la estructuración de la forma estructural

Como estructuración se pueden usar diversos sistemas, en torres de acero los más recurrentes son el uso un sistema de marcos con o sin contraventeos, donde los contraventeos pueden o no estar arriostrados en algún punto de su longitud. En ésta la resistencia de los marcos se incrementa por los contraventeos al limitar los desplazamientos de los nodos, y si se usan los arriostadores se eficientiza la resistencia de los contraventeos. Un ejemplo de marcos contraventeados con arriostadores se puede observar en la Figura 5-5.

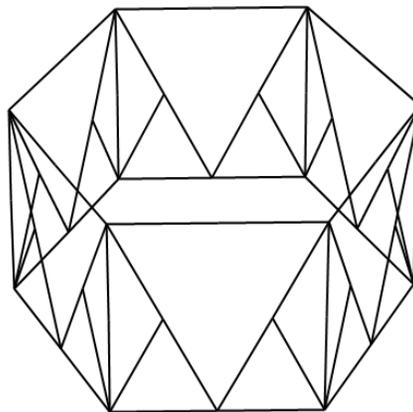


Figura 5-5 Estructuración de marcos contraventeados

Otro sistema empleado es el de la simulación de malla espacial de una o dos capas, el cual se asemeja a la formación de una retícula a base de perfil ligero que cubre todo el perímetro si es a una capa, o si es en dos, la malla antes mencionada cubre el perímetro y paralela a ésta a cierta distancia se encuentra otro perímetro de malla, las dos capas se encuentran conectadas para la distribución de esfuerzos y el

brindar rigidez mediante una mayor inercia. La estructuración se muestra en la Figura 5-6.

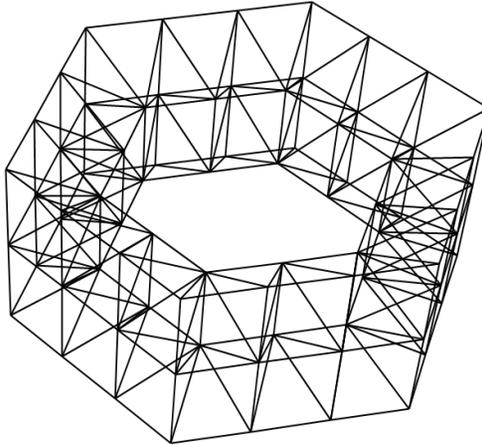


Figura 5-6 Estructuración a base de malla espacial

Como variable de los anteriores se puede proponer un sistema de rigidez mediante una columna o elemento rígido al centro de la torre, el cual va a estar conectado a determinadas alturas a la estructura principal de la torre, brindando pisos rígidos y una mayor estabilidad global. La anterior solución es mas empleada en edificios de grandes alturas con masas de alta magnitud. Las torres de heliostatos que se proponen son relativamente ligeras por lo que dicho sistema de estructuración no sería el más adecuado en términos de eficiencia en peso.

Varias torres de acero tienen geometrías variables conforme aumenta la altura de la misma, donde la base tiene una mayor área que la parte superior de la torre. Esto ayuda a ahorrar material y a tener un centroide a menor altura para una mayor estabilidad. Pero en la fase constructiva complica la situación, al tener una mayor cantidad de perfiles distintos, mayor número de conexiones diferentes y una mayor logística en el proceso. En utilidad una base de menores dimensiones en la parte superior de la torre crea problemas en la obtención de espacios útiles para la colocación de equipos y áreas libres para el mantenimiento que brinde el personal o los usuarios de los equipos.

Como otra opción constructiva es el de tener marcos con o sin contraventeos, donde las columnas estén formadas por armaduras reticulares, con o sin pisos a base de retícula similar a una tridilosa.

Los contraventeos pueden ser colocados mostrando distintas formas, como pueden ser en forma de V, o en V invertida, en forma de X, en forma de Lamelas continuas rodeando la torre, entre otras.

### 5.1.3 Perfiles y materiales

Los perfiles a emplear deberán de ser comerciales y de fácil obtención en la zona, por lo que se eligen perfiles de la empresa distribuidora Serviacero, la cual tiene amplia presencia en la zona, con lo que se aseguraría el abastecimiento. A su vez, Serviacero es surtido por la empresa Gerdau Corsa, con presencia y abastecimiento a nivel nacional.

Por cuestiones de practicidad en obra, de facilidad en conexiones, por su comportamiento homogéneo en ambos ejes de simetría, por su resistencia al pandeo y a la torsión, y por su bajo peso al ser perfiles tubulares, se consideran solo perfiles rectangulares y cuadrados tubulares de acero, es decir, solo perfiles HSS y PTR.

Dependiendo el tipo de sección mostrada será el tipo de material, es decir, para un HSS se utilizará un acero ASTM A500 Gr B, o si es un perfil PTR se usará acero ASTM A500 Gr A. Los límites de fluencia, últimos y demás características de cada perfil se señalarán en el capítulo del algoritmo genético.

Como un ejemplo de cada tipo de perfil se muestra la Figura 5-7.

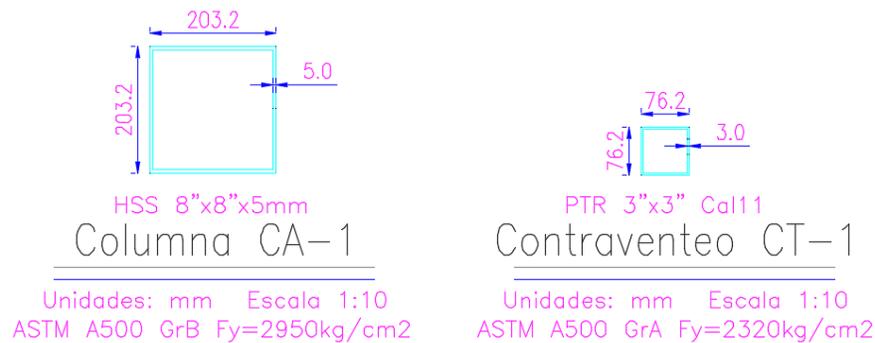


Figura 5-7 Ejemplo de perfil HSS y PTR

### 5.1.4 Capacidad de modulación

Para el proyecto es indispensable que la estructura pueda ser fácil y rápida de construir, donde además tenga grupos de perfiles con la misma sección y las mismas dimensiones, debido a la anterior es que se busca que las topologías propuestas tengan una constitución modular.

Al tener una estructura modular, se optimiza la fabricación de perfiles al tener varios del mismo tamaño y perfil, se eficientizan tiempos al solo tener que repetir cierta configuración y se facilita su transporte, construcción y montaje.

### 5.1.5 Practicidad de transporte

Dentro de los costos unitarios incluidos en el precio del suministro de materiales, se contempla el tipo de transporte que se va a utilizar en llevar el material hasta el lugar de la obra. Por lo que es importante considerar el tamaño máximo de cada una de las piezas, para determinar el tamaño del transporte que se va a necesitar. Donde pueden ser desde simples camiones de carga o de algún tráiler con semi-remolques.

El uso de elementos de menor tamaño facilita el uso de camiones de carga mas pequeños, que pueden maniobrar más fácil en cualquier parte de la república reduciendo la problemática debida a una topografía adversa o a condiciones geográficas de difícil acceso.

### 5.1.6 Practicidad de construcción

Ya considerando una estructura modular se facilitan los procesos constructivos. Aunado a eso, si los perfiles son de dimensiones cortas ya son mas prácticos de manejar por los trabajadores. Si las piezas son de altas dimensiones, además de las dificultades de transporte, están las problemáticas de colocación, ya que a piezas grandes o pesadas ya se empiezan a requerir equipos mecánicos como grúas.

Los tipos de conexiones son una parte importante del proceso constructivo, ya que si son atornilladas requieren personal de menores cualidades técnicas y tienen una mayor disipación de energía, aunque como factor negativo conllevan una mayor cantidad de material. Las conexiones soldadas requieren personal calificado para soldar en campo, pero la cantidad de material es menor a las atornilladas.

Adicional al tipo de conexión entre placas se tienen que buscar conexiones comunes entre distintos nodos, para que sean pocos tipos diferentes de uniones y uniformizar lo más que se pueda la obra.

### 5.1.7 Facilidad de ser programable y optimizable

Como parte indispensable de este trabajo es el programar la torre de helióstatos, por lo que este requisito se debe de priorizar al momento de elegir la topología. Para ello se debe de buscar tener una gama distinta de tipos de perfiles, pero donde la mayoría se puedan agrupar en estos, es decir, si la estructura tiene solo un tipo de perfil a ser optimizado, ya no se requerirá el utilizar el algoritmo de optimización, ya que sería solo gastar recursos computacionales y monetarios en algo que se puede analizar y optimizar de forma manual.

En cambio, si la estructura tiene diversos tipos de perfiles a optimizar donde uno cambie las condiciones del otro, ya es justificable el uso de algún algoritmo de optimización. Como un ejemplo de lo anterior, es la disminución de los efectos sobre

las columnas ante fuerzas laterales cuando a las vigas se les aumenta la rigidez, por lo que este tipo de relaciones son difíciles de considerar y optimizar de forma manual.

### 5.1.8 Normatividad

La estructura deberá de cumplir con los reglamentos vigentes del país, que en este caso es el Reglamento de Construcción del Distrito Federal en sus Normas Técnicas Complementarias versión 2004 (Arnal Simón and Betancourt Suárez, 2004).

Los elementos deberán de cumplir con lo estipulado en las normas en lo referente al diseño bajo cargas últimas y cargas de servicio.

## 5.2 Metodología de la comparativa de las topologías

### 5.2.1 Generalidades

Se desarrollará un análisis de tres opciones distintas de formas estructurales para posteriormente ser comparadas entre ellas, y finalmente elegir la mejor topología. La elección se realizará como un criterio de pre-optimización, en la cual se elegirá cuál de las tres opciones tiene las mejores características. El análisis será simple, sin el uso de ningún algoritmo de optimización

Se deberán de tener las mismas consideraciones para las tres torres. Es decir, se deberán de tener las mismas cargas, las mismas restricciones y los mismos criterios de diseño.

El diseño se realizará mediante un análisis elástico y un diseño plástico efectuado mediante el programa SAP 2000 V16.

### 5.2.2 Requerimientos técnicos de espacio

Para la propuesta eficiente de formas estructurales se tienen que conocer los requerimientos técnicos que tendrá la torre que se producirá en este trabajo. Los requisitos se obtuvieron de parte de la Universidad Autónoma de Querétaro, por

parte de los encargados del proyecto de “Construcción de una torre central concentradora de energía termo-solar de un campo de helióstatos”.

Los requerimientos de espacio se enuncian a continuación:

- La base de la torre debe de contenerse en un área rectangular de 6 m x 6 m.
- La altura de la torre deberá de tener una altura de 30 metros.
- Se debe de tener un entrepiso en el penúltimo nivel, donde debe de existir un espacio libre mínimo de 2 m x 1.5 m para la colocación de equipos
- En el interior de la torre se debe de tener espacio para la colocación de escaleras. Estas no deben de ser de caracol ni marinas por seguridad de los usuarios.
- En el interior de la torre se debe de tener un espacio libre desde la base hasta la parte superior para el izaje de equipos.

### 5.2.3 Cargas muertas

De igual forma que los requerimientos técnicos de espacio, por parte de los encargados del proyecto de “Construcción de una torre central concentradora de energía termo-solar de un campo de helióstatos” se obtienen las cargas muertas provenientes de los equipos, las cuales consistirán en:

- Peso de equipos en el cuarto de máquinas: 2 Tn repartidas en el área en que se colocará la maquinaria.
- En la parte superior de la torre se colocará una fuerza puntual de 100 kg simulando el peso del receptor de energía.

Para el sistema de piso se colocará una rejilla tipo Irving sobre la retícula de vigas de entrepiso, para este peso se considera una carga de área distribuida de 50 kg/m<sup>2</sup>.

El peso propio considera el peso de todos los perfiles de acero de la torre, y este será automatizado por el programa de cálculo SAP 2000.

### 5.2.4 Cargas vivas sobre la torre

Del reglamento de construcción ya mencionado se obtendrán los valores de las cargas vivas máximas y accidentales. El desglose de las cargas vivas en el cuarto de máquinas se muestra a continuación:

- Se colocará un valor de 100 kg/m<sup>2</sup> como carga viva máxima, proveniente de la consideración de una azotea con pendiente menor al 5%. Esto ya que solo tendrá personal en labores de mantenimiento.
- Como carga viva accidental se utilizará un valor de 70 kg/m<sup>2</sup> proveniente de la misma consideración anterior.

Para las cargas vivas sobre la azotea se colocarán las siguientes:

- Como carga máxima se tendrá un valor de 40 kg/m<sup>2</sup> provenientes de una azotea con pendiente mayor al 5%.
- Un valor de 20 kg/m<sup>2</sup> será asignado como carga viva accidental con la misma consideración anterior.

### 5.2.5 Cargas de viento sobre la estructura

Para la obtención de las cargas de viento, se utilizará el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad de México versión 2008 (CFE, 2008). Los criterios a tomarse se muestran a continuación:

- La torre se considera como una estructura del grupo B
- Tendrá un viento tipo 1.

- Con las consideraciones regionales de Querétaro, se utilizará una presión de diseño de 260 kg/m<sup>2</sup> en las áreas cerradas del cuarto de máquinas. En las áreas abiertas se tendrá una presión de 155 kg/m<sup>2</sup> a aplicarse en las caras de los elementos.

Como un ejemplo de la aplicación de las cargas de viento, se muestra la Figura 5-8.

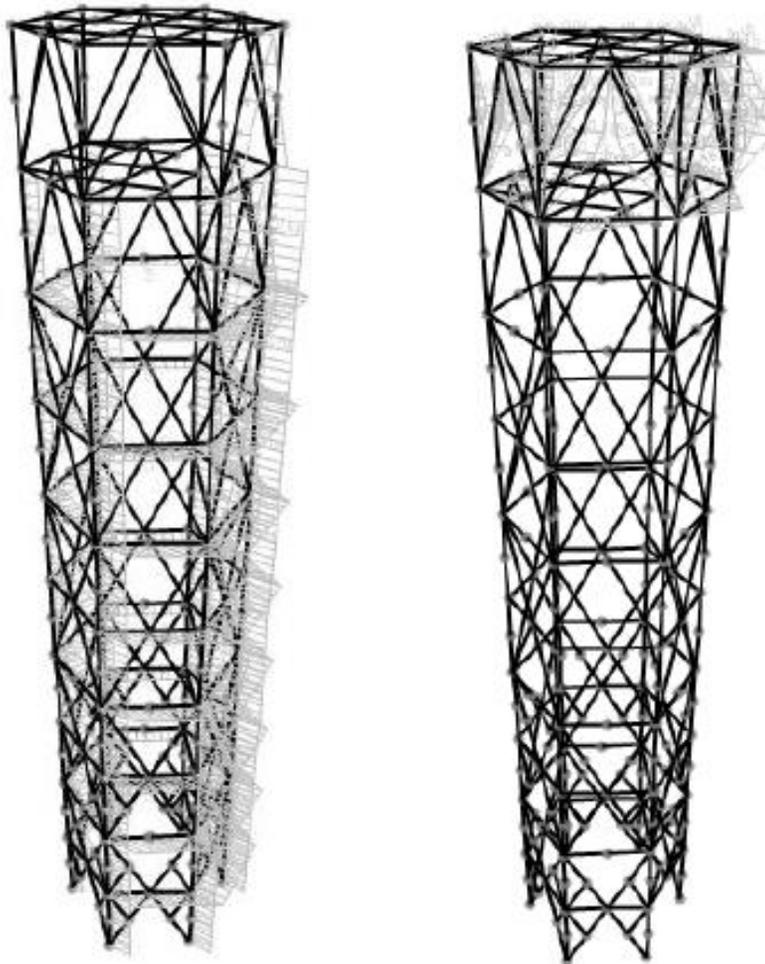


Figura 5-8 Esquema de aplicación de cargas de viento

5.2.6 Análisis de las estructuras

Dentro del análisis, las cargas antes descritas deberán de ser incluidas con las combinaciones de carga que establece el reglamento de construcción. Estas de muestran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Combinaciones de carga

| <i>Combinaciones de Servicio</i>        | <i>Combinaciones de Diseño</i>                      |
|---|---|
| $C_m + C_v$                             | $1.4 C_m + 1.4 C_v$                                 |
| $C_m + C_{vacc} + (W_x \text{ ó } W_y)$ | $1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 (W_x \text{ ó } W_y)$ |
| $0.9C_m + 0.9C_{vacc} + S_x + 0.3 S_y$  | $1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 S_x + 0.33 S_y$       |
| $0.9C_m + 0.9C_{vacc} + S_y + 0.3 S_x$  | $1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 S_y + 0.33 S_x$       |

Para la revisión por servicio el reglamento maneja que para estructuras cuyo desplazamiento lateral no afecte construcciones aledañas o algún otro elemento de la misma torre que pueda dañarse por los desplazamientos, el valor permisible del desplazamiento lateral será de 0.005 veces la altura de la torre. Donde para una altura de 30 metros se obtiene un desplazamiento permisible lateral de 15 cms.

Para el correcto funcionamiento del mecanismo del receptor, se recomienda un desplazamiento máximo de 10 cms en la parte superior de la torre.

5.3 Propuestas de formas estructurales

5.3.1 Topología Uno

La primera propuesta como topología para el actual análisis es la forma estructural de la torre existente de helióstatos utilizada en la Torre de un Campo Experimental en Sonora. La torre es de base cuadrada con cuatro caras iguales conformadas por marcos de acero con contravientos en V invertida. Todos los pisos cuentan con las mismas dimensiones en cada piso. Los marcos que se forman son de seis metros de altura con un claro de 6 metros, la torre tiene 5 módulos en total. La forma estructural de la topología uno se puede observar en la Figura 5-9.

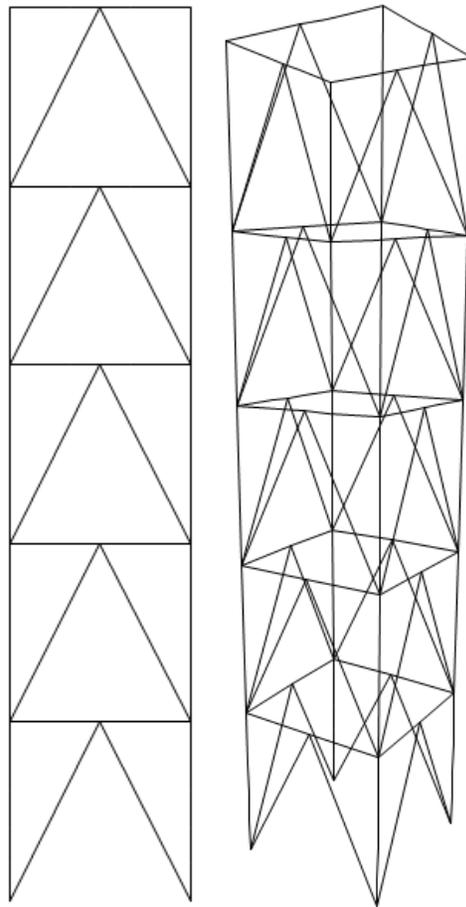


Figura 5-9 Forma estructural de Topología Uno

Para el diseño, los perfiles con los que la torre cumple ante las solicitaciones de las fuerzas aplicadas, se muestran en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2 Secciones de los perfiles de la Topología Uno.

| <b>Sección</b>  | <b>Elemento</b> | <b>Material</b> | <b>Peso [Tn]</b> |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| HSS 4"x8"x1/4"  | Vigas           | A500 Gr B HSS   | 3.4945           |
| HSS 5"x5" 1/4"  | Diagonales      | A500 Gr B HSS   | 6.455            |
| HSS 8"X8"X5/16" | Columnas        | A500 Gr B HSS   | 5.84             |

Analizando los espacios que existen en la torre, esta opción es la que tiene una mayor eficiencia de uso de espacio respecto al área total del terreno, es decir, ocupa

los 36 m<sup>2</sup> disponibles de espacio. Por lo mismo, existe en la base el suficiente espacio para la colocación de escaleras, el pozo de izaje de materiales, y en el cuarto de máquinas hay el suficiente espacio para la colocación de los equipos.

La captación de la energía solar es máxima solo en cuatro direcciones, por lo que no es tan eficiente como alguna torre con base poligonal mayor a cuatro lados.

Los tamaños de los elementos columna y viga son de 6 metros, y de 6.7 m las longitudes de los contraventeos. Dichas dimensiones a pesar de su longitud aún pueden ser transportables en camiones de transporte grandes, o en su defecto, dividir dichas piezas, aunque eso ocasione más trabajo en obra y más conexiones. Por el mismo tamaño de las piezas, ya se requiere una grúa para su izaje y colocación.

El desplazamiento horizontal máximo producto de las fuerzas de viento presentado en la parte superior de la torre es de 5.25 cm. El peso propio total de la torre es de 15.79 Tn.

### 5.3.2 Topología Dos

Esta torre tendrá una base en forma hexagonal, con lo que se propiciará que la captación de energía solar sea más eficiente en un mayor número de direcciones en comparación de una torre rectangular o cuadrada. Siguiendo la lógica, a un mayor número de lados de la forma poligonal de la torre, la captación de energía es mayor, así como su rigidez, pero la complejidad constructiva y el peso de la torre aumentaban por lo que se observó que la hexagonal proporcionaba un valor más alto en un análisis costo beneficio de dichos factores.

Esta opción está estructurada mediante una doble malla espacial de base hexagonal. La malla interior y exterior están conformada por retículas cuadradas de 1 mto x 1 mto. Las dos mallas con separación entre ellas de 1 metro están unidas mediante elementos diagonales. La forma estructural se puede apreciar en la Figura 5-10

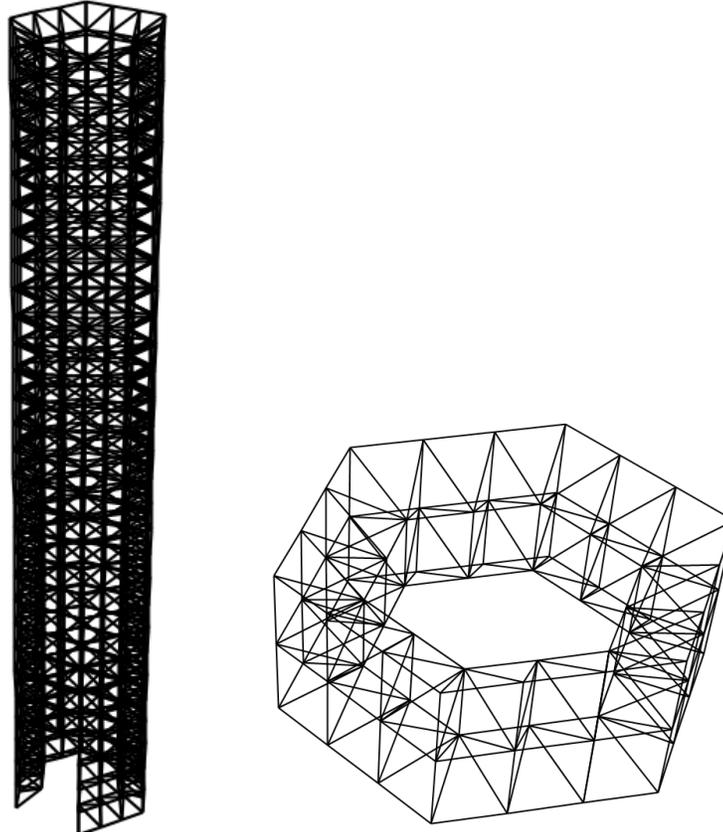


Figura 5-10 Forma estructural de Topología Dos

Los perfiles empleados para la constitución de la torre se muestran en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Secciones de los perfiles de la Topología Dos.

| <i>Sección</i>      | <i>Localización</i> | <i>Material</i> | <i>Peso [Tn]</i> |
|---------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| PTR 2"x2" Cal 14    | Otros módulos       | A500 Gr A       | 11.1755          |
| PTR 2.5"x2.5" Cal 7 | 1er,2nd módulo      | A500 Gr A       | 0.7077           |

Analizando los espacios que existen en la torre, esta opción tiene una baja eficiencia de uso de espacio respecto al área total del terreno, es decir, ocupa un

área mucho menor al total disponible, donde a pesar de que por su forma hexagonal se pierde espacio útil, el tener doble malla espacial reduce aún más el área útil para la colocación de equipos, escaleras y demás requisitos.

La captación de la energía solar es máxima en seis direcciones, por lo que la pérdida de energía es menor a consideración de una torre cuadrada.

Los tamaños de todos los elementos son igual en la malla espacial, siendo de 1 metro el tamaño de cada uno. En relación a los elementos que unen las dos mallas espaciales, su longitud es de 1.2247 m. El pequeño tamaño de todos los elementos es factor para que los costos de transporte y colocación sean muy bajos. El problema radica en que son un gran número de piezas de conexiones, lo que provoca que sea mas tardada su construcción. Por el mismo tamaño de las piezas y tipo de conexiones, no se requiere de equipo ni personal especializado para su izaje ni colocación.

El desplazamiento horizontal máximo producto de las fuerzas de viento presentado en la parte superior de la torre es de 5.14 cms. El peso propio total de la torre es de 11.88 Tn.

### 5.3.3 Topología Tres

De igual forma que la topología dos, esta opción tiene una base hexagonal, donde sus seis caras iguales estarán conformadas por marcos contraventeados de acero, donde los contraventeos tendrán rigidizantes en los módulos inferiores. Los marcos tendrán dimensiones horizontales y verticales de 3 metros. La estructuración se puede observar en la Figura 5-11.

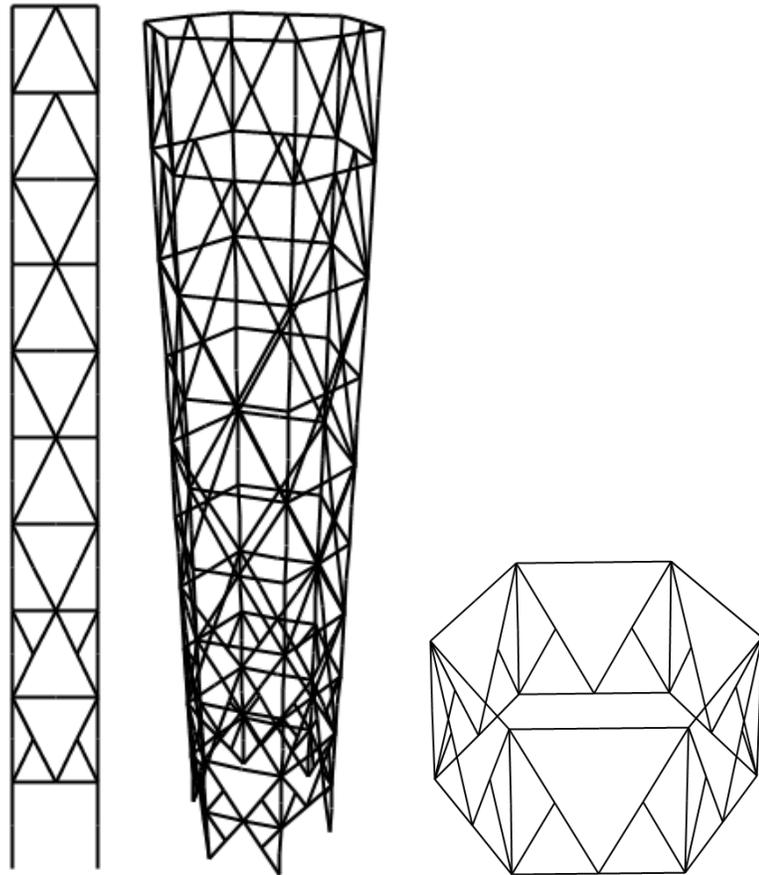


Figura 5-11 Figura 4 10 Forma estructural de Topología Tres.

Los perfiles mediante los cuales la estructura cumple con los criterios de cargas últimas y de servicio se muestran en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4 Secciones de los perfiles de la Topología Tres.

| <i>Sección</i>   | <i>Elemento</i> | <i>Material</i> | <i>Peso [Tn]</i> |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| HSS 6"x4"x3/16"  | Vigas           | A500 Gr B HSS   | 3.2903           |
| HSS 6"x6"x3/16"  | Columnas        | A500 Gr B HSS   | 3.9735           |
| PTR 2"x2" Cal 11 | Diagonales      | A500 GrA PTR    | 0.2567           |
| PTR 3" Cal 11    | Riostras        | A500 GrA PTR    | 2.7288           |

Analizando los espacios que existen en la torre, esta opción tiene una baja eficiencia media de espacio respecto al área total del terreno, es decir, ocupa un área menor al total disponible, donde solo se pierde espacio por la forma hexagonal.

La captación de la energía solar es máxima en seis direcciones, por lo que la pérdida de energía es menor a consideración de una torre cuadrada.

Los elementos de mayor longitud son las diagonales, con una longitud de 3.35 m. Estas dimensiones son fáciles de transportar y de colocar, por lo que el uso de grúas para izaje y montaje es opcional.

El desplazamiento horizontal máximo producto de las fuerzas de viento presentado en la parte superior de la torre es de 5.53 cms. El peso propio total de la torre es de 10.25 Tn.

#### 5.4 Elección de la mejor topología

##### 5.4.1 Comparativa de las formas estructurales

Para realizar la comparativa entre las tres formas estructurales, se resumen todas sus características en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5 Resumen de características de las Topologías

| Forma Estructural                      | 1     | 2     | 3     |
|--|-------|-------|-------|
| <b>Peso Propio [Ton]</b>               | 15.79 | 11.88 | 10.25 |
| <b>Max Desp. [cm]</b>                  | 5.25  | 5.14  | 5.53  |
| <b>Long Max. [m]</b>                   | 6.7   | 1     | 3.35  |
| <b>Uso de grúas</b>                    | Si    | No    | Si    |
| <b>Cantidad de Conexiones</b>          | Baja  | Alta  | Media |
| <b>Caras para recepción de energía</b> | 4     | 6     | 6     |
| <b>Capacidad de ser Optimizable</b>    | Media | Baja  | Alta  |
| <b>% Área libre/Área total</b>         | 1     | 0.43  | 0.65  |
| <b>Cantidad de elementos</b>           | 80    | 3849  | 360   |

La topología más ligera es la tres, donde el peso es un factor predominante en la comparación entre las topologías. La rigidez de la topología 2 es la mayor, esto se puede observar en que es la que tiene el menor desplazamiento lateral de las tres.

Las tres torres cuentan con desplazamientos menores a los permisibles, y con una diferencia máxima entre ellas menor al medio centímetro.

Debido a las cortas dimensiones de sus elementos, las topologías 2 y 3 tienen una mayor facilidad de transportes, y las formas estructurales 1 y 3 requieren de grúas para el izaje y colocación de sus elementos. El uso de grúas se observa es inversamente proporcional al número de conexiones, donde la topología 2 es la que cuenta con una mayor cantidad.

Por su forma hexagonal, las topologías 2 y 3 son más eficientes en la recepción de energía solar respecto a la topología 1. La forma estructural 3 tiene más características y más combinaciones de sus diferentes elementos que la convierten en la más factible de ser optimizada. La que cuenta con una mayor eficiencia en el uso de sus espacios es la primera. La topología 1 es la que cuenta con la menor cantidad de elementos.

### 5.4.2 Conclusiones de comparativa

En base a las características de las tres topologías, la número 2 y 3 tienen la misma cantidad de mejores características (con cuatro cada una), y la número 1 solo tiene tres donde tiene mejores características. Para obtener la mejor, se revisa dentro de las características en que la topología 1 es mejor, que topología le sigue en mejores características. En dicho análisis se observa que la de mejor comportamiento global es la número 3.

Al ser el peso propio y la capacidad de ser optimizable factores de alta importancia, y en base a la comparativa antes realizada, se concluye en que la mejor topología para ser utilizada en un proceso de optimización para una torre central de helióstatos es la número 3.



CAPITULO 6

**6. ALGORITMO DE LA  
TORRE DE  
HELIOSTATOS**

---

6.1 Generalidades

La forma estructural (topología) elegida por ser la más apta en el capítulo 5 se modelará y programará mediante un algoritmo con el método de elemento finito en el programa ANSYS.

Para dicho algoritmo, en un principio se introducirán los datos de inicio que darán las dimensiones generales de la torre, así como los datos de cargas y localización de la misma para la obtención de las fuerzas que influirán en la torre.

Proveniente del primer parte del algoritmo genético mostrado en el capítulo 6 se importará la matriz de características de la torre (criterios de dimensiones, elementos y perfiles).

Con dichos datos se procederá a crear los puntos principales y los de apoyo, las líneas de los elementos, las características de los materiales y los elementos finitos, se asignarán las características de los perfiles, se realizará el mallado, se asignarán las fuerzas externas, se obtendrán los elementos mecánicos y se concluirá con los módulos de diseño de los elementos para evaluar su capacidad.

### 6.2 Datos iniciales

Para la elaboración de las distintas torres, se solicitan los valores principales de análisis del código de optimización y los datos para crear la geometría de la torre. A continuación, se detallan los datos requeridos y sus respectivos valores a usarse en el ejemplo dado para este proyecto.

- Altura de la torre (En metros) = 30 m
- Lado corto de la base del terreno (En metros) = 6 m
- Número de variables (Este valor se deberá de homologar con su similar utilizado en el algoritmo genético mostrado en el capítulo 7) = 19
- Tamaño de población (Este valor se deberá de homologar con su similar utilizado en el algoritmo genético mostrado en el capítulo 7). = 100

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

---

- Número de elementos finitos por cada elemento = 1
- Coeficiente de amortiguamiento = 0.005 (Considerando conexiones atornilladas).

Por parte del usuario se introducen los valores de las fuerzas gravitacionales a colocarse en las distintas torres. Los valores de las cargas vivas se obtienen del RCDF NTC2017 (Administración Pública de la Ciudad de México, 2017). Las cargas de azotea se toman considerando una azotea con pendiente menor al 5%. Las del cuarto de máquinas o de entrepiso se toman con el mismo valor, ya que solo serán usados para labores de mantenimiento. La carga muerta del sistema de piso es obtenida producto de una rejilla Irving.

- Carga viva máxima de azotea ( $Tn/m^2$ ) = 0.100
- Carga viva máxima de entrepiso ( $Tn/m^2$ ) = 0.100
- Carga viva accidental de azotea ( $Tn/m^2$ ) = 0.070
- Carga viva accidental de entrepiso ( $Tn/m^2$ ) = 0.070
- Carga muerta de sistema de piso ( $Tn/m^2$ ) = 0.050
- Peso maquinaria ( $Tn$ ) = 2.000

Se ingresan los datos necesarios para calcular las presiones del viento en el sitio de construcción de la torre. Los datos son acorde al MDOC CFE VIENTO2008 (CFE, 2008). Los valores especificados para el ejemplo de este proyecto son tomados para la ciudad de Querétaro, Qro, México, en las instalaciones actuales del campo de helióstatos del campus Juriquilla.

- Velocidad regional (Km/hr) = 128

- Categoría del terreno = 2
- Altitud del sitio (MSNM) = 1754
- Temperatura media (°C) = 19.10
- Factor de topografía = 1.00

Como datos de inicio, pero que no sean modificados por el usuario desde la interfaz, si no solo desde el código, se señalan los factores de resistencia especificados en el RCDF NTC2017 (Administración Pública de la Ciudad de México, 2017). De igual forma se colocan las resistencias de los perfiles a utilizar (dichos materiales corresponden a los perfiles señalados en el capítulo 7.

- Factor de resistencia por fuerzas de tensión = 0.9
- Factor de resistencia por fuerzas de compresión = 0.9
- Factor de resistencia a flexión en vigas = 0.9
- Factor de resistencia a cortante en vigas = 0.9
- Esfuerzo de fluencia de ASTM A500 GrB = 2.95 Tn/cm<sup>2</sup>
- Esfuerzo de fluencia de ASTM A500 GrA = 2.53 Tn/cm<sup>2</sup>

### 6.3 Importación de características de los individuos

En la primera parte del algoritmo genético se crea la matriz de población con valores binarios, y posteriormente se transforman a valores de dimensiones existentes. Esta matriz de dimensiones existentes se crea en un archivo tipo tabla con formato csv.

Desde el algoritmo de la torre se importará esta matriz en formato csv y de ahí para el análisis de cada uno de sus individuos se tomarán sus respectivas dimensiones.

### 6.4 Materiales empleados

El material a utilizarse en la torre será el acero estructural para los perfiles. Para ello se señalan dentro del algoritmo sus principales características:

- Módulo de elasticidad: 21,000,000 Tn/m<sup>2</sup>
- Módulo de Poisson: 0.25
- Peso Volumétrico: 7.8 Tn/m<sup>3</sup>
- Coeficiente de expansión volumétrico: 0.0001

### 6.5 Análisis de cada individuo

Se crea un ciclo para leer cada uno de los individuos de la población total por generación. A continuación, se muestra lo realizado para cada uno de los individuos.

#### 6.5.1 Creación de nodos

Se crearon las retículas inferiores de los nodos para crear la forma hexagonal que tendrá la torre. La forma hexagonal de los nodos se muestra en la Figura 6-1.

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

---

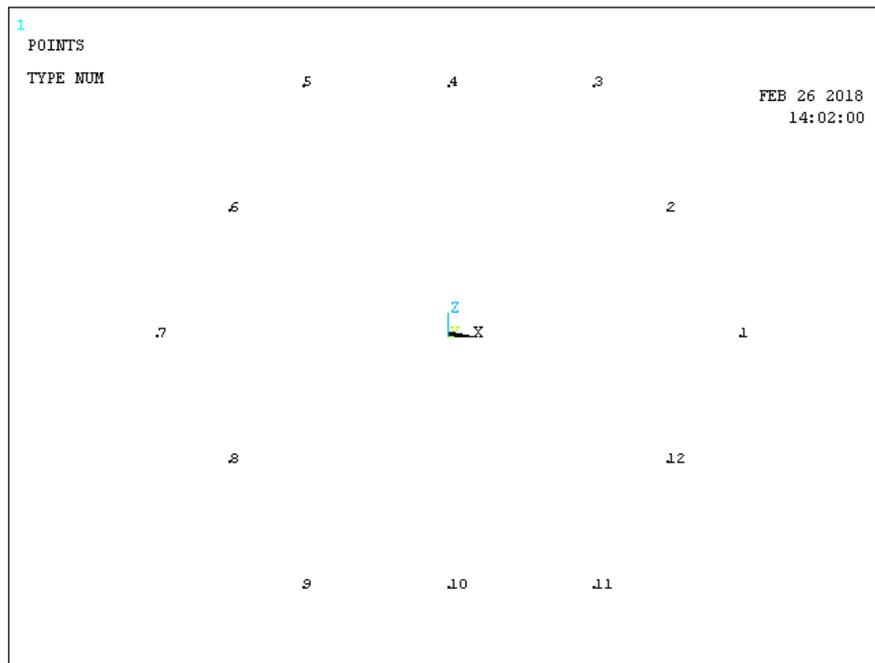


Figura 6-1 Topología Hexagonal de los nodos

Posteriormente se duplican estos nodos para tener la totalidad de los mismos en toda la altura de la torre. En los dos últimos niveles se colocarán nodos centrales para la retícula de las vigas de entresuelo y azotea. Además, en un nivel superior a la altura de la torre se colocan nodos auxiliares para la orientación de los elementos finitos. La forma completa de la torre se puede observar en la Figura 6-2.



## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

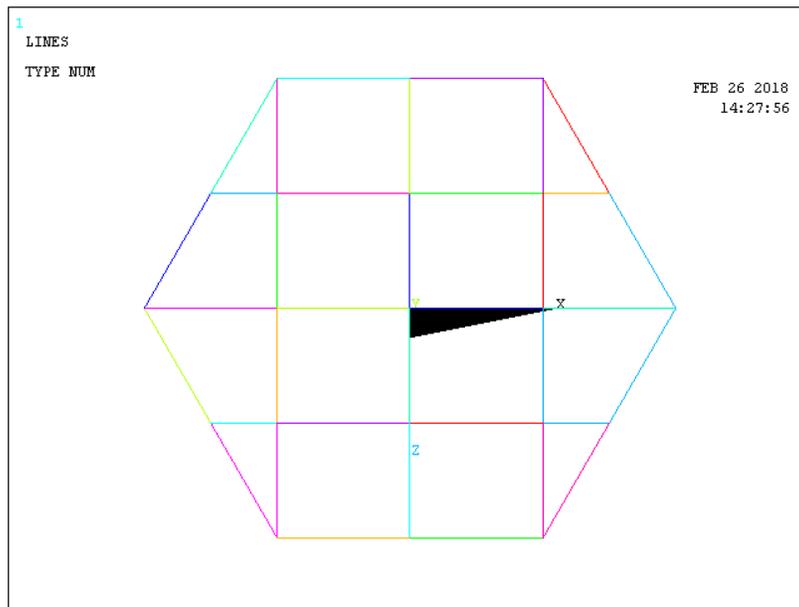


Figura 6-3 Reticula de vigas de azotea

El total de las líneas en toda la altura de la torre se muestran en la Figura 6-4.

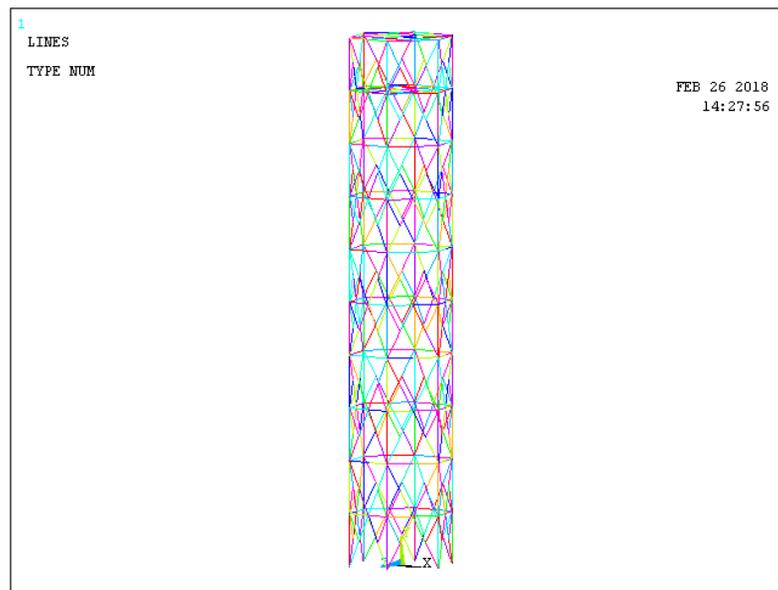


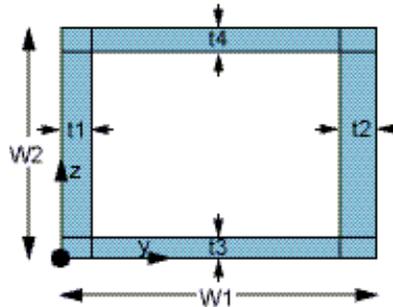
Figura 6-4 Totalidad de líneas de la torre

### 6.5.3 Asignación de propiedades de perfiles

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

Para las vigas y las columnas se les asignará una sección tipo HRECT, donde se le asigna a cada elemento distinto sus propiedades como sección rectangular hueca (ancho, peralte, espesor de patines, espesor de almas). Se puede observar la forma de la sección en la Figura 6-5.

### Type: BEAM, Subtype: HREC



Data to provide in the value fields:

$w_1, w_2, t_1, t_2, t_3, t_4$

where

$w_1$  = Outer width of the box

$w_2$  = Outer height of the box

$t_1, t_2, t_3, t_4$  = Wall thickness

Figura 6-5 Viga tipo HREC de ANSYS

Adicional, se les calculará el valor de su área transversal, su momento de inercia, su radio de giro, su momento de sección elástico y plástico. En vigas, los valores de inercia y del radio de giro se toman respecto al eje de flexión secundario (al ser el de menor resistencia y el que tiene más probabilidades a tener pandeo local), el momento de sección plástico es respecto al eje principal de flexión.

Para las diagonales y sus arriostramientos solo se calculan los valores de su área transversal, su inercia y su radio de giro.

Las secciones se clasifican de la siguiente forma:

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

---

- Columnas inferiores; Sección 1, clase BEAM, tipo HRECT.
- Vigas inferiores; Sección 2, clase BEAM, tipo HRECT.
- Diagonales inferiores; Sección 3, clase Link,  $A3$ =Área de la diagonal.
- Arriostramientos inferiores; Sección 4, clase Link,  $A4$ =Área del arriostramiento.
- Columnas superiores; Sección 5, clase BEAM, tipo HRECT.
- Vigas superiores; Sección 6, clase BEAM, tipo HRECT.
- Diagonales inferiores; Sección 7, clase Link,  $A7$ =Área de la diagonal.
- Arriostramientos inferiores; Sección 8, clase Link,  $A8$ =Área del arriostramiento.

### 6.5.4 Corrección de arriostramientos

El código genético tiene dentro de sus variables la existencia o no arriostramientos en ciertas partes de la torre. Donde la variable que lo determina se denomina SEAR.

- SEAR = 1, Sin arriostramientos en toda la torre.
- SEAR = 2, Sección inferior con arriostramientos.
- SEAR = 3, Sección superior con arriostramientos.
- SEAR = 4, Ambas secciones con arriostramientos.

Los elementos tienen que borrarse desde esta instancia ya que no se puede después de realizar el mallado y la discretización de las secciones. Lo antes expresado se puede ejemplificar con la Figura 6-6 y Figura 6-7.

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

---

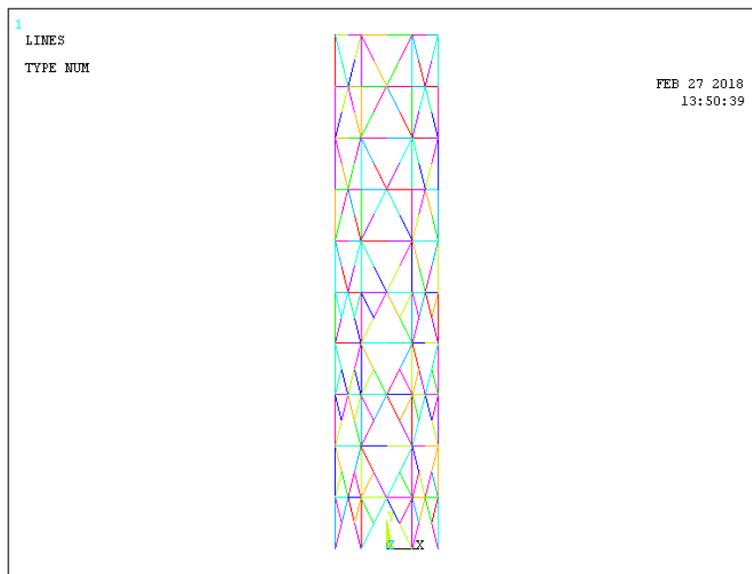


Figura 6-6 Geometría con valor SEAR=2

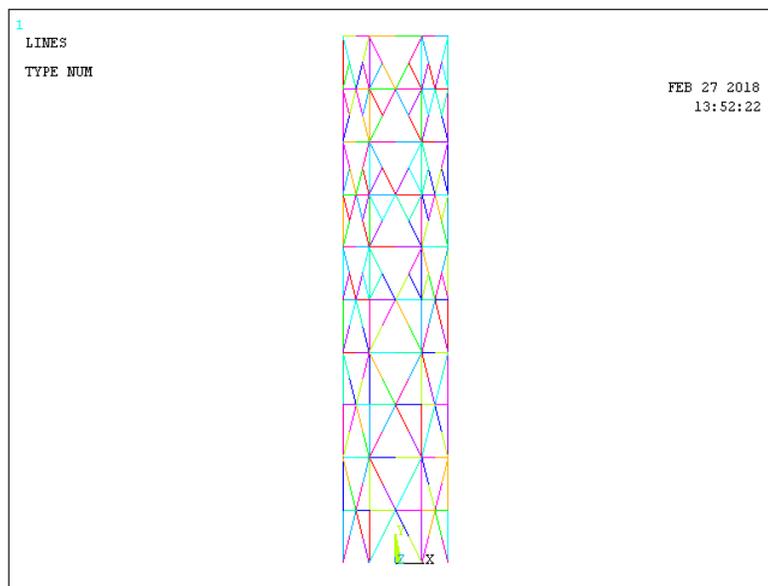


Figura 6-7 Geometría con valor SEAR=3

### 6.5.5 Elementos finitos y mallado.

Para todos los elementos, tanto superiores como inferiores, se les asignará el elemento finito BEAM188 o el LINK180 según corresponda. Para poder asignarlos este elemento finito y las propiedades de su sección se requiere crear puntos que serán referencia para planos de apoyo para la orientación de los elementos. La

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

---

planta mostrando los planos de apoyo se pueden visualizar en la Figura 6-8. La torre mallada y discretizada en su totalidad se observa en la Figura 6-9.

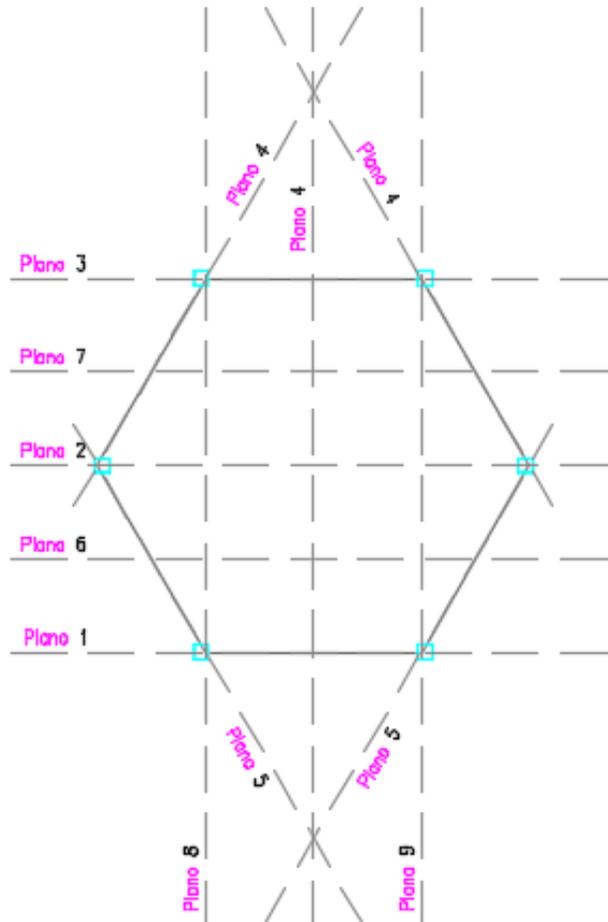


Figura 6-8 Planos de apoyo para orientación

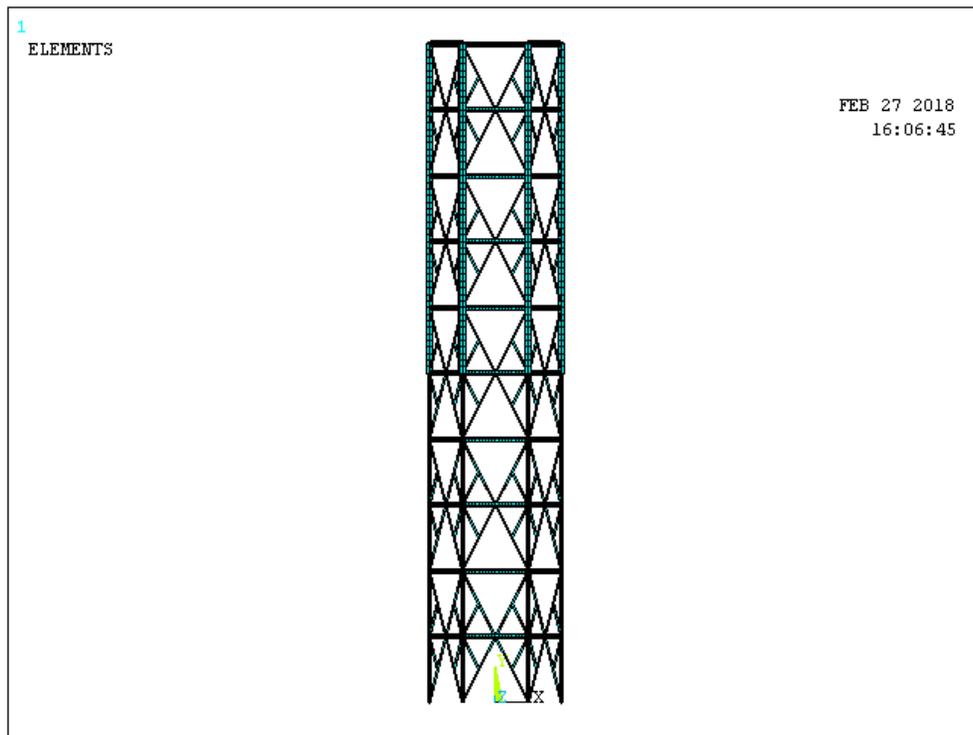


Figura 6-9 Mallado de los elementos de la Torre

### 6.5.6 Acoplamiento de grados de libertad

Al tener beams con seis grados de libertad en sus extremos, y los links con tres grados de libertad en cada extremo, se deberá de hacer un acoplamiento de los grados de libertad en cada extremo, se deberá de hacer un acoplamiento de los grados de libertad en las uniones entre dichos elementos finitos distintos. Se realiza mediante el acoplamiento de los grados de libertad de los nodos agrupados por cada piso.

### 6.5.7 Asignación de apoyos

Los apoyos se colocarán en la base de las columnas inferiores como restricciones de los 6 grados de libertad (desplazamientos y rotaciones en las 3 direcciones). Los apoyos se observan en la Figura 6-10.

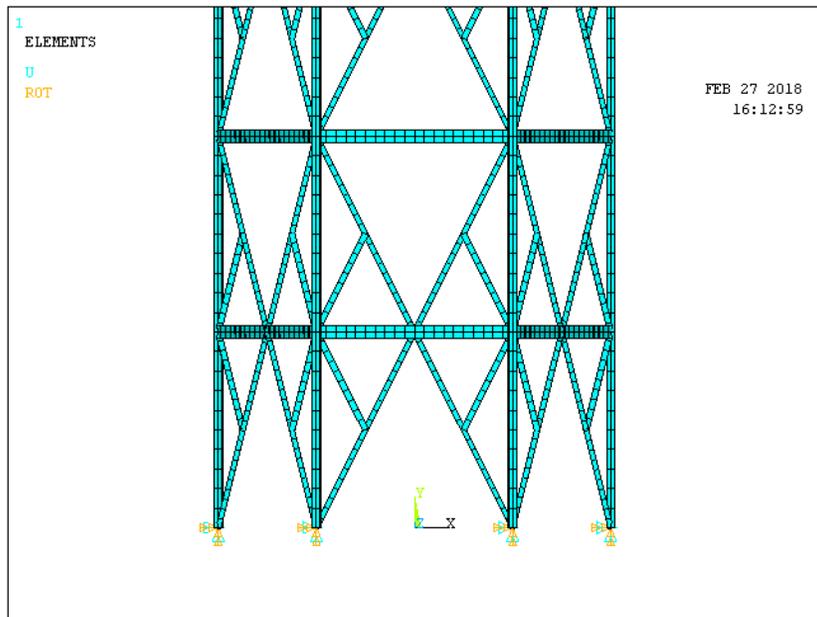


Figura 6-10 Apoyos empotrados en la base

### 6.5.8 Peso propio de la torre

Se obtiene el peso propio de la torre mediante la suma de todos los elementos del producto del volumen de cada uno de ellos por el peso volumétrico del acero. Dicho peso propio es el resultado de la función objetivo que se necesita en el algoritmo genético.

### 6.5.9 Análisis modal

Para obtener los parámetros modales (Frecuencia natural de la estructura y su periodo fundamental) se realiza un análisis modal de la misma con las siguientes características:

- Método de análisis Block Lanczos
- Se analizan las frecuencias con valor de 0.1 a 10 Hertz.
- Se expande la solución a 6 modos.

### 6.5.10 Cargas por peso propio de la estructura

Dicho valor se establece desde el programa al establecer la masa de cada elemento por el valor de la aceleración de 9.81 m/s<sup>2</sup>.

### 6.5.11 Cargas sobre la azotea

Se calcula el área de los cuadros de la retícula de vigas, esta se obtiene con la Ecuación 6-1.

$$ARRE = \frac{LCBA^2}{16} \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Donde:

ARRE: Área de cada cuadro de la retícula de vigas.

LCBA: Longitud de lado corto de la base (6 m).

La aplicación de la carga muerta del sistema de piso, de la carga viva máxima y de la viva accidental se colocarán como cargas puntuales sobre los nodos de la retícula de la azotea. Para los nodos centrales se multiplica el valor de cada carga (Tn/m<sup>2</sup>) por el valor ARRE (m<sup>2</sup>) antes calculado, para así obtener su correspondiente carga puntual. En el perímetro se tomará como área actuante la mitad del valor ARRE.

### 6.5.12 Cargas en el cuarto de máquinas

Para las cargas del sistema de piso, viva máxima y viva accidental se utiliza el mismo procedimiento y la Ecuación 6-1 para obtener las cargas puntuales a ser colocadas.

En este piso adicionalmente se colocará el peso de la maquinaria. Dicho valor es una carga puntual, por lo que, para distribuirse en toda el área, se dividirá entre el 75% del área total del cuarto de máquinas delimitado por el hexágono. Se toma dicha reducción del área como factor de seguridad y como criterio por los espacios vacíos

sin maquinaria y para el paso de las personas de mantenimiento. Una vez que la carga ya se ha convertido en presión, se multiplica por el valor ARRE y se distribuye en los nodos como carga puntual de la misma forma que se ha hecho con las otras cargas.

### 6.5.13 Cargas de viento

Dichas cargas se obtendrán usando los datos iniciales, y mediante el MDOC CFE VIENTO2008 obtener las fuerzas de viento actuantes. Dichas fuerzas serán aplicadas en los nodos de los entresijos. Se colocará el viento en la dirección débil de la torre, es decir, donde la inercia de la torre es menor. La dirección débil es cuando el viento es aplicado perpendicular a alguna de las caras.

Para todos los niveles excepto para el piso del cuarto de máquinas y de la azotea, las fuerzas serán iguales a la suma de la mitad del área afectada por el viento sobre los perfiles del módulo superior más la mitad del área afectada del módulo inferior.

Para el nivel del piso del cuarto de máquinas se colocará como fuerzas de viento la suma del área afectada por el viento de los perfiles del módulo inferior más la suma de la mitad del área total superior del cuarto de máquinas. Esto se debe a que el cuarto de máquinas estará totalmente cerrado, por lo que la mitad a colocarse será el área del producto de la longitud del piso por la mitad de la altura del módulo.

Para el nivel de la azotea de la torre, serán las fuerzas actuando sobre el área superior del módulo inferior, por como se ha comentado, dicha área estará cerrada.

### 6.5.14 Combinaciones de cargas

Las combinaciones de carga a utilizar son las que se marcan en el RCDF NTC2017, donde se dividirán en condiciones de servicio y en condiciones de diseño. Las cargas muertas son la suma de las cargas permanentes, las cuales se especifican en la Ecuación 6-2.

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

---

$$C_m = C_{\text{piso}} + C_{\text{equipos}} + C_{\text{peso propio}}$$

Ecuación 6-2

Donde:

$C_m$ : Carga muerta total.

$C_{\text{piso}}$ : Carga del sistema de piso.

$C_{\text{equipos}}$ : Carga de los equipos fijos.

$C_{\text{peso propio}}$ : Carga producto del peso propio de la estructura.

Las combinaciones para condiciones de servicio serán especificadas por la Ecuación 6-3.

$$\text{Servicio}_1 = 0.9C_m + 0.9C_{\text{vacc}} + C_{\text{viento}}$$

$$\text{Servicio}_2^* = C_m + C_{\text{vacc}} + C_{\text{sismoX}} + 0.3C_{\text{sismoY}}$$

Ecuación 6-3

Donde:

$C_m$ : Carga muerta total.

$C_{\text{vacc}}$ : Carga viva accidental.

$C_{\text{viento}}$ : Carga de viento.

$C_{\text{sismoX}}$ : Cargas de sismo en la dirección X

$C_{\text{sismoY}}$ : Cargas de sismo en la dirección Y

\*: Combinación de carga que será aplicada solo en el modelo de SAP2000

Las combinaciones para condiciones de diseño serán especificadas por la Ecuación 6-4.

$$\text{Diseño}_1 = 1.1C_m + 1.1C_{\text{vacc}} + 1.1C_{\text{viento}}$$

$$\text{Diseño}_2 = 1.3C_m + 1.5C_{\text{vmax}}$$

Ecuación 6-4

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

---

$$Diseño_3^* = 1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 C_{sismoX} + 0.33 C_{sismoY}$$

Donde:

C<sub>m</sub>: Carga muerta total.

C<sub>vacc</sub>: Carga viva accidental.

C<sub>vmax</sub>: Carga viva máxima.

C<sub>viento</sub>: Carga de viento.

C<sub>sismoX</sub>: Cargas de sismo en la dirección X.

C<sub>sismoY</sub>: Cargas de sismo en la dirección Y.

\*: Combinación de carga que será aplicada solo en el modelo de SAP2000

### 6.5.15 Resumen de comportamiento de cada individuo

Para cada una de las torres de helióstatos analizada dentro de la población se obtendrán los criterios de comportamiento a utilizar en el algoritmo genético.

El primer valor estará comprendido por el resultado de la función objetivo, es decir, por el peso propio de la torre.

El segundo valor será la relación entre el desplazamiento máximo lateral producto de las fuerzas de servicio de viento entre su permisible, es decir, con la combinación "Servicio 1". El desplazamiento máximo permisible marcado por el RCDF NTC2017 para fuerzas de viento es de 0.005 veces la altura para estructuras cuyos desplazamientos no afecten otros elementos. Para este ejemplo el desplazamiento permisible para una altura de 30 metros es de 15 cms. El factor de comportamiento está establecido mediante la Ecuación 6-5.

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

---

$$\text{Valor 2} = \frac{D_{act}}{D_{perm}}$$

Ecuación 6-5

Donde:

Dact: Desplazamiento actuante producto de combinación Servicio1.

Dperm: Desplazamiento permisible (en este caso 15 cms).

Para el tercer valor, se obtendrán las fuerzas axiales a tensión actuantes de la combinación "Diseño 2" para todos los elementos cuyo comportamiento sea exclusivo bajo fuerzas axiales (contraventeos y rigidizantes), posteriormente se dividirán dichas fuerzas de cada elemento entre su respectiva fuerza resistente a tensión  $R_T$ . El tercer valor se obtendrá del cociente máximo de todos los elementos calculado con la Ecuación 6-6.

$$\text{Valor 3} = \frac{F_U}{R_T}$$

Ecuación 6-6

Donde:

$F_U$ : Fuerza actuante a tensión del elemento i.

$R_T$ : Fuerza resistente a tensión del elemento i.

Para el cuarto valor, se obtendrán las fuerzas axiales a compresión actuantes de la combinación "Diseño 2" para todos los elementos cuyo comportamiento sea exclusivo bajo fuerzas axiales (contraventeos y rigidizantes), posteriormente se dividirán dichas fuerzas de cada elemento entre su respectiva fuerza resistente a compresión  $R_C$ . El cuarto valor se obtendrá del cociente máximo de todos los elementos calculado con la Ecuación 6-7.

$$\text{Valor 4} = \frac{F_U}{R_T}$$

Ecuación 6-7

Donde:

## ALGORITMO DE LA TORRE DE HELIOSTATOS

---

$F_u$ : Fuerza actuante a compresión del elemento  $i$ .

$R_c$ : Fuerza resistente a compresión del elemento  $i$ .

Para el quinto valor, se obtendrá el resultado de la combinación de esfuerzos de flexo-compresión actuantes de la combinación "Diseño 2". El quinto valor se obtendrá del valor máximo obtenido.

Para el sexto valor, se obtendrá el resultado de la combinación de esfuerzos de flexo-tensión actuantes de la combinación "Diseño 2". El sexto valor se obtendrá del valor máximo obtenido.

Para el séptimo valor, se obtendrá el resultado de la combinación de esfuerzos de flexo-cortante actuantes de la combinación "Diseño 2". El séptimo valor se obtendrá del valor máximo obtenido.

Los valores del octavo al doceavo se repiten igual que del tercero al séptimo, solo que ahora con la combinación "Diseño 1".

CAPITULO 7

**7. ALGORITMO  
GENETICO**

---

7.1 Generalidades

El algoritmo genético es programado en el programa MATLAB versión R2017a, donde se colocarán todas las matrices de información que se mostrarán en este capítulo, así como su procesamiento para poder obtener la solución al problema de optimización.

La programación del código genético se realiza siguiendo un código binario, donde su conversión a un sistema decimal se hace del cero en adelante. Por fines prácticos y de rápida vinculación a las tablas de perfiles, se iniciará la conversión del uno en adelante.

Toda la información mostrada en este capítulo se especifica en el código programado que se colocará en los anexos.

## 7.2 Variables o genes

### 7.2.1 Número de módulos con arriostadores

Para poder obtener el número de módulos que tendrán arriostadores en sus contraventeos, se va a evitar utilizar una variable continua, por lo que se dividirán el número de módulos en dos partes, y se redondeará ese valor para tener aproximadamente secciones iguales de la torre.

Se consideran dos partes ya que con este número se puede tener un seccionamiento práctico en campo, además de que con el valor nulo se pueda seguir utilizando un número bajo de bits en procesamiento. Se verificará que el valor siempre de mayor a la unidad.

La obtención del número de módulos por cada una de las secciones se muestra en la Ecuación 7-1.

$$Nms = \max\left(\text{round}\left(\frac{Nm}{2}\right), 1\right) \quad \text{Ecuación 7-1}$$

Donde:

Nms = Número de módulos por sección.

Nm = Número de módulos totales.

Round: Función de redondeo al décimo inmediato (superior o inferior).

Max: Toma el valor máximo entre dos o más valores.

Teniendo el número de módulos por sección, se determinará que sección de la torre tendrá arriostadores y cuáles no. Dicha distribución se muestra en la Tabla 7-1. Como se puede apreciar solo se ocupan 2 bits.

Tabla 7-1 Sección de la Torre a Arriostar

| <b>Código</b> | <b>#</b> | <b>Descripción</b>                |
|---------------|----------|-----------------------------------|
| 00            | 1        | Ninguna sección con arriostadores |
| 01            | 2        | Sección uno con arriostadores     |
| 10            | 3        | Sección dos con arriostadores     |
| 11            | 4        | Toda la torre con arriostadores   |

### 7.2.2 Perfiles ocupados para las columnas de la torre

Los perfiles que se colocarán se manejarán como variables discretas, para éstos se utilizan perfiles comerciales de la empresa Serviacer, la cual es proveedor de la región y a su vez es suministrada por la empresa Gerdau Corsa con distribución a nivel nacional.

Para las columnas se utilizarán perfiles HSS, los cuales serán de acero ASTM A500 Grado B. Con límite de fluencia de 2950 kg/cm<sup>2</sup> y esfuerzo último de 4070 kg/cm<sup>2</sup>.

Se colocan de lados iguales como restricción para buscar que la torre tenga un comportamiento homogéneo o similar en todas sus direcciones. Además de la facilidad de colocación, y de la creación de estructuras modulares, además de que disminuye las probabilidades de una mala colocación en obra.

Para su comportamiento a flexo-compresión, los perfiles colocados se comportan como secciones tipo 1, 2 o 3. Es decir, como secciones compactas o no-compactas, evitando que los perfiles sean secciones tipo 4, es decir, perfiles esbeltos. Para completar la lista de 32 variables, y para no tener que usar perfiles que no sean de fácil y rápido acceso, se repetirán los dos primeros perfiles.

Los perfiles a utilizar se muestran en la Tabla 7-2. Como se puede observar para dicha variable se ocuparán cinco bits del código binario.

Tabla 7-2 Perfiles HSS para columnas

| <b>Código</b> | <b>#</b> | <b>Denominación</b> |   |    |   |      | <b>Ancho</b><br>cm | <b>Espesor</b><br>mm | <b>Peso</b><br>kg/m |
|---------------|----------|---------------------|---|----|---|------|--------------------|----------------------|---------------------|
| 0             | 1        | 4                   | X | 4  | x | ½    | 10.16              | 12.7                 | 35.23               |
| 1             | 2        | 4                   | X | 4  | x | 3/8  | 10.16              | 9.53                 | 27.36               |
| 10            | 3        | 4                   | X | 4  | x | 5/16 | 10.16              | 7.94                 | 23.2                |
| 11            | 4        | 4                   | X | 4  | x | ¼    | 10.16              | 6.35                 | 18.87               |
| 100           | 5        | 5                   | X | 5  | x | ½    | 12.7               | 12.7                 | 45.29               |
| 101           | 6        | 5                   | X | 5  | x | 3/8  | 12.7               | 9.53                 | 34.91               |
| 110           | 7        | 5                   | X | 5  | x | 5/16 | 12.7               | 7.94                 | 29.49               |
| 111           | 8        | 5                   | X | 5  | x | ¼    | 12.7               | 6.35                 | 23.9                |
| 1000          | 9        | 5                   | X | 5  | x | 3/16 | 12.7               | 4.76                 | 18.16               |
| 1001          | 10       | 6                   | X | 6  | x | 5/8  | 15.24              | 15.88                | 67.62               |
| 1010          | 11       | 6                   | X | 6  | x | ½    | 15.24              | 12.7                 | 55.35               |
| 1011          | 12       | 6                   | X | 6  | x | 3/8  | 15.24              | 9.53                 | 42.46               |
| 1100          | 13       | 6                   | X | 6  | x | 5/16 | 15.24              | 7.94                 | 35.78               |
| 1101          | 14       | 6                   | X | 6  | x | ¼    | 15.24              | 6.35                 | 28.94               |
| 1110          | 15       | 6                   | X | 6  | x | 3/16 | 15.24              | 4.76                 | 21.94               |
| 1111          | 16       | 8                   | X | 8  | x | 5/8  | 20.32              | 15.88                | 92.78               |
| 10000         | 17       | 8                   | X | 8  | x | ½    | 20.32              | 12.7                 | 75.48               |
| 10001         | 18       | 8                   | X | 8  | x | 3/8  | 20.32              | 9.53                 | 57.56               |
| 10010         | 19       | 8                   | X | 8  | x | 5/16 | 20.32              | 7.94                 | 48.36               |
| 10011         | 20       | 8                   | X | 8  | x | ¼    | 20.32              | 6.35                 | 39                  |
| 10100         | 21       | 10                  | x | 10 | x | 5/8  | 25.4               | 15.88                | 117.94              |
| 10101         | 22       | 10                  | x | 10 | x | ½    | 25.4               | 12.7                 | 95.61               |
| 10110         | 23       | 10                  | x | 10 | x | 3/8  | 25.4               | 9.53                 | 72.65               |
| 10111         | 24       | 10                  | x | 10 | x | 5/16 | 25.4               | 7.94                 | 60.94               |

|       |    |    |   |    |   |     |       |       |        |
|-------|----|----|---|----|---|-----|-------|-------|--------|
| 11000 | 25 | 12 | x | 12 | x | 5/8 | 30.48 | 15.88 | 143.1  |
| 11001 | 26 | 12 | x | 12 | x | ½   | 30.48 | 12.7  | 115.74 |
| 11010 | 27 | 12 | x | 12 | x | 3/8 | 30.48 | 9.53  | 87.75  |
| 11011 | 28 | 14 | x | 14 | x | ½   | 35.56 | 12.7  | 133.5  |
| 11100 | 29 | 14 | x | 14 | x | 3/8 | 35.56 | 9.53  | 101.4  |
| 11101 | 30 | 16 | x | 16 | x | ½   | 40.64 | 12.7  | 153.7  |
| 11110 | 31 | 4  | x | 4  | x | ½   | 10.16 | 12.7  | 35.23  |
| 11111 | 32 | 4  | x | 4  | x | 3/8 | 10.16 | 9.53  | 27.36  |

### 7.2.3 Perfiles ocupados para las vigas de la torre

Los perfiles que se colocarán se manejarán como variables discretas, para éstos se utilizan perfiles comerciales de la empresa Serviacer, la cual es proveedor de la región y a su vez es suministrada por la empresa Gerdau Corsa con distribución a nivel nacional.

Para las vigas se utilizarán perfiles HSS, los cuales serán de acero ASTM A500 Grado B. Con límite de fluencia de 2950 kg/cm<sup>2</sup> y esfuerzo último de 4070 kg/cm<sup>2</sup>.

Para las vigas se utilizarán perfiles rectangulares para disminuir los pesos y aumentar la inercia en una mayor magnitud donde se necesita más, además de darle un aspecto más estético a la torre y facilitar el manejo de los perfiles en su colocación.

Los perfiles a utilizar se muestran en la Tabla 7-3. Como se puede observar para dicha variable se ocuparán cuatro bits del código binario.

Tabla 7-3 Perfiles HSS para Vigas

| <b>Código</b> | <b>#</b> | <b>Denominación</b> | <b>Peralte</b><br>cm | <b>Ancho</b><br>cm | <b>Espesor</b><br>mm | <b>Peso</b><br>kg/m |
|---------------|----------|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| 0000          | 1        | 5 x 3 x             | 1/4                  | 12.70              | 7.62                 | 18.87               |
| 0001          | 2        | 5 x 3 x             | 3/16                 | 12.70              | 7.62                 | 14.39               |
| 0010          | 3        | 6 x 4 x             | 1/2                  | 15.24              | 10.16                | 45.29               |
| 0011          | 4        | 6 x 4 x             | 3/8                  | 15.24              | 10.16                | 34.91               |
| 0100          | 5        | 6 x 4 x             | 5/16                 | 15.24              | 10.16                | 29.49               |
| 0101          | 6        | 6 x 4 x             | 1/4                  | 15.24              | 10.16                | 23.90               |
| 0110          | 7        | 6 x 4 x             | 3/16                 | 15.24              | 10.16                | 18.16               |
| 0111          | 8        | 8 x 3 x             | 1/4                  | 20.32              | 7.62                 | 26.42               |

|      |    |    |   |   |   |      |       |       |       |       |
|------|----|----|---|---|---|------|-------|-------|-------|-------|
| 1000 | 9  | 8  | x | 3 | x | 3/16 | 20.32 | 7.62  | 4.76  | 20.05 |
| 1001 | 10 | 8  | x | 4 | x | 1/2  | 20.32 | 10.16 | 12.70 | 55.35 |
| 1010 | 11 | 8  | x | 4 | x | 3/8  | 20.32 | 10.16 | 9.53  | 42.46 |
| 1011 | 12 | 8  | x | 4 | x | 1/4  | 20.32 | 10.16 | 6.35  | 28.94 |
| 1100 | 13 | 8  | x | 6 | x | 1/2  | 20.32 | 15.24 | 12.70 | 65.42 |
| 1101 | 14 | 8  | x | 6 | x | 3/8  | 20.32 | 15.24 | 9.53  | 50.01 |
| 1110 | 15 | 8  | x | 6 | x | 1/4  | 20.32 | 15.24 | 6.35  | 33.97 |
| 1111 | 16 | 10 | x | 4 | x | 3/8  | 25.40 | 10.16 | 9.53  | 48.53 |

#### 7.2.4 Perfiles ocupados para los contraventeos de la torre

Los perfiles que se colocarán se manejarán como variables discretas, para éstos se utilizan perfiles comerciales de la empresa Serviacero, la cual es proveedor de la región y a su vez es suministrada por la empresa Gerdau Corsa con distribución a nivel nacional.

Para los contraventeos se utilizarán perfiles PTR comercial, los cuales serán de acero ASTM A500 Grado A. Con límite de fluencia de 2320 kg/cm<sup>2</sup> y esfuerzo último de 3160 kg/cm<sup>2</sup>.

Se utilizarán perfiles PTR para disminuir los pesos y tener un arriostamiento en los nodos, además de darle un aspecto más estético a la torre y facilitar el manejo de los perfiles en su colocación. Al ser una estructura a base de módulos se consideran perfiles de alto calibre, considerando que al elaborar los módulos en taller se tendrán los cuidados para evitar perforar los perfiles con la soldadura.

Los perfiles a utilizar se muestran en la Tabla 7-4. Como se puede observar para dicha variable se ocuparán cuatro bits del código binario.

Tabla 7-4 Perfiles PTR para Contraventeos y Rigidizantes

| <b>Código</b> | <b>#</b> | <b>Denominación</b> |   |     |            | <b>Ancho</b> | <b>Espesor</b> | <b>Peso</b> |
|---------------|----------|---------------------|---|-----|------------|--------------|----------------|-------------|
| 0000          | 1        | 1 1/2               | X | 1 ½ | Calibre 12 | 3.81 cm      | 2.70 mm        | 2.98 kg/m   |
| 0001          | 2        | 1 1/2               | X | 1 ½ | Calibre 11 | 3.81 cm      | 3.00 mm        | 3.29 kg/m   |
| 0010          | 3        | 1 1/2               | X | 1 ½ | Calibre 9  | 3.81 cm      | 3.80 mm        | 4.07 kg/m   |
| 0011          | 4        | 2                   | X | 2   | Calibre 12 | 5.08 cm      | 2.70 mm        | 4.05 kg/m   |
| 0100          | 5        | 2                   | X | 2   | Calibre 11 | 5.08 cm      | 3.00 mm        | 4.47 kg/m   |
| 0101          | 6        | 2                   | X | 2   | Calibre 9  | 5.08 cm      | 3.80 mm        | 5.57 kg/m   |

|      |    |       |   |     |         |      |         |         |            |
|------|----|-------|---|-----|---------|------|---------|---------|------------|
| 0110 | 7  | 2 1/2 | X | 2 ½ | Calibre | 11   | 6.35 cm | 3.00 mm | 5.66 kg/m  |
| 0111 | 8  | 2 1/2 | X | 2 ½ | Calibre | 9    | 6.35 cm | 3.80 mm | 7.08 kg/m  |
| 1000 | 9  | 2 1/2 | X | 2 ½ | Calibre | 7    | 6.35 cm | 4.80 mm | 8.79 kg/m  |
| 1001 | 10 | 3     | X | 3   | Calibre | 11   | 7.62 cm | 3.00 mm | 6.85 kg/m  |
| 1010 | 11 | 3     | X | 3   | Calibre | 9    | 7.62 cm | 3.80 mm | 8.58 kg/m  |
| 1011 | 12 | 3     | X | 3   | Calibre | 7    | 7.62 cm | 4.80 mm | 10.69 kg/m |
| 1100 | 13 | 3 1/2 | X | 3 ½ | Calibre | 11   | 8.89 cm | 3.00 mm | 8.04 kg/m  |
| 1101 | 14 | 3 1/2 | X | 3 ½ | Calibre | 9    | 8.89 cm | 3.80 mm | 10.09 kg/m |
| 1110 | 15 | 3 1/2 | X | 3 ½ | Calibre | 7    | 8.89 cm | 4.80 mm | 12.59 kg/m |
| 1111 | 16 | 3 1/2 | X | 3 ½ | Espesor | 0.25 | 8.89 cm | 6.40 mm | 16.47 kg/m |

### 7.2.5 Perfiles ocupados para los rigidizantes de la torre

Los perfiles que se colocarán se manejarán como variables discretas, para éstos se utilizan perfiles comerciales de la empresa Serviacer, la cual es proveedor de la región y a su vez es suministrada por la empresa Gerdau Corsa con distribución a nivel nacional.

Para los rigidizantes se utilizarán perfiles PTR comercial, los cuales serán de acero ASTM A500 Grado A. Con límite de fluencia de 2320 kg/cm<sup>2</sup> y esfuerzo último de 3160 kg/cm<sup>2</sup>.

Se utilizarán perfiles PTR para disminuir los pesos y disminuir el factor de esbeltez de los rigidizantes, además de darle un aspecto más estético a la torre y brindar una mayor rigidez global. Al ser una estructura a base de módulos se consideran perfiles de alto calibre, considerando que al elaborar los módulos en taller se tendrán los cuidados para evitar perforar los perfiles con la soldadura.

Los perfiles a utilizar se muestran en la Tabla 7-4. Como se puede observar para dicha variable se ocuparán cuatro bits del código binario.

### 7.3 Código por individuo

Cada uno de los individuos va a involucrar todas las variables o genes, por lo que el acomodo de éstas será como se muestra en la Figura 7-1. Teniendo un total de 36 bits formado por 9 variables.

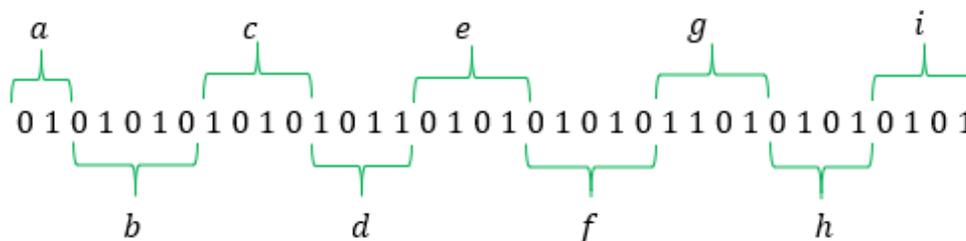


Figura 7-1 Acomodo de variables (genes) de individuo

Donde:

- a: Variable de secciones a arriostrar de la torre.
- b: Variable de perfil de las columnas de la sección inferior de la torre.
- c: Variable de perfil de las vigas de la sección inferior de la torre.
- d: Variable de perfil de los contraventeos de la sección inferior de la torre.
- e: Variable de perfil de los rigidizantes de la sección inferior de la torre.
- f: Variable de perfil de las columnas de la sección superior de la torre.
- g: Variable de perfil de las vigas de la sección superior de la torre.
- h: Variable de perfil de los contraventeos de la sección superior de la torre.
- i: Variable de perfil de los rigidizantes de la sección superior de la torre.

## 7.4 Matriz de población inicial

### 7.4.1 Matriz binaria de población

Se define de inicio la cantidad de individuos que se van a considerar para la ejecución del algoritmo genético, donde para este caso se usarán cien individuos. Por lo que se creará una matriz MPA (Matriz de población aleatoria) formada exclusivamente de ceros y unos colocado de forma aleatoria, para formar cien filas (Tamaño máximo de la población) con treinta y seis columnas (Número de bits por individuo). Un ejemplo de la matriz MPA se muestra en la Figura 7-2.

| #   | 1   | 2   | 3   | 4   | ... | 36  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1   | 1   | 1   | 0   | 0   | ... | 0   |
| 2   | 0   | 0   | 1   | 1   | ... | 0   |
| 3   | 1   | 1   | 0   | 1   | ... | 1   |
| 4   | 1   | 0   | 1   | 0   | ... | 1   |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 100 | 0   | 0   | 1   | 1   | ... | 1   |

Figura 7-2 Ejemplo de matriz MPA

Para sintetizar lo antes mostrado, el valor  $MPA(1,1 \text{ y } 2) = 11$  equivale al valor binario de la variable "a" del individuo uno.

### 7.4.2 Matriz base decimal de población

Para poder trabajar con los valores de la matriz de población, se convierte de base binaria a base decimal. Por lo que se genera una matriz MPD (Matriz de población base decimal) formada por número de base decimal, teniendo como valor máximo la cantidad de valores de cada variable, es decir, la variable "a" cuenta solo con posibilidades de 1 a 4, la variable "b" cuenta con posibilidad del 1 a 32, la variable "c" con posibilidades del 1 a 16, y continuando con la misma lógica.

La matriz antes mencionada estará conformada por cien filas (Tamaño máximo de población), y por nueve columnas (Número de variables). Un ejemplo de la matriz MPD se muestra en la Figura 7-3.

| #   | 1   | 2   | 3   | 4   | ... | 9   |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1   | 3   | 1   | 3   | 5   | ... | 5   |
| 2   | 1   | 24  | 8   | 3   | ... | 7   |
| 3   | 3   | 18  | 11  | 16  | ... | 15  |
| 4   | 1   | 10  | 16  | 12  | ... | 8   |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 100 | 1   | 32  | 5   | 1   | ... | 8   |

Figura 7-3 Ejemplo de matriz MPD

Como se puede apreciar en la matriz anterior, el valor  $MPD(100,2)=32$  hace referencia a la variable “b”, donde el valor 32 hace referencia a un perfil HSS 4”x4”x3/8”. A su vez, el valor  $MPD(4,10) = 8$  hace referencia a la variable “i”, donde el valor 8 hace referencia a un PTR 2 ½” x 2 ½” Calibre 9.

### 7.4.3 Matriz de población con valores reales

Dentro del algoritmo de la torre de helióstatos lo que se van a utilizar van a ser valores reales, por lo que es necesario convertir los valores de cada una de las variables en los factores que se van a utilizar, es decir, en los valores reales de cada uno de los perfiles según corresponda. Los factores a utilizar por cada variable se muestran en la Tabla 7-5.

Tabla 7-5 Factores a utilizar por variable

| <b>Variable</b> | <b>Descripción</b>           | <b>Factores a utilizar</b> |
|-----------------|------------------------------|----------------------------|
| A               | Sección con rigidizantes     | 1 – 4                      |
| B               | Columnas parte inferior      | Ancho y espesor            |
| C               | Vigas parte inferior         | Ancho, peralte y espesor   |
| D               | Contraventeos parte inferior | Ancho y espesor            |
| E               | Rigidizantes parte inferior  | Ancho y espesor            |
| F               | Columnas parte superior      | Ancho y espesor            |

|   |                              |                          |
|---|------------------------------|--------------------------|
| G | Vigas Parte superior         | Ancho, peralte y espesor |
| H | Contraventeos parte superior | Ancho y espesor          |
| I | Rigidizantes parte superior  | Ancho y espesor          |

Con esta información se genera la matriz MVRE (Matriz de población de valores reales), la cual tendrá cien filas (tamaño de individuos de la población) y diecinueve columnas (numero de la suma de todos los factores de todas las variables). Esto se puede observar en la Figura 7-4.

| #   | 1   | 2   | 3     | 4     | ... | 19   |
|-----|-----|-----|-------|-------|-----|------|
| 1   | 2   | 3   | 10.16 | 12.7  | ... | 3.00 |
| 2   | 1   | 1   | 25.4  | 9.53  | ... | 3.00 |
| 3   | 3   | 3   | 20.32 | 9.53  | ... | 4.80 |
| 4   | 2   | 1   | 15.24 | 15.88 | ... | 3.80 |
| ... | ... | ... | ...   | ...   | ... | ...  |
| 100 | 4   | 1   | 30.48 | 6.35  | ... | 3.80 |

Figura 7-4 Ejemplo de matriz MVRE

### 7.5 Función Objetivo

Una vez que la población inicial antes obtenida se ingresa en el algoritmo de la torre de helióstatos, se obtiene una matriz de población binaria junto con los resultados de la función objetivo de cada uno de los individuos. A dicho arreglo se le denominará matriz MFOI Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 7-5.

| #   | 1   | 2   | 3   | 4   | ... | 36  | F.O. |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 1   | 1   | 1   | 0   | 0   | ... | 0   | 25.4 |
| 2   | 0   | 0   | 1   | 1   | ... | 0   | 34.6 |
| 3   | 1   | 1   | 0   | 1   | ... | 1   | 12.1 |
| 4   | 1   | 0   | 1   | 0   | ... | 1   | 58.9 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ...  |
| 100 | 0   | 0   | 1   | 1   | ... | 1   | 18.1 |

Figura 7-5 Ejemplo de matriz MFOI

## 7.6 Penalización

Para garantizar que la función objetivo cumpla con el RCDF NTC2017, los valores obtenidos deben multiplicarse por una penalización. La penalización total (PETO) será el producto de los valores dos al doceavo, obtenidos en el subcapítulo 6.5.15.

De los valores de PETO de todos los individuos, se obtienen el valor máximo y el valor mínimo. Incrementando la diferencia entre ambos valores, se amplificarán en un valor de 1000, y se le asignará un valor respectivo de penalización a la función objetivo de cada torre. La penalización de cada individuo puede observarse en la Ecuación 7-2.

$$F.O.A_i = F.O._i * \left( \left( \frac{PETO_i - \min(PETO)}{\max(PETO) - \min(PETO)} \right) * 1000 + 1 \right) \quad \text{Ecuación 7-2}$$

Donde:

F.O.A.i: Función Objetivo Amplificada por individuo.

F.O.i : Función Objetivo Simple por individuo.

PETOi: Penalización total por individuo.

Min(PETO): Valor mínimo de entre todos los individuos de la población.

Max(PETO): Valor máximo de entre todos los individuos de la población.

## 7.7 Evolución del algoritmo genético

El algoritmo genético es propenso a conducirse a mínimos locales, por lo que se ha propuesto un método mediante el cual cuando el algoritmo genético cae en un mínimo local, éste se auto-modifica en busca de tener poblaciones con una mayor

dispersión de individuos distintos, con el fin de poder salir del mínimo local y poder obtener el individuo perteneciente al mínimo global.

Para ello, a las cinco generaciones se le asignará un factor genético (FAGE) con valor de 1. A partir de la sexta generación y con aplicación a todas las generaciones, si la mejor torre de cada generación es igual en las últimas cinco generaciones anteriores, a la nueva generación se le sumara una unidad al anterior valor de FAGE. Es decir, si en la generación n, las anteriores cinco generaciones (n-1, n-2, n-3, n-4 y n-5) tienen el mismo valor de peso de su mejor torre, la generación n tendrá un valor de FAGE = 2. En la misma situación anterior, si el peso de la mejor torre de la generación n es igual a sus 5 anteriores, la generación n+1 tendrá valor FAGE =3.

Si se deja de cumplir la condicionante en que las últimas cinco generaciones cuenten con el mismo valor de peso de sus mejores individuos, el valor FAGE se reinicia con valor de 1.

## 7.8 Selección de los individuos más aptos

### 7.8.1 Orden ascendente de los valores de la función objetivo amplificada

La matriz antes expuesta debe ordenarse en base a sus valores de la función objetivo amplificada, buscando que el menor valor (el valor más bajo del peso de la torre amplificado por su penalización) se encuentre en la primera fila, y ascendentemente se coloquen de tal forma que el valor mayor se encuentre en la última fila. A este arreglo se le nombra matriz MFOA, un ejemplo se puede observar en la Figura 7-6.

| #   | 1   | 2   | 3   | 4   | ... | 36  | F.O.A. |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| 1   | 1   | 1   | 0   | 1   | ... | 1   | 12.1   |
| 2   | 0   | 0   | 1   | 1   | ... | 1   | 18.1   |
| 3   | 1   | 1   | 0   | 0   | ... | 0   | 25.9   |
| 4   | 0   | 0   | 1   | 1   | ... | 0   | 37.2   |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ...    |
| 100 | 0   | 0   | 1   | 1   | ... | 1   | 58.9   |

Figura 7-6 Ejemplo de matriz MFOA

### 7.8.2 Selección natural condicionada de individuos

Para la selección de los individuos a reproducirse, se procede con un proceso de selección de los individuos más aptos (o en el caso de este trabajo, el de la selección de las torres con menor peso). Los individuos más aptos se reproducirán un mayor número de veces, y a los menos aptos se les eliminará del proceso de reproducción. El método a emplearse es una variante modificada de “Selección de estado uniforme”, basado en un método de selección por rangos, en el que los mejores individuos se reproducirán más de una vez.

La cantidad de veces que se reproducirán los mejores individuos se muestran en la Tabla 7-6.

Tabla 7-6 Cantidad de reproducciones

| <b># Individuo</b> | <b>Cantidad de reproducciones</b> |
|--------------------|-----------------------------------|
| 1                  | 10 veces                          |
| 2                  | 8 veces                           |
| 3                  | 6 veces                           |
| 4                  | 4 veces                           |
| 5                  | 2 veces                           |

La condición anterior aplica si el valor FAGE de la generación es igual a uno. En caso de que el valor FAGE sea mayor a la unidad, no se repetirá mas de una vez ningún valor.

Como se puede observar, para una población mejorada de padres, ya se tienen los primeros 30 espacios, y para conservar la misma cantidad de individuos que la población inicial, se toman los valores de los individuos del 6to al 76vo completando los 100 individuos.

Resumiendo, de la población expuesta en la matriz MFOA, los primeros 5 valores se reproducirán varias veces (en caso de que FAGE sea igual a la unidad), los 70 siguientes se reproducirán solo una vez, y los 25 restantes se eliminan del proceso de reproducción. A este nuevo arreglo se le denominará matriz MPO3, para esta nueva matriz se quitará la columna de los resultados de la función objetivo.

### 7.9 Proceso de reproducción de los individuos

El proceso de reproducción se realizará mediante la elección de dos individuos (padres) de la matriz MPO3 para que entre ellos se crucen y se obtengan dos individuos nuevos (hijos). El proceso se realizará de un corte, es decir, los nuevos individuos (hijos) estarán conformadas por solo una parte de un padre y su complemento producto de otro padre.

Para la elección de los padres, el primer par será el primer individuo de la matriz MPO3 y el segundo padre será el último individuo de la matriz MPO3. El segundo par estará conformado por el segundo individuo de la matriz MPO3 y el segundo padre por el penúltimo individuo de la matriz MPO3. La selección de los siguientes pares continua con el mismo proceso antes descrito.

De cada par de padres se crearán dos hijos, donde el primer hijo estará conformado por los primeros cinco genes (los 19 primeros bits) del primer padre y los últimos 4 genes (sus últimos 17 bits) del segundo padre. El segundo hijo obtendrá los valores restantes que no ocupó el primer hijo, es decir, los primeros cinco genes del segundo padre y los últimos cuatro genes del primer padre.

Para ejemplificarlo se señala a un primer padre en la Figura 7-7 marcando como valores "A" sus primeros cinco genes y como "B" a sus últimos cuatro genes. También se muestra a un segundo padre en la Figura 7-8 marcando como valores "C" a sus primeros cinco genes y como "D" a sus últimos cuatro genes.

El primer hijo (Figura 7-9) estará conformado respectivamente por los valores "A" y "D". Y el segundo hijo (Figura 7-10) por los valores "C" y "B" respectivamente.

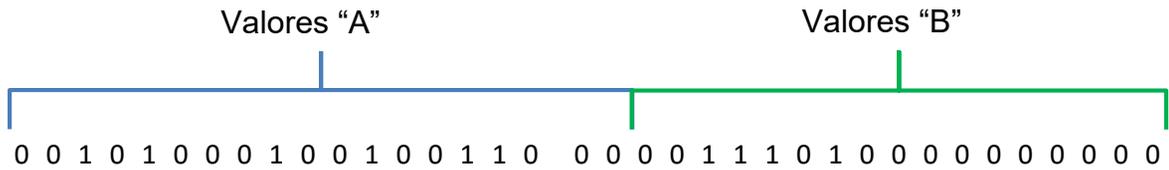


Figura 7-7 Ejemplo de primer padre

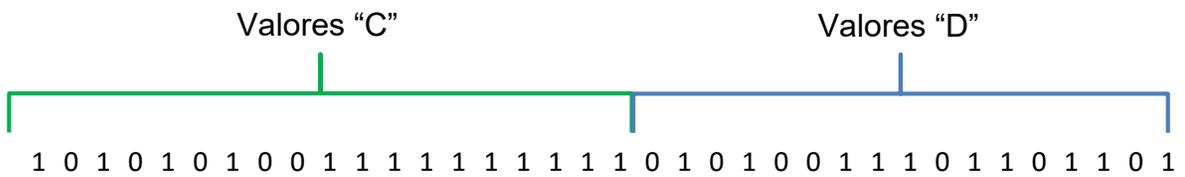


Figura 7-8 Ejemplo de segundo padre

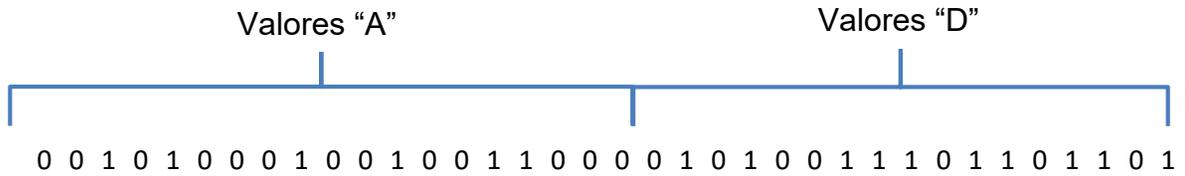


Figura 7-9 Ejemplo de primer hijo

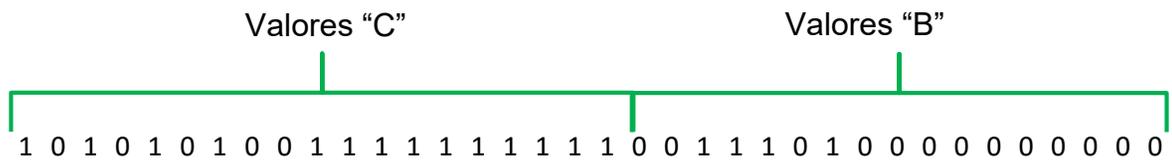


Figura 7-10 Ejemplo de segundo hijo

Con el proceso antes descrito se conforma la matriz de hijos denominada MPO4.

### 7.10 Conformación de nueva población

La nueva generación estará conformada por una mezcla entre los hijos (MPO4) provenientes del proceso de reproducción y los mejores individuos de la generación de padres (MFOA).

Para el caso de que la generación tenga un valor FAGE igual a la unidad, la nueva población (MPO5) estará conformada por los mejores 10 individuos de la población de padres (MFOA) y los 90 restantes se tomarán de los primeros 90 provenientes de la población de hijos (MPO4).

En caso de que el valor FAGE sea mayor a la unidad, la nueva generación (MPO5) se conformará por solo el mejor individuo de la generación de padres (MFOA) y los restantes se conformarán por los primeros 99 individuos de la población de hijos (MPO4).

### 7.11 Proceso de mutación

Para evitar llegar a mínimos locales en la función de optimización, se empelará un proceso de mutación. En este se variará un número MUT (que depende del número total de bits de la matriz MPO5) de bits de la matriz, la elección de los bits a modificar será de forma aleatoria. Donde si el bit elegido tiene valor de 1, se cambiará a 0 y viceversa.

La obtención de la cantidad de bits a mutar se muestra en la Ecuación 7-3. Donde dicho valor de mutación será incrementado por el factor genético FAGE de cada población.

$$MUT = round \left( \frac{N * M}{1000} \right) * FAGE \quad \text{Ecuación 7-3}$$

Donde:

MUT : Número de bits a mutar.

N : Número de renglones de la matriz MPO5.

M : Número de columnas de la matriz MPO5.

Round: Función de redondeo al entero inmediato (superior o inferior).

FAGE: Factor genético por generación.

### 7.12 Torre óptima y convergencia

Para cada generación se almacenará la primera torre de la matriz MFOA, siendo esta la mejor torre de dicha generación.

La matriz MPO5 ya después del proceso de mutación será analizada para evaluar su función objetivo. Y a partir de dicho punto se repite el proceso del algoritmo genético.

El algoritmo genético culmina cuando el factor FAGE de la última generación alcance un valor de 10. Es decir, cuando la mejor torre de las últimas 15 generaciones ya no haya sufrido ningún cambio.

CAPITULO 8

**8. RESULTADOS**

---

Producto de todo lo elaborado en los capítulos 5, 6 y 7 se obtiene como producto del algoritmo genético la configuración de la torre de helióstatos optimizada en su función objetivo de peso propio con las restricciones de diseño y servicio marcados en el RCDF NTC2017.

### 8.1 Resultados del algoritmo genético

El algoritmo genético finalizó en la generación 48, con un peso de la estructura optimizada de 9.782 Tn. El comportamiento del algoritmo a través de todas sus generaciones se puede apreciar en la Tabla 8-1, Tabla 8-2 y Tabla 8-3.

Tabla 8-1 Resultados del algoritmo genético

| <i>#Gen</i> | <i>V1 [Tn]</i> | <i>P.R.</i> | <i>P.O. [Ton]</i> | <i>F.R.</i> | <i>F.G.</i> |
|-------------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|
| 1           | 23.5790        | 1.8473      | 15.9320           | 1           | 1           |
| 2           | 21.6130        | 1.8505      | 14.0360           | 1           | 1           |
| 3           | 19.5300        | 1.9399      | 14.0360           | 1           | 1           |
| 4           | 18.1310        | 2.0371      | 14.0360           | 1           | 1           |
| 5           | 17.2490        | 2.0215      | 14.0360           | 1           | 1           |
| 6           | 17.0190        | 2.0023      | 14.0360           | 1           | 1           |
| 7           | 16.7640        | 1.6948      | 14.0360           | 1           | 1           |
| 8           | 16.5060        | 1.6842      | 12.5960           | 1           | 1           |
| 9           | 16.4130        | 1.655       | 12.5960           | 1           | 1           |
| 10          | 16.2390        | 1.6164      | 12.5960           | 1           | 1           |
| 11          | 15.8970        | 1.6034      | 12.5960           | 1           | 1           |
| 12          | 15.5110        | 1.5832      | 12.5960           | 1           | 1           |
| 13          | 15.1340        | 1.5477      | 12.5960           | 1           | 2           |
| 14          | 15.1750        | 1.549       | 11.1730           | 1           | 3           |
| 15          | 15.1570        | 1.5434      | 11.1730           | 1           | 1           |
| 16          | 14.8450        | 1.556       | 11.1730           | 1           | 1           |
| 17          | 14.5060        | 1.5631      | 10.8740           | 1           | 1           |
| 18          | 14.2470        | 1.5641      | 10.8740           | 1           | 1           |
| 19          | 13.9030        | 1.5719      | 10.6560           | 1           | 1           |
| 20          | 13.6940        | 1.5736      | 10.6560           | 1           | 1           |

## RESULTADOS

|    |         |        |         |   |    |
|----|---------|--------|---------|---|----|
| 21 | 13.5530 | 1.5793 | 10.6560 | 1 | 1  |
| 22 | 13.5170 | 1.5793 | 10.2660 | 1 | 1  |
| 23 | 13.4530 | 1.5915 | 10.2660 | 1 | 1  |
| 24 | 13.2610 | 1.5717 | 10.2660 | 1 | 1  |
| 25 | 13.2020 | 1.5725 | 10.2660 | 1 | 1  |
| 26 | 13.2060 | 1.5729 | 10.2660 | 1 | 1  |
| 27 | 13.1710 | 1.5729 | 10.2660 | 1 | 2  |
| 28 | 13.2150 | 1.5836 | 10.2660 | 1 | 3  |
| 29 | 13.5180 | 1.5572 | 10.2660 | 1 | 4  |
| 30 | 13.4750 | 1.565  | 9.9071  | 1 | 5  |
| 31 | 13.3470 | 1.5598 | 9.9071  | 1 | 1  |
| 32 | 13.2640 | 1.5587 | 9.9071  | 1 | 1  |
| 33 | 13.0310 | 1.559  | 9.9071  | 1 | 1  |
| 34 | 12.8880 | 1.5581 | 9.9071  | 1 | 1  |
| 35 | 12.8480 | 1.5581 | 9.7820  | 1 | 2  |
| 36 | 12.8600 | 1.5611 | 9.7820  | 1 | 1  |
| 37 | 12.7400 | 1.5286 | 9.7820  | 1 | 1  |
| 38 | 12.7270 | 1.5285 | 9.7820  | 1 | 1  |
| 39 | 12.7480 | 1.5289 | 9.7820  | 1 | 1  |
| 40 | 12.7410 | 1.5289 | 9.7820  | 1 | 2  |
| 41 | 12.7980 | 1.5142 | 9.7820  | 1 | 3  |
| 42 | 13.0380 | 1.5013 | 9.7820  | 1 | 4  |
| 43 | 13.0320 | 1.5    | 9.7820  | 1 | 5  |
| 44 | 13.0220 | 1.5121 | 9.7820  | 1 | 6  |
| 45 | 13.1650 | 1.5013 | 9.7820  | 1 | 7  |
| 46 | 13.3180 | 1.5061 | 9.7820  | 1 | 8  |
| 47 | 13.3190 | 1.513  | 9.7820  | 1 | 9  |
| 48 | 13.6160 | 1.5885 | 9.7820  | 1 | 10 |

Tabla 8-2 Resultados de combinación de carga "Servicio 1" y "Diseño 2"

| #Gen | V1 [Tn] | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 |
|------|---------|----|----|----|----|----|----|
|------|---------|----|----|----|----|----|----|

## RESULTADOS

---

|    |         |   |   |   |   |   |   |
|----|---------|---|---|---|---|---|---|
| 1  | 23.5790 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2  | 21.6130 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3  | 19.5300 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4  | 18.1310 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5  | 17.2490 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6  | 17.0190 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7  | 16.7640 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8  | 16.5060 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9  | 16.4130 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 16.2390 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 11 | 15.8970 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | 15.5110 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 13 | 15.1340 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 14 | 15.1750 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 15 | 15.1570 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 16 | 14.8450 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 17 | 14.5060 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 18 | 14.2470 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 19 | 13.9030 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 20 | 13.6940 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 21 | 13.5530 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 22 | 13.5170 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 23 | 13.4530 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 24 | 13.2610 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 25 | 13.2020 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 26 | 13.2060 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 27 | 13.1710 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 28 | 13.2150 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 29 | 13.5180 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 30 | 13.4750 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 31 | 13.3470 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 32 | 13.2640 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

## RESULTADOS

|    |         |   |   |   |   |   |   |
|----|---------|---|---|---|---|---|---|
| 33 | 13.0310 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 34 | 12.8880 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 35 | 12.8480 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 36 | 12.8600 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 37 | 12.7400 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 38 | 12.7270 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 39 | 12.7480 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 40 | 12.7410 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 41 | 12.7980 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 42 | 13.0380 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 43 | 13.0320 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 44 | 13.0220 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 45 | 13.1650 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 46 | 13.3180 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 47 | 13.3190 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 48 | 13.6160 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 8-3 Resultados de combinación de carga "Diseño 1"

| <b>#Gen</b> | <b>V1 [Tn]</b> | <b>V8</b> | <b>V9</b> | <b>V10</b> | <b>V11</b> | <b>V12</b> |
|-------------|----------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 1           | 23.5790        | 1.001     | 1.844     | 1          | 1          | 1          |
| 2           | 21.6130        | 1.0009    | 1.8476    | 1          | 1          | 1          |
| 3           | 19.5300        | 1.0005    | 1.938     | 1          | 1          | 1          |
| 4           | 18.1310        | 1.0014    | 2.033     | 1          | 1          | 1          |
| 5           | 17.2490        | 1.0006    | 2.0193    | 1          | 1          | 1          |
| 6           | 17.0190        | 1.0008    | 1.9995    | 1          | 1          | 1          |
| 7           | 16.7640        | 1.0013    | 1.6917    | 1          | 1          | 1          |
| 8           | 16.5060        | 1.0013    | 1.6811    | 1          | 1          | 1          |
| 9           | 16.4130        | 1.0015    | 1.6514    | 1          | 1          | 1          |
| 10          | 16.2390        | 1.0014    | 1.613     | 1          | 1          | 1          |
| 11          | 15.8970        | 1.0014    | 1.6       | 1          | 1          | 1          |
| 12          | 15.5110        | 1.0014    | 1.5798    | 1          | 1          | 1          |

## RESULTADOS

---

|    |         |        |        |   |   |   |
|----|---------|--------|--------|---|---|---|
| 13 | 15.1340 | 1.0014 | 1.5444 | 1 | 1 | 1 |
| 14 | 15.1750 | 1.0014 | 1.5457 | 1 | 1 | 1 |
| 15 | 15.1570 | 1.0011 | 1.5409 | 1 | 1 | 1 |
| 16 | 14.8450 | 1.0023 | 1.5504 | 1 | 1 | 1 |
| 17 | 14.5060 | 1.0025 | 1.557  | 1 | 1 | 1 |
| 18 | 14.2470 | 1.0026 | 1.5579 | 1 | 1 | 1 |
| 19 | 13.9030 | 1.003  | 1.5647 | 1 | 1 | 1 |
| 20 | 13.6940 | 1.0032 | 1.5658 | 1 | 1 | 1 |
| 21 | 13.5530 | 1.0032 | 1.5715 | 1 | 1 | 1 |
| 22 | 13.5170 | 1.0032 | 1.5714 | 1 | 1 | 1 |
| 23 | 13.4530 | 1.0032 | 1.5838 | 1 | 1 | 1 |
| 24 | 13.2610 | 1.0031 | 1.5641 | 1 | 1 | 1 |
| 25 | 13.2020 | 1.0031 | 1.5648 | 1 | 1 | 1 |
| 26 | 13.2060 | 1.0031 | 1.5652 | 1 | 1 | 1 |
| 27 | 13.1710 | 1.0031 | 1.5652 | 1 | 1 | 1 |
| 28 | 13.2150 | 1.0031 | 1.5759 | 1 | 1 | 1 |
| 29 | 13.5180 | 1.0032 | 1.5494 | 1 | 1 | 1 |
| 30 | 13.4750 | 1.0031 | 1.5574 | 1 | 1 | 1 |
| 31 | 13.3470 | 1.0031 | 1.5523 | 1 | 1 | 1 |
| 32 | 13.2640 | 1.003  | 1.5515 | 1 | 1 | 1 |
| 33 | 13.0310 | 1.003  | 1.5518 | 1 | 1 | 1 |
| 34 | 12.8880 | 1.0029 | 1.5512 | 1 | 1 | 1 |
| 35 | 12.8480 | 1.0029 | 1.5511 | 1 | 1 | 1 |
| 36 | 12.8600 | 1.0026 | 1.5547 | 1 | 1 | 1 |
| 37 | 12.7400 | 1.0026 | 1.5223 | 1 | 1 | 1 |
| 38 | 12.7270 | 1.0026 | 1.5221 | 1 | 1 | 1 |
| 39 | 12.7480 | 1.0026 | 1.5225 | 1 | 1 | 1 |
| 40 | 12.7410 | 1.0026 | 1.5226 | 1 | 1 | 1 |
| 41 | 12.7980 | 1.0026 | 1.5078 | 1 | 1 | 1 |
| 42 | 13.0380 | 1.0026 | 1.4949 | 1 | 1 | 1 |
| 43 | 13.0320 | 1.0023 | 1.4944 | 1 | 1 | 1 |
| 44 | 13.0220 | 1.0023 | 1.5066 | 1 | 1 | 1 |

## RESULTADOS

---

|    |         |        |        |   |   |   |
|----|---------|--------|--------|---|---|---|
| 45 | 13.1650 | 1.0023 | 1.4957 | 1 | 1 | 1 |
| 46 | 13.3180 | 1.0023 | 1.5005 | 1 | 1 | 1 |
| 47 | 13.3190 | 1.0019 | 1.5083 | 1 | 1 | 1 |
| 48 | 13.6160 | 1.0025 | 1.5825 | 1 | 1 | 1 |

---

Donde:

#Gen: Es el número de generación de cada población analizada.

V1: Primer valor, obtenido del promedio del peso de las poblaciones de cada generación analizada, en Toneladas.

V2: Segundo valor, obtenido del promedio del análisis de los desplazamientos obtenidos de la combinación "Servicio 1".

V3: Tercer valor, obtenido del promedio del análisis de los esfuerzos de tensión obtenidos de la combinación "Diseño 2".

V4: Cuarto valor, obtenido del promedio del análisis de los esfuerzos de compresión obtenidos de la combinación "Diseño 2".

V5: Quinto valor, obtenido del promedio del análisis de la interacción de esfuerzos de flexo-compresión obtenidos de la combinación "Diseño 2".

V6: Sexto valor, obtenido del promedio del análisis de la interacción de esfuerzos de flexo-tensión obtenidos de la combinación "Diseño 2".

V7: Séptimo valor, obtenido del promedio del análisis de la interacción de esfuerzos de flexo-cortante obtenidos de la combinación "Diseño 2".

V8: Octavo valor, obtenido del promedio del análisis de los esfuerzos de tensión obtenidos de la combinación "Diseño 1".

V9: Noveno valor, obtenido del promedio del análisis de los esfuerzos de compresión obtenidos de la combinación "Diseño 1".

V10: Décimo valor, obtenido del promedio del análisis de la interacción de esfuerzos de flexo-compresión obtenidos de la combinación “Diseño 1”.

V11: Décimo primer valor, obtenido del promedio del análisis de la interacción de esfuerzos de flexo-tensión obtenidos de la combinación “Diseño 1”.

V12: Décimo segundo valor, obtenido del promedio del análisis de la interacción de esfuerzos de flexo-compresión obtenidos de la combinación “Diseño 1”.

P.R: Promedio del producto de los valores de restricción de cada individuo por generación.

P.O.: Peso propio de la torre más ligera por generación, en toneladas.

F.R.: Factor de restricción total de la torre más ligera por generación.

F.G.: Factor genético por generación.

Para esquematizar los resultados se visualiza el comportamiento principal del algoritmo genético mediante la Figura 8-1, donde se grafica el promedio del peso propio de cada generación y su respectivo número de generación.

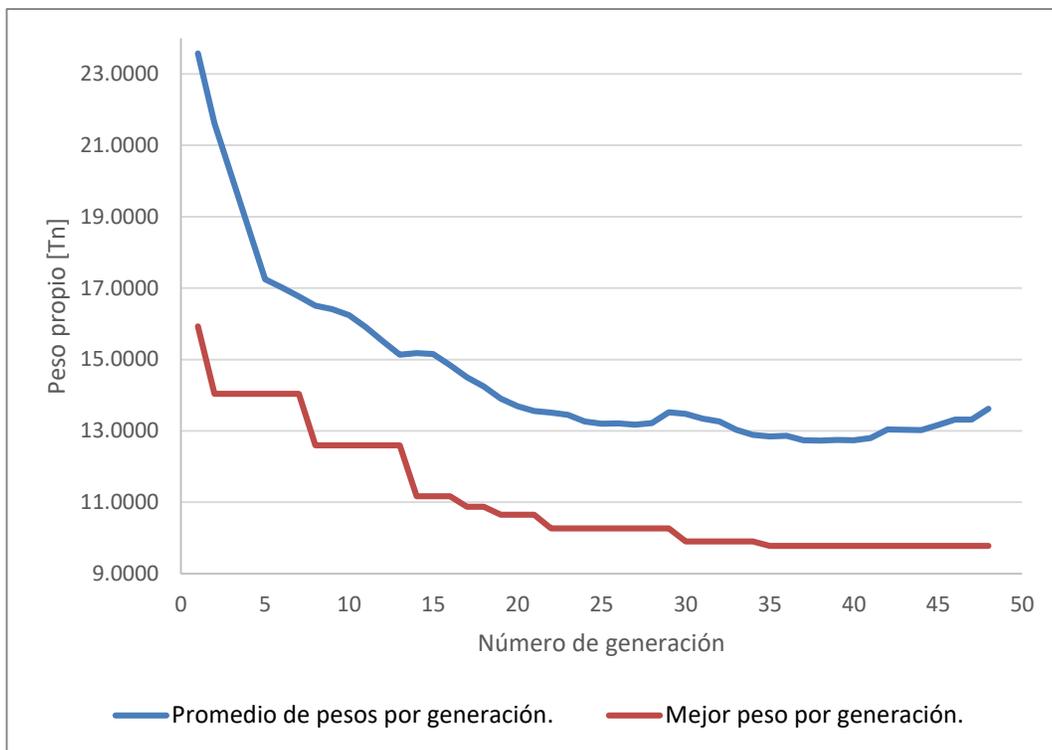


Figura 8-1 Algoritmo Genético: Gráfica de comportamiento del algoritmo.

Como ya se había establecido en el capítulo siete, el algoritmo genético llega a una solución que se considera la óptima global cuando el factor genético llega a un valor de 10 sin tener cambios en el peso de la torre más ligera por generación. El comportamiento del factor genético se muestra en la Figura 8-5.

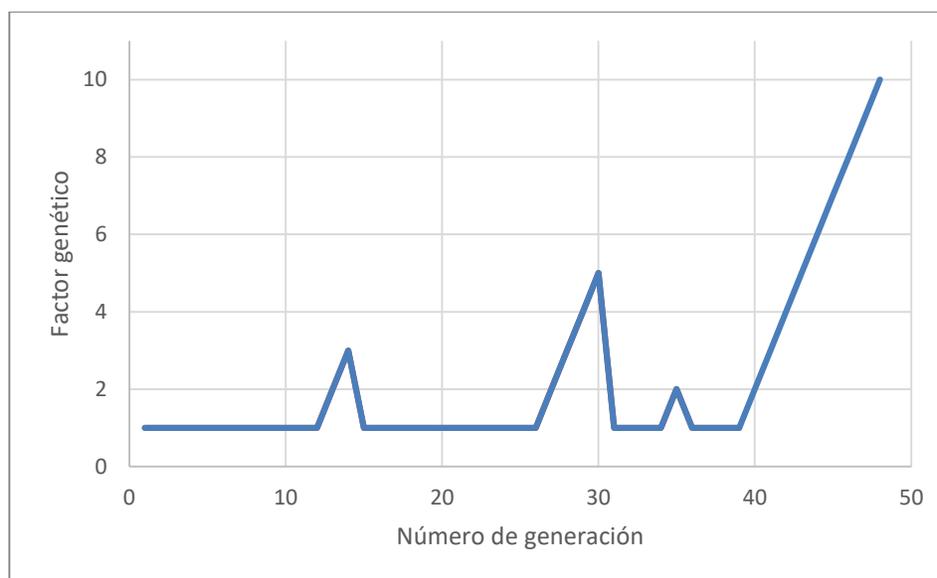


Figura 8-2 Algoritmo Genético: Gráfica de comportamiento del factor genético.

Los cambios en la Figura 8-2 Algoritmo Genético: Gráfica de comportamiento del factor genético. son en las generaciones donde se encuentra un mínimo local, es decir, donde el algoritmo genético muta hasta ampliar la población de análisis y poder salir del mínimo local en busca de la torre óptima en la solución óptima global.

Los desplazamientos obtenidos de la combinación de carga "Servicio 1" de las fuerzas de viento no superan el permitido en ninguna de las torres de ninguna de las poblaciones de todas las generaciones.

En el comportamiento de la combinación de carga "Diseño 2", el promedio de los comportamientos de las torres en respuesta a sus elementos mecánicos muestra que ninguna torre de ninguna de las generaciones supera lo establecido por el RCDF NTC2017.

En el promedio del comportamiento bajo la combinación "Diseño 1" de las poblaciones de las distintas generaciones se puede observar que los esfuerzos que

exceden lo marcado por los reglamentos son los de tensión y compresión. Dichos comportamientos se observan en la Figura 8-6.

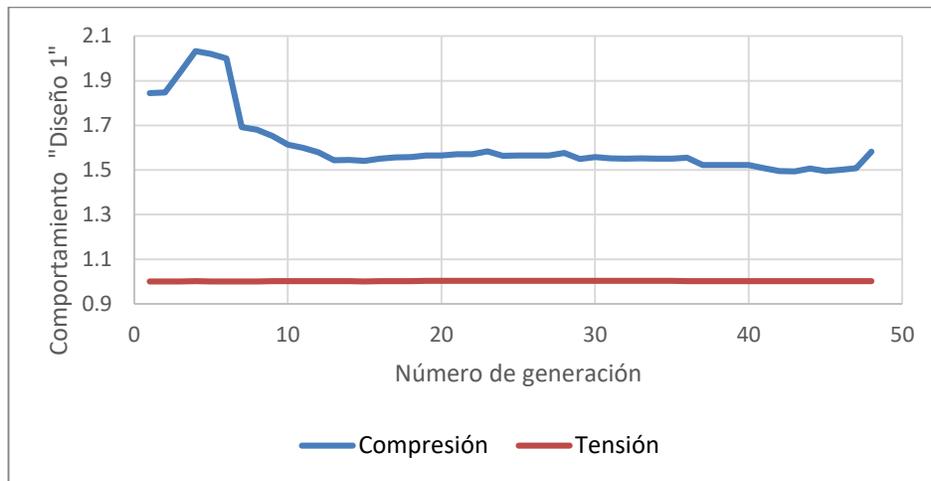


Figura 8-3 Algoritmo Genético: Gráfica de comportamiento de esfuerzos de compresión y tensión en la combinación “Diseño 1”.

El promedio del producto de las restricciones de cada individuo por cada generación se muestra en la Figura 8-7.

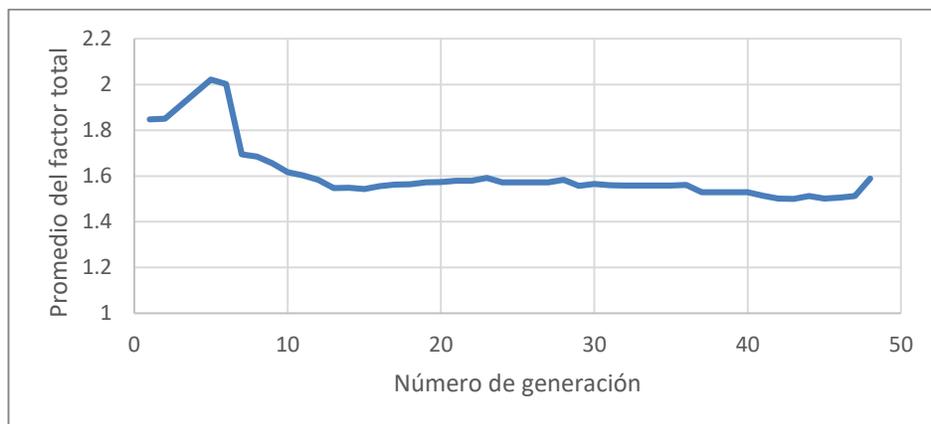


Figura 8-4 Algoritmo Genético: Gráfica de comportamiento de la restricción total.

## 8.2 Torre Optimizada en Peso con el A.G.

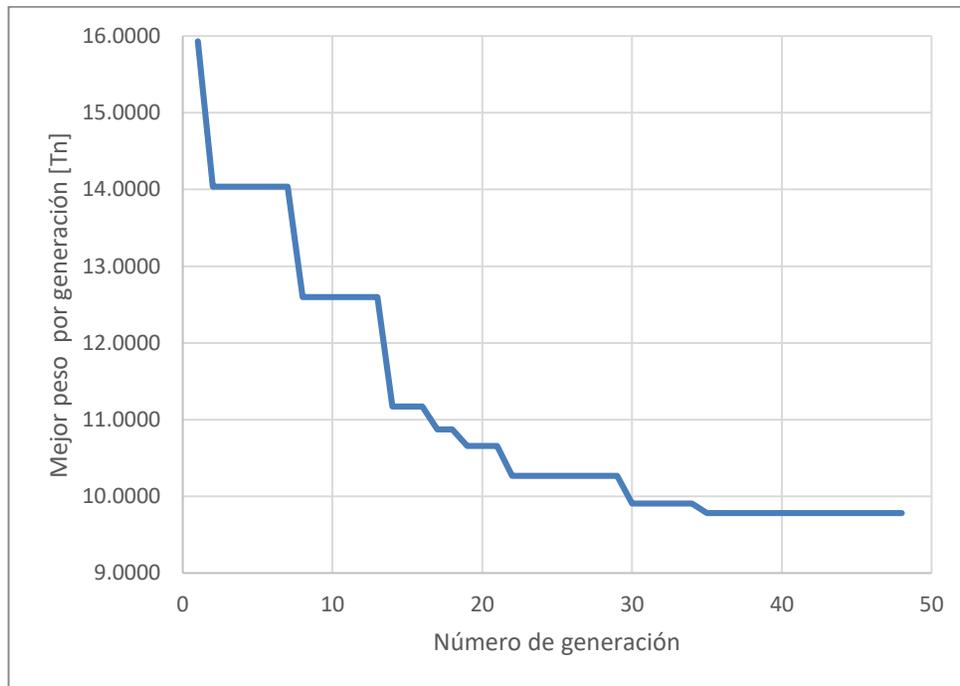
El algoritmo genético finalizó en la generación 48, pero desde la generación 35 se obtuvo la torre más ligera. Los valores discretos y características de las torres a través de las distintas generaciones se muestran en la Tabla 8-4.

Tabla 8-4 Resumen de Perfiles de A.G.

| #Gen             | 1                      | 2                     | 8                      | 14                     | 17                     | 19                     | 22                     | 30                     | 35                     |
|------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Peso [Tn]</b> | 15.93                  | 14.04                 | 12.60                  | 11.17                  | 10.87                  | 10.66                  | 10.27                  | 9.91                   | 9.78                   |
| <b>SEAR</b>      | 1                      | 4                     | 4                      | 4                      | 4                      | 4                      | 4                      | 4                      | 4                      |
| <b>Col. Inf</b>  | HSS<br>4"<br>x5/16"    | HSS<br>4"<br>x5/16"   | HSS<br>4"<br>x5/16"    | HSS<br>4"<br>x5/16"    | HSS<br>4"<br>x5/16"    | HSS<br>4"<br>x5/16"    | HSS<br>4"<br>x1/4"     | HSS<br>4"<br>x1/4"     | HSS<br>4"<br>x1/4"     |
| <b>Vig. Inf</b>  | HSS<br>6"x8"<br>x3/8"  | HSS<br>6"x8"<br>x1/4" | HSS<br>6"x8"<br>x1/4"  | HSS<br>4"x5"<br>x3/16" | HSS<br>4"x6"<br>x3/16" | HSS<br>4"x6"<br>x3/16" | HSS<br>4"x6"<br>x3/16" | HSS<br>4"x6"<br>x3/16" | HSS<br>4"x6"<br>x3/16" |
| <b>C.T. Inf</b>  | PTR<br>1.5"<br>Cal11   | PTR<br>1.5"<br>Cal9   | PTR<br>1.5"<br>Cal9    | PTR<br>1.5"<br>Cal9    | PTR<br>1.5"<br>Cal9    | PTR<br>1.5"<br>Cal12   | PTR<br>1.5"<br>Cal12   | PTR<br>1.5"<br>Cal12   | PTR<br>1.5"<br>Cal12   |
| <b>Rig Inf</b>   | PTR<br>3"<br>Cal11     | PTR<br>3"<br>Cal11    | PTR<br>3"<br>Cal11     | PTR<br>3"<br>Cal11     | PTR<br>3"<br>Cal11     | PTR<br>3"<br>Cal11     | PTR<br>3"<br>Cal11     | PTR<br>1.5"<br>Cal11   | PTR<br>1.5"<br>Cal11   |
| <b>Col. Sup</b>  | HSS<br>8"<br>x5/16"    | HSS<br>6"<br>x3/16"   | HSS<br>6"<br>x3/16"    | HSS<br>6"<br>x3/16"    | HSS<br>6"<br>x3/16"    | HSS<br>6"<br>x3/16"    | HSS<br>6"<br>x3/16"    | HSS<br>6"<br>x3/16"    | HSS<br>6"<br>x3/16"    |
| <b>Vig. Sup</b>  | HSS<br>3"x5"<br>x3/16" | HSS<br>4"x6"<br>x1/4" | HSS<br>3"x5"<br>x3/16" |
| <b>C.T. Sup</b>  | PTR<br>3"<br>Cal7      | PTR<br>2"<br>Cal9     | PTR<br>2"<br>Cal9      | PTR<br>2"<br>Cal9      | PTR<br>2"<br>Cal9      | PTR<br>2"<br>Cal9      | PTR<br>2"<br>Cal9      | PTR<br>2"<br>Cal9      | PTR<br>2"<br>Cal9      |
| <b>Rig Sup</b>   | PTR<br>3"<br>Cal7      | PTR<br>3.5"<br>Cal11  | PTR<br>3.5"<br>Cal11   | PTR<br>3.5"<br>Cal11   | PTR<br>2"<br>Cal11     | PTR<br>2"<br>Cal11     | PTR<br>2"<br>Cal11     | PTR<br>2"<br>Cal11     | PTR<br>1.5"<br>Cal12   |

El comportamiento de la mejor torre a través de las distintas generaciones se presenta en la Tabla 8-5.

Tabla 8-5 Comportamiento de la torre óptima por generación



La torre óptima mediante la función objetivo de peso, se obtuvo desde la generación 26. Donde su geometría se muestra en la Figura 8-5.

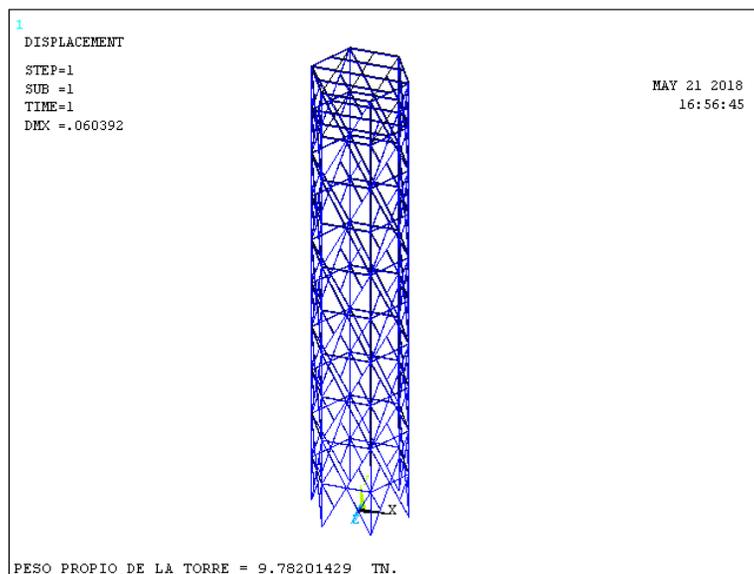


Figura 8-5 Geometría de la torre optimizada mediante AG

Los elementos mecánicos de la torre optimizada se expresan en las Figura 8-6, Figura 8-7 y Figura 8-8.

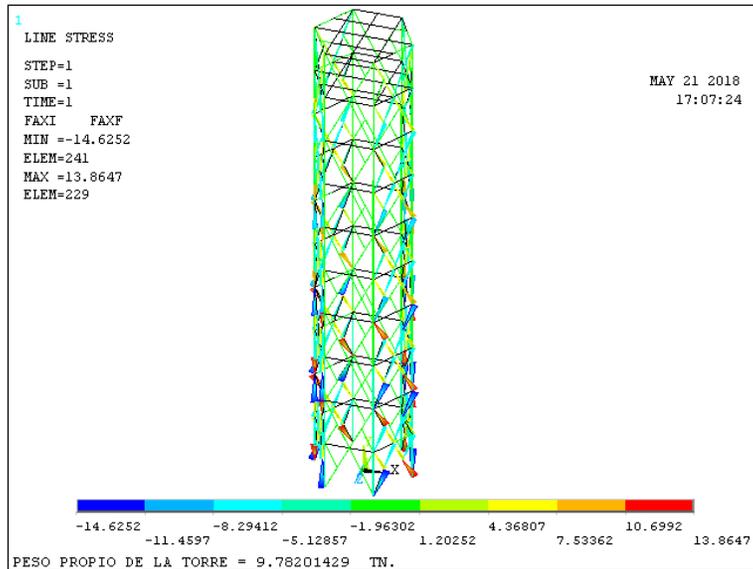


Figura 8-6 Fuerzas axiales en Torre Optimizada

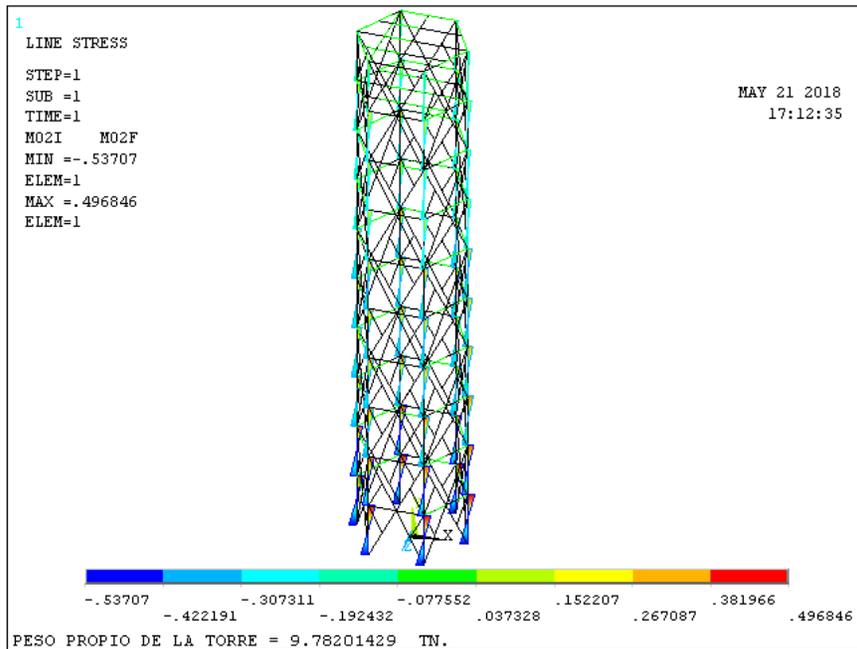


Figura 8-7 Momentos flexionantes en Torre Optimizada

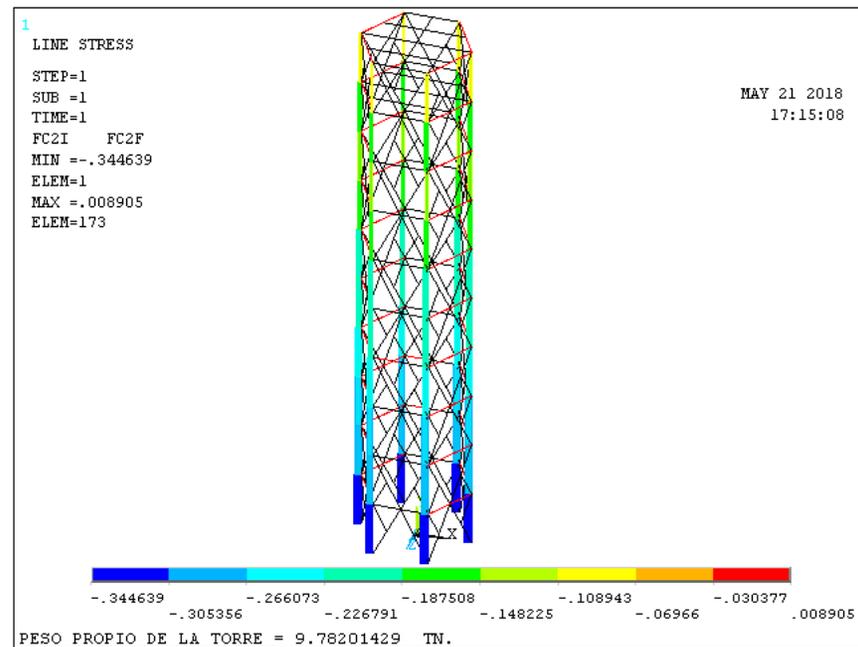


Figura 8-8 Fuerzas cortantes en Torre Optimizada

Como un resumen del análisis realizado a la torre optimizada, se presenta la Tabla 8-6.

Tabla 8-6 Revisión de comportamiento de torre óptima

| <i>Efecto</i>                              | <i>Permisible</i> | <i>Actuante</i> | <i>%Trabajo</i> |
|--|-------------------|-----------------|-----------------|
| Desplazamientos                            | 15.00 cms         | 6.04 cms        | 40.27%          |
| Cargas Gravitacionales<br>Tensión          | ---               | 0.00 Tn         | ---             |
| Cargas Gravitacionales<br>Compresión       | 10.29 Tn          | 0.37 Tn         | 3.60%           |
| Cargas Gravitacionales<br>Flexo-Compresión | ---               | ---             | 20.92%          |
| Cargas Gravitacionales<br>Flexo-Tensión    | ---               | ---             | 0.00%           |
| Cargas Gravitacionales<br>Flexo-Cortante   | ---               | ---             | 17.11%          |
|  | 16.27 Tn          | 9.27 Tn         | 56.99%          |

## RESULTADOS

---

|                                      |          |         |        |
|--------------------------------------|----------|---------|--------|
| Cargas de Viento<br>Tensión          |          |         |        |
| Cargas de Viento<br>Compresión       | 10.29 Tn | 9.95 Tn | 96.74% |
| Cargas de Viento<br>Flexo-Compresión | ---      | ---     | 26.42% |
| Cargas de Viento<br>Flexo-Tensión    | ---      | ---     | 23.37% |
| Cargas de Viento<br>Flexo-Cortante   | ---      | ---     | 15.29% |

---

CAPITULO 9

**9. DISCUSION DE  
RESULTADOS**

---

Para observar los resultados del algoritmo genético y análisis de este trabajo, se realiza una optimización mediante el software comercial SAP 2000 V16.

Para ello se elabora un modelo en dicho software utilizando la misma topología que la torre optimizada mediante el algoritmo genético, así como la misma configuración de sus distintas dimensiones.

Los perfiles que se le asignan fueron marcados por las tablas Tabla 7-2, Tabla 7-3 y Tabla 7-4 de la misma forma en que se usaron con el algoritmo genético. Los módulos se formaron igual que la torre optimizada con el A.G., buscando de igual forma que sean dos módulos distintos, donde cada módulo tenga el mismo perfil para todas sus columnas, el mismo perfil para todas sus vigas, el mismo perfil para sus contraventeos y el mismo para todos sus rigidizantes.

Para poder hacer una buena comparativa, se considera que la Torre Optimizada con el programa SAP 2000 contará con rigidizantes en todos sus módulos, de la misma forma que los tiene la torre optimizada con el A.G.

### 9.1 Torre Optimizada con el SAP 2000 (TOSAP)

Como ya se mencionó, la torre tendrá la misma topología y la misma configuración que la TOAG, la geometría se muestra en la Figura 9-1.

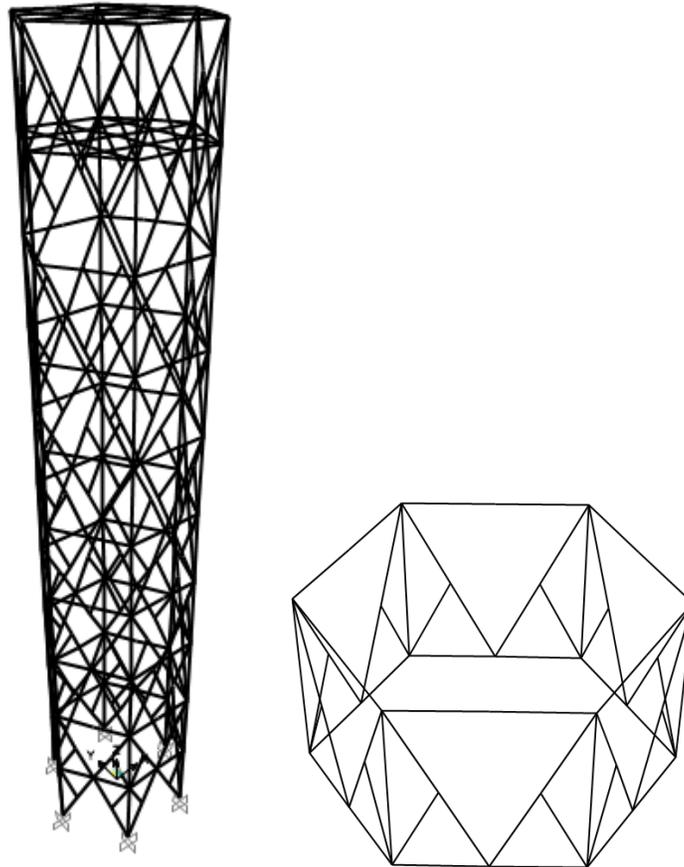


Figura 9-1 Geometría de la Torre Optimizada a optimizar con el SAP 2000. a) Geometría de la torre completa. b) Geometría de uno de los módulos.

Los valores de las fuerzas gravitacionales (muertas, vivas máximas y vivas accidentales) colocadas en la TOSAP tendrán las mismas magnitudes y la misma localización que la TOAG.

Como una primera iteración se colocaron las mismas magnitudes de las fuerzas de viento de la TOAG, esto al desconocer los perfiles que el programa determinaría como los óptimos. Una vez calculados dichos perfiles, se actualiza la optimización usando ya las dimensiones de los elementos y se verifica si dichos perfiles cambian. En caso de que cambien, se procede a recalcular las magnitudes de las fuerzas de viento hasta obtener los perfiles que resistan las fuerzas de viento actuantes sobre sus dimensiones.

La combinación crítica sobre la estructura es la combinación "Diseño 1", los elementos mecánicos producto de dicha combinación se muestran en la Figura 9-2.

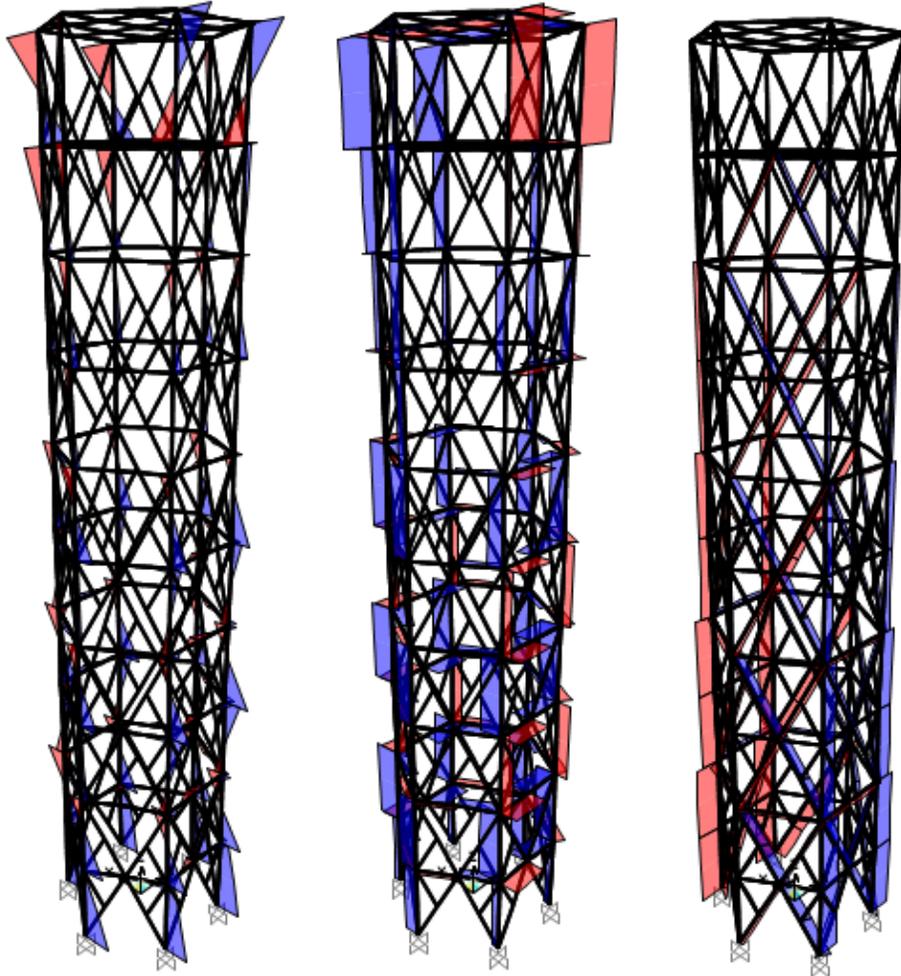


Figura 9-2 Elementos mecánicos de TOSAP en combinación "Diseño 2". a) Momentos Flexionantes. b) Cortantes. c) Fuerzas Axiales

Producto de la optimización en peso, los porcentajes de trabajo de los elementos de la torre se muestran en la Figura 9-3.

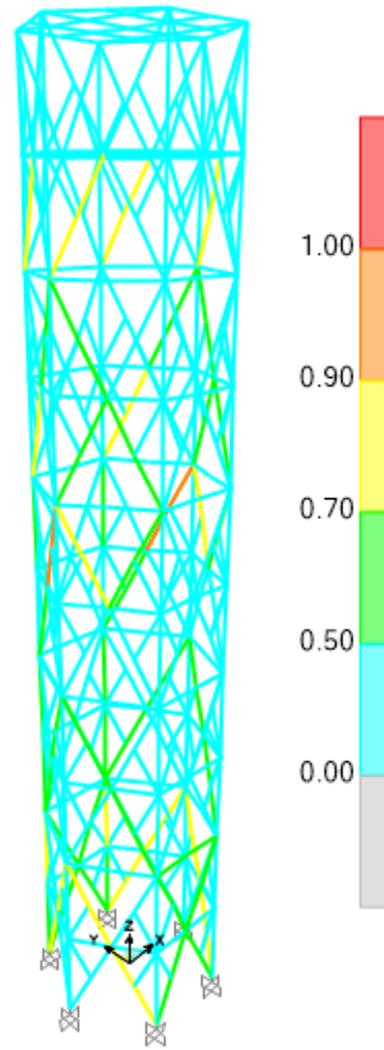


Figura 9-3 Porcentajes de trabajo de los elementos de la TOSAP

Como se puede observar, todos los elementos de la optimización trabajan a menos del 100% de su capacidad. Por lo que se considera que si se cumple con el RCDF NTC2017 (Administración Pública de la Ciudad de México, 2017).

Los perfiles obtenidos de dicha optimización se muestran en la Tabla 9-1. En la mismas se puede notar que el peso total de dicha torre es de 12.30 Tn.

Tabla 9-1 Perfiles y pesos de los elementos de la TOSAP

| <i>Posición</i> | <i>Perfil</i> | <i>Peso</i> |
|-----------------|---------------|-------------|
|-----------------|---------------|-------------|

## DISCUSION DE RESULTADOS

|                                  |                      |          |
|----------------------------------|----------------------|----------|
| Columna Inferior                 | HSS 6"x6"x1/4"       | 2.62 Tn  |
| Columna Superior                 | HSS 5"x5"x3/16"      | 1.64 Tn  |
| Viga Inferior y Superior         | HSS 3"x5"x3/16"      | 3.4904   |
| Contraventeo Inferior            | PTR 3.5"x3.5" Cal 7  | 2.5506   |
| Contraventeo Superior            | PTR 3"x3" Cal 11     | 1.3875   |
| Rigidizantes Inferior y Superior | PTR 1.5"x1.5" Cal 12 | 0.6039   |
| Total                            |                      | 12.30 Tn |

Bajo la combinación de "Servicio 1", se obtiene el desplazamiento máximo, el cual es de 14.15 cm. Dicho desplazamiento se denota en la Figura 9-4.

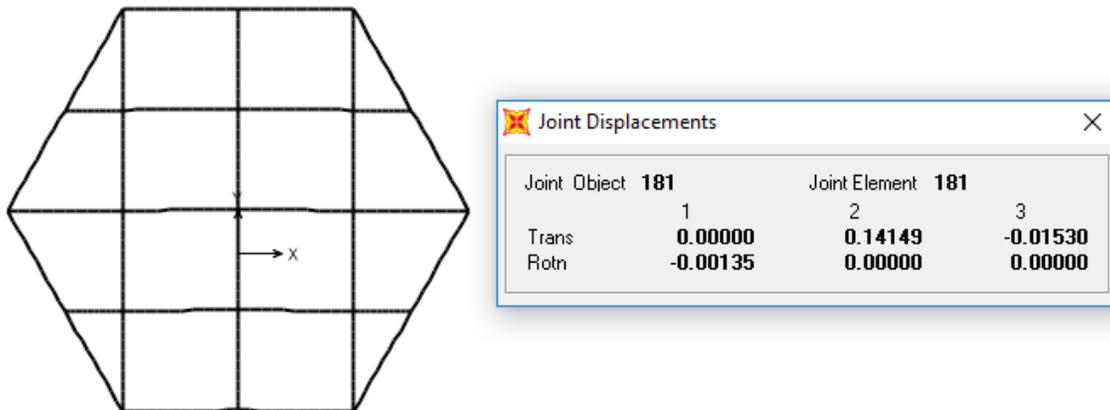


Figura 9-4 Desplazamientos máximos en la parte superior de la TOSAP

### 9.2 Comparativa entre TOAG Y TOSAP

Para poder determinar la eficiencia del trabajo elaborado se realiza una comparativa entre la optimización de la torre mediante algoritmos genéticos (TOAG) y la optimización de la torre mediante el algoritmo del programa SAP 2000 V16 (TOSAP). Para dicha comparativa se tomarán los valores de los pesos totales producto de cada optimización, se mencionarán los perfiles empleados y se mostrarán los

## DISCUSION DE RESULTADOS

desplazamientos producto de la combinación “Servicio 1” producto del análisis de ambas torres. Lo anterior se puede apreciar mediante la Tabla 9-2.

Tabla 9-2 Comparativa entre TOAG y TOSAP

| <i>Descripción</i>     | <i>TOAG</i>       | <i>TOSAP</i>         | <i>DIFERENCIA</i> |         |
|------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|---------|
| Peso total de la torre | 9.78 Tn           | 12.30 Tn             | 2.52 Tn           | 25.71%  |
| Desplazamiento         | 6.04 cm           | 14.15 cm             | 8.11 cm           | 134.27% |
| Columna Inferior       | HSS 4" x4" 1/4"   | HSS 6"x6"x1/4"       | ---               | ---     |
| Viga Inferior          | HSS 4"x 6" x3/16" | HSS 3"x5"x3/16"      | ---               | ---     |
| Contraventeo Inferior  | PTR 1.5" Cal12    | PTR 3.5"x3.5" Cal 7  | ---               | ---     |
| Rigidizante Inferior   | PTR 1.5" Cal11    | PTR 1.5"x1.5" Cal 12 | ---               | ---     |
| Columna Superior       | HSS 6" x 6" 3/16" | HSS 5"x5"x3/16"      | ---               | ---     |
| Viga Superior          | HSS 3"x 5" x3/16" | HSS 3"x 5"x3/16"     | ---               | ---     |
| Contraventeo Superior  | PTR 2" Cal9       | PTR 3"x3" Cal 11     | ---               | ---     |
| Rigidizante Inferior   | PTR 1.5"Cal12     | PTR 1.5"x1.5" Cal 12 | ---               | ---     |

Como se puede observar la torre optimizada mediante el algoritmo genético es tiene un peso de 2.52 Tn menor a la obtenida mediante la optimización producto del programa SAP 2000, donde dicha diferencia representa un 25.71% del total del peso de TOAG.

Respecto a los desplazamientos, la optimización del SAP 2000 no contempla restricciones respecto a las consideraciones de servicio, por lo que su desplazamiento es un poco menor al permisible establecido en el RCDF NTC2017, aunque si es mayor a la recomendación establecida en un inicio de 12 cm para garantizar la buena recepción de la energía solar. La diferencia entre ambas torres es de 8.11 cm, lo que representa el 134.27% respecto al desplazamiento de la TOAG.



## CAPITULO 10

# 10. CONCLUSIONES

---

A través del desarrollo del trabajo mediante su metodología, la obtención de sus resultados y la discusión de los mismos, se llega a la conclusión de que la hipótesis planteada en un inicio se ha cumplido. Es decir, se ha obtenido una torre reticular de

acero optimizada en peso mediante la implementación de un algoritmo genético modificado, donde se utilizó una topología acorde a la funcionalidad de la torre y donde se tienen las dimensiones y secciones de sus miembros.

Con el trabajo realizado se obtuvo la topología más viable para ser usada como torre central de captación de energía termo-solar de un campo de helióstatos. Donde dicha topología cuenta con criterios de eficiencia energética, practicidad constructiva y viabilidad de funcionamiento.

Se elaboró un algoritmo computacional para la programación de la torre ya mencionada mediante el método de elementos finitos. Dicho algoritmo obtiene los elementos mecánicos de la torre y los analiza en condiciones de servicio y diseño mediante el RCDF NTC2017.

El algoritmo genético implementado funciona de forma adecuada, ya que se puede apreciar como el promedio de pesos tiene un comportamiento descendente a través de sus distintas generaciones (Figura 8-1) Además, la mejor torre de cada generación tuvo una disminución de su peso propio, sin dejar de cumplir con lo establecido en el RCDF NTC2017. La torre óptima empezó en su generación uno con un peso propio de 15.93 Tn, y terminó en la generación 48 con un peso propio de 9.78 Tn, generando una reducción de peso del 38.6%.

Para poder validar el resultado obtenido mediante el algoritmo genético, se realizó una comparación del mismo contra la optimización del programa SAP2000 V16. Donde el resultado del A.G. genera una torre optimizada con un menor peso propio en comparación a la obtenida mediante el programa SAP2000 V16.

El algoritmo genético tiene como ventaja a comparación de la optimización generada del programa SAP 2000, que considera no solo condiciones de diseño, si no también condiciones de servicio (siendo para este caso los desplazamientos permisibles).

Con todo lo elaborado durante este trabajo se obtiene una optimización con una función objetivo basada en el peso propio de la torre, con consideraciones de los

## CONCLUSIONES

---

distintos tipos de variables (topología, configuración y secciones transversales), y con restricciones marcadas en el RCDF NTC2017.

## CAPITULO 11

# 11. REFERENCIAS

---

Administración Pública de la Ciudad de México. 2017. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, Normas Técnicas Complementarias. Available from: <http://www.smie.org.mx/layout/normas-tecnicas-complementarias/normas-tecnicas-complementarias-ciudad-mexico-2017.pdf>

Arnal Simón, L., and M. Betancourt Suárez. 2004. Reglamento de construcción para el Distrito Federal.

Assimi, H., A. Jamali, and N. Nariman-zadeh. 2017. Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming. *Swarm Evol. Comput.* 0–1. doi:10.1016/j.swevo.2017.05.009. Available from:

---

<http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2017.05.009>

Cazacu, R., and L. Grama. 2014. Steel Truss Optimization Using Genetic Algorithms and FEA. *Procedia Technol.* 12:339–346. doi:10.1016/j.protcy.2013.12.496. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.496>

CFE. 2008. Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento. Comisión Federal de Electricidad.

Cook, R. D., D. S. Malkus, and M. . Plesha. 1989. Concepts and Applications of Finite Element Analysis.

Couceiro, I., J. París, S. Martínez, I. Colominas, F. Navarrina, and M. Casteleiro. 2016. Structural optimization of lattice steel transmission towers. *Eng. Struct.* 117:274–286. doi:10.1016/j.engstruct.2016.03.005. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.005>

Dede, T., S. Bekiroglu, and Y. Ayvaz. 2011. Weight minimization of trusses with genetic algorithm. *Appl. Soft Comput. J.* 11:2565–2575. doi:10.1016/j.asoc.2010.10.006.

Dur??n, O., L. P??rez, and A. Batocchio. 2012. Optimization of modular structures using Particle Swarm Optimization. *Expert Syst. Appl.* 39:3507–3515. doi:10.1016/j.eswa.2011.09.041.

Erbatur, F., O. Hasançebi, İ. Tütüncü, and H. Kılıç. 2000. Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms. *Comput. Struct.* 75:209–224. doi:10.1016/S0045-7949(99)00084-X.

Generalova, E. M., V. P. Generalov, and A. A. Kuznetsova. 2016. Modular Buildings in Modern Construction. *Procedia Eng.* 153:167–172. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.098. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.098>

Gentils, T., L. Wang, and A. Kolios. 2017. Integrated structural optimisation of

---

offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm. *Appl. Energy.* 199:187–204. doi:10.1016/j.apenergy.2017.05.009. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.009>

Holmes, J. D. 1996. Along-wind response of lattice towers - II. Aerodynamic damping and deflections. *Eng. Struct.* 18:483–488. doi:10.1016/0141-0296(95)00131-X.

Jin, S. W., H. Ohmori, and S. J. Lee. 2017. Optimal design of steel structures considering welding cost and constructability of beam-column connections. *J. Constr. Steel Res.* 135:292–301. doi:10.1016/j.jcsr.2017.03.020. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.03.020>

Li, L., and K. Khandelwal. 2017. Topology optimization of geometrically nonlinear trusses with spurious eigenmodes control. *Eng. Struct.* 131:324–344. doi:10.1016/j.engstruct.2016.11.001. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.001>

Noilublao, N., and S. Bureerat. 2011. Simultaneous topology, shape and sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms. *Comput. Struct.* 89:2531–2538. doi:10.1016/j.compstruc.2011.08.010. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.08.010>

Prasad Rao, N., and V. Kalyanaraman. 2001. Non-linear behaviour of lattice panel of angle towers. *J. Constr. Steel Res.* 57:1337–1357. doi:10.1016/S0143-974X(01)00054-2.

Prasad Rao, N., G. M. S. Knight, N. Lakshmanan, and N. R. Iyer. 2010. Investigation of transmission line tower failures. *Eng. Fail. Anal.* 17:1127–1141. doi:10.1016/j.engfailanal.2010.01.008. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.01.008>

Prasad Rao, N., G. M. Samuel Knight, S. J. Mohan, and N. Lakshmanan. 2012. Studies on failure of transmission line towers in testing. *Eng. Struct.* 35:55–70.

---

doi:10.1016/j.engstruct.2011.10.017. Available from:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.017>

Salama, T., A. Salah, O. Moselhi, and M. Al-Hussein. 2015. Near optimum selection of module configuration for efficient modular construction. *Autom. Constr.* doi:10.1016/j.autcon.2017.03.008.

Sánchez, S. 2012. Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos. Universitat Politècnica de Valencia.

SAS IP Inc. 2013. ANSYS Help Viewer.

de Souza, R. R., L. F. Fadel Miguel, R. H. Lopez, L. F. F. Miguel, and A. J. Torii. 2016. A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line tower structures. *Eng. Struct.* 111:162–184. doi:10.1016/j.engstruct.2015.12.005. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.005>

Tessari, R. K., H. M. Kroetz, and A. T. Beck. 2017. Performance-based design of steel towers subject to wind action. *Eng. Struct.* 143:549–557. doi:10.1016/j.engstruct.2017.03.053. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.053>

Toğan, V., and A. T. Daloğlu. 2006. Optimization of 3d trusses with adaptive approach in genetic algorithms. *Eng. Struct.* 28:1019–1027. doi:10.1016/j.engstruct.2005.11.007.

Wang, H., W. Yu, and G. Chen. 2017. An approach of topology optimization of multi-rigid-body mechanism. *CAD Comput. Aided Des.* 84:39–55. doi:10.1016/j.cad.2016.12.002. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2016.12.002>

Zhu, M., Y. Yang, J. K. Guest, and M. D. Shields. 2017. Topology optimization for linear stationary stochastic dynamics: Applications to frame structures. *Struct. Saf.* 67:116–131. doi:10.1016/j.strusafe.2017.04.004. Available from:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.04.004>

Zwick, D., M. Muskulus, and G. Moe. 2012. Iterative optimization approach for the design of full-height lattice towers for offshore wind turbines. *Energy Procedia*. 24:297–304. doi:10.1016/j.egypro.2012.06.112. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.112>









```

K,27, 0.25*LLMO,1.5*HAMO , LLMO*SIN(PI/3) *END

K,28, -0.25*LLMO,1.5*HAMO , LLMO*SIN(PI/3) !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

K,29, -0.5*LLMO - 0.25*(LLMO*COS(PI/3)),1.5*HAMO , !! INTRODUCIR LINEAS !!
0.75*(LLMO*SIN(PI/3))

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

K,30, -0.5*LLMO - 0.75*(LLMO*COS(PI/3)),1.5*HAMO ,
0.25*(LLMO*SIN(PI/3)) *CREATE, INTRO_LINEAS

K,31, -0.5*LLMO - 0.75*(LLMO*COS(PI/3)),1.5*HAMO , - /COM, Se dibujan las lineas de las columnas
0.25*(LLMO*SIN(PI/3))

K,32, -0.5*LLMO - 0.25*(LLMO*COS(PI/3)),1.5*HAMO , - !Primer Modulo
0.75*(LLMO*SIN(PI/3))

*DO,1,1,12,2

K,33, -0.25*LLMO,1.5*HAMO , -LLMO*SIN(PI/3) L, 1, I+36

K,34, 0.25*LLMO,1.5*HAMO , -LLMO*SIN(PI/3) *ENDDO

K,35, 0.5*LLMO + 0.25*(LLMO*COS(PI/3)),1.5*HAMO , - !Segundo Modulo
0.75*(LLMO*SIN(PI/3))

K,36, 0.5*LLMO + 0.75*(LLMO*COS(PI/3)),1.5*HAMO , - *DO,1,1,12,2
0.25*(LLMO*SIN(PI/3))

L, I+36, I+48

KGEN,NNIV+1,1,12,1,,HAMO *ENDDO

KGEN,NNIV-1,1,25,36,,HAMO

!NUMMRG,KP !Se multiplican los elementos

!NUMCMP,KP LSEL, ALL

*GET, NKTO,KP,0,COUNT LSEL, S, LINE, , 1, 12

/COM, Puntos principales para la reticula cuarto de maquinas LGEN, NINT(0.5*NNIV)-1, ALL, , ,HAMO*2

LSEL, ALL

K, NKTO+1, -0.5*LLMO, HTOR-HAMO, -0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) *IF, NINT(0.5*NNIV), EQ, 0.5*NNIV, THEN

K, NKTO+2, 0, HTOR-HAMO, -0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) LSEL, ALL

K, NKTO+3, 0.5*LLMO, HTOR-HAMO, -0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) LSEL, S, LINE, , 1, 6

K, NKTO+4, -0.5*LLMO, HTOR-HAMO, LGEN, 2, ALL, , ,HAMO*(NNIV-2)

K, NKTO+5, 0, HTOR-HAMO, LSEL, ALL

K, NKTO+6, 0.5*LLMO, HTOR-HAMO, *ELSE

K, NKTO+7, -0.5*LLMO, HTOR-HAMO, 0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) LSEL, ALL

K, NKTO+8, 0, HTOR-HAMO, 0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) LSEL, S, LINE, , 1, 6

K, NKTO+9, 0.5*LLMO, HTOR-HAMO, 0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) LGEN, 2, ALL, , ,HAMO*(NNIV-1)

/COM, Puntos principales para la reticula nivel azotea LSEL, ALL

K, NKTO+11, -0.5*LLMO, HTOR, -0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) *ENDIF

K, NKTO+12, 0, HTOR, -0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) *IF, NINT(0.5*NNIV), EQ, 0.5*NNIV, THEN

K, NKTO+13, 0.5*LLMO, HTOR, -0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) LSEL, ALL

K, NKTO+14, -0.5*LLMO, HTOR, LSEL, S, LINE, , 7, 12

K, NKTO+15, 0, HTOR, LGEN, 2, ALL, , ,HAMO*(NNIV-2)

K, NKTO+16, 0.5*LLMO, HTOR, LSEL, ALL

K, NKTO+17, -0.5*LLMO, HTOR, 0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) *ELSE

K, NKTO+18, 0, HTOR, 0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) *ENDIF

K, NKTO+19, 0.5*LLMO, HTOR, 0.5*(LLMO*SIN(PI/3)) NUCO = 6*NNIV

```

|  |  |
|--|--|
| NCMI = 6*NNMI                                  | !Se nombran como vigas las lineas de NUCO-NUVI |
| !Se nombran como columnas las lineas de 0-NUCO | /COM, Se dibujan los contraventeos             |
| /COM, Se dibujan las lineas de las vigas       | !Primero se dibujan los del primer modulo      |
| !Se dibujan las del primer modulo              | *DO,I,1,10,2                                   |
| *DO,I,1,11,1                                   | L, I, I+12                                     |
| L, I+36, I+37                                  | L, I+12, I+37                                  |
| *ENDDO   | L, I+37, I+13                                  |
| L, 48, 37                                      | L, I+13, I+2                                   |
| !Se dibujan las del segundo modulo             | *ENDDO   |
| *DO,I,1,11,1                                   | L, 11, 23                                      |
| L, I+48, I+49                                  | L, 23, 48                                      |
| *ENDDO   | L, 48, 24                                      |
| L, 60, 49                                      | L, 24, 1                                       |
| !Se multiplican los elementos                  | !Se dibujan los del segundo modulo             |
| LSEL, ALL                                      | *DO,I,1,10,2                                   |
| LSEL, S, LINE, , NUCO+1, NUCO+24               | L, I+48, I+24                                  |
| LGEN, NINT(0.5*NNIV)-1, ALL, , , ,HAMO*2       | L, I+24, I+37                                  |
| LSEL, ALL                                      | L, I+37, I+25                                  |
| *IF, NINT(0.5*NNIV), EQ, 0.5*NNIV, THEN        | L, I+25, I+50                                  |
| LSEL, ALL                                      | *ENDDO   |
| LSEL, S, LINE, , NUCO+1, NUCO+12               | L, 59, 35                                      |
| LGEN, 2, ALL, , , ,HAMO*(NNIV-2)               | L, 35, 48                                      |
| LSEL, ALL                                      | L, 48, 36                                      |
| *ELSE  | L, 36, 49                                      |
| LSEL, ALL                                      | !Se multiplican los elementos                  |
| LSEL, S, LINE, , NUCO+1, NUCO+12               | LSEL, ALL                                      |
| LGEN, 2, ALL, , , ,HAMO*(NNIV-1)               | LSEL, S, LINE, , NUVI+1, NUVI+48               |
| LSEL, ALL                                      | LGEN, NINT(0.5*NNIV)-1, ALL, , , ,HAMO*2       |
| *ENDIF   | LSEL, ALL                                      |
| *IF, NINT(0.5*NNIV), EQ, 0.5*NNIV, THEN        | *IF, NINT(0.5*NNIV), EQ, 0.5*NNIV, THEN        |
| LSEL, ALL                                      | LSEL, ALL                                      |
| LSEL, S, LINE, , NUCO+13, NUCO+24              | LSEL, S, LINE, , NUVI+1, NUVI+24               |
| LGEN, 2, ALL, , , ,HAMO*(NNIV-2)               | LGEN, 2, ALL, , , ,HAMO*(NNIV-2)               |
| LSEL, ALL                                      | LSEL, ALL                                      |
| *ELSE  | *ELSE  |
| *ENDIF   | LSEL, ALL                                      |
| NUVI = 12*NNIV+NUCO                            | LSEL, S, LINE, , NUVI+1, NUVI+24               |
| NVMI = 12*NNMI+NUCO                            | LGEN, 2, ALL, , , ,HAMO*(NNIV-1)               |

```

LSEL, ALL
*ENDIF
*IF, NINT(0.5*NNIV), EQ, 0.5*NNIV, THEN
LSEL, ALL
LSEL, S, LINE, , NUVI+25, NUVI+48
LGEN, 2, ALL, , , ,HAMO*(NNIV-2)
LSEL, ALL
*ELSE
*ENDIF
NUCT = 24*NNIV+NUVI
NCTI = 24*NNMI+NUVI
/COM, Se dibujan los rigidizantes
!Primero se dibujan los del primer módulo
*DO,I,1,10,2
L, I+36, I+12
L, I+13, I+38
*ENDDO
L, 47, 23
L, 24, 37
!Se dibujan los del segundo módulo
*DO,I,1,10,2
L, I+36, I+24
L, I+25, I+38
*ENDDO
L, 47, 35
L, 36, 37
!Se multiplican los elementos
LSEL, ALL
LSEL, S, LINE, , NUCT+1, NUCT+24
LGEN, NINT(0.5*NNIV)-1, ALL, , , ,HAMO*2
LSEL, ALL
*IF, NINT(0.5*NNIV), EQ, 0.5*NNIV, THEN
LSEL, ALL
LSEL, S, LINE, , NUCT+1, NUCT+12
LGEN, 2, ALL, , , ,HAMO*(NNIV-2)
LSEL, ALL
*ELSE
LSEL, ALL
LSEL, S, LINE, , NUCT+1, NUCT+12
LGEN, 2, ALL, , , ,HAMO*(NNIV-1)
LSEL, ALL
*ENDIF
LSEL, ALL
*IF, NINT(0.5*NNIV), EQ, 0.5*NNIV, THEN
LSEL, ALL
LSEL, S, LINE, , NUCT+13, NUCT+24
LGEN, 2, ALL, , , ,HAMO*(NNIV-2)
LSEL, ALL
*ELSE
*ENDIF
NURI = 12*NNIV+NUCT
NRII = 12*NNMI+NUCT
/COM, Se crea la reticula del cuarto de máquinas
/COM, Se crean las lineas en X
L, 36+(NNIV-2)*12+8, NKTO+1
L, NKTO+1, NKTO+2
L, NKTO+2, NKTO+3
L, NKTO+3, 36+(NNIV-2)*12+12
L, 36+(NNIV-2)*12+7, NKTO+4
L, NKTO+4, NKTO+5
L, NKTO+5, NKTO+6
L, NKTO+6, 36+(NNIV-2)*12+1
L, 36+(NNIV-2)*12+6, NKTO+7
L, NKTO+7, NKTO+8
L, NKTO+8, NKTO+9
L, NKTO+9, 36+(NNIV-2)*12+2
/COM, Se crean las lineas en Z
L, 36+(NNIV-2)*12+9, NKTO+1
L, NKTO+1, NKTO+4
L, NKTO+4, NKTO+7
L, NKTO+7, 36+(NNIV-2)*12+5
L, 36+(NNIV-2)*12+10, NKTO+2
L, NKTO+2, NKTO+5
L, NKTO+5, NKTO+8
L, NKTO+8, 36+(NNIV-2)*12+4
L, 36+(NNIV-2)*12+11, NKTO+3
L, NKTO+3, NKTO+6

```

## ANEXOS

```

L, NKTO+6, NKTO+9                                KEYOPT,1,3,3

L, NKTO+9, 36+(NNIV-2)*12+3                       KEYOPT,1,6,1

/COM, Se crea la reticula del piso superior         /COM, Se define el elemento finito para diagonales y contraventeos

/COM, Se crean las lineas en X                    ET,2,LINK180

L, 36+(NNIV-1)*12+8, NKTO+11                     /COM, Propiedades de las columnas inferiores

L, NKTO+11, NKTO+12                               ARE1 = (ANCI*ANCI)-(ANCI-2*ESCI)*(ANCI-2*ESCI)          !Area
seccion m2

L, NKTO+12, NKTO+13                               INE1 = ((ANCI**4)-(ANCI-2*ESCI)**4)*(1/12)*(100**4)      !Inercia
seccion cm4

L, NKTO+13, 36+(NNIV-1)*12+12                    RAG1 = SQRT(INE1/(ARE1*(100**2)))                        !Radio de giro
en cm

L, 36+(NNIV-1)*12+7, NKTO+14                     MZX1 = 2*(ANCI*ESCI*(0.5*ANCI-0.5*ESCI)+((0.5*ANCI-ESCI)**2)*ESCI)
!Modulo de sección plástico en X en m3

L, NKTO+14, NKTO+15                               MSX1 = INE1/(0.5*ANCI*100)                                !Modulo de sección
elástico en X en cm3

L, NKTO+15, NKTO+16

L, NKTO+16, 36+(NNIV-1)*12+1

L, 36+(NNIV-1)*12+6, NKTO+17                     SECNUM,1

L, NKTO+17, NKTO+18                               SECTYPE,1,BEAM,HRECT

L, NKTO+18, NKTO+19                               SECDATA, ANCI, ANCI, ESCI, ESCI, ESCI, ESCI

L, NKTO+19, 36+(NNIV-1)*12+2                     /COM, Propiedades de las vigas inferiores

/COM, Se crean las lineas en Z                    ARE2 = (ANVI*PEVI)-(ANVI-2*ESVI)*(PEVI-2*ESVI)

L, 36+(NNIV-1)*12+9, NKTO+11                     INE2 = ((PEVI*ANVI**3)-(PEVI-2*ESVI)*(ANVI-2*ESVI)**3)*(1/12)*(100**4)

L, NKTO+11, NKTO+14                               RAG2 = SQRT(INE2/(ARE2*(100**2)))

L, NKTO+14, NKTO+17                               MZX2 = 2*(ANVI*ESVI*(0.5*PEVI-0.5*ESVI)+((0.5*PEVI-ESVI)**2)*ESVI)

L, NKTO+17, 36+(NNIV-1)*12+5                     SECNUM,2

L, 36+(NNIV-1)*12+10, NKTO+12                    SECTYPE,2,BEAM,HRECT

L, NKTO+12, NKTO+15                               SECDATA, ANVI, PEVI, ESVI, ESVI, ESVI, ESVI

L, NKTO+15, NKTO+18                               /COM, Propiedades de los contraventeos inferiores

L, NKTO+18, 36+(NNIV-1)*12+4                     ARE3 = (ACTI*ACTI)-(ACTI-2*ECTI)*(ACTI-2*ECTI)

L, 36+(NNIV-1)*12+11, NKTO+13                    INE3 = ((ACTI**4)-(ACTI-2*ECTI)**4)*(1/12)*(100**4)

L, NKTO+13, NKTO+16                               RAG3 = SQRT(INE3/(ARE3*(100**2)))

L, NKTO+16, NKTO+19                               SECNUM,3

L, NKTO+19, 36+(NNIV-1)*12+3                     SECTYPE,3,LINK

NUMMRG,KP                                         SECDATA, ARE3

NUMCMP,KP                                         /COM, Propiedades de los rigidizantes inferiores

*END                                               ARE4 = (ANRI*ANRI)-(ANRI-2*ESRI)*(ANRI-2*ESRI)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! INE4 = ((ANRI**4)-(ANRI-2*ESRI)**4)*(1/12)*(100**4)

!!          ASIGNAR PROPIEDADES                !!    RAG4 = SQRT(INE4/(ARE4*(100**2)))

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! SECNUM,4

*CREATE,AISGN_PROP                               SECTYPE,4,LINK

/COM, Se define el elemento finito para vigas y columnas SECDATA, ARE4

ET,1,BEAM188                                     /COM, Propiedades de las columnas superior

```

```

ARE5 = (ANCS*ANCS)-(ANCS-2*ESCS)*(ANCS-2*ESCS)                !!      ARRIOSTRADORES      !!

INE5 = ((ANCS**4)-(ANCS-2*ESCS)**4)*(1/12)*(100**4)              !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

RAG5 = SQRT(INE5/(ARE5*(100**2)))                                  *CREATE, ARRIOST

MZX5      =      2*(ANCS*ESCS*(0.5*ANCS-0.5*ESCS)+((0.5*ANCS-
ESCS)**2)*ESCS)                                                  LSEL, ALL

MSX5 = INE5/(0.5*ANCS*100)                                        *IF, SEAR, EQ, 1, THEN

SECNUM,5                                                         LSEL, S, LINE, , NUCT+1, NURI

SECTYPE,5,BEAM,HRECT                                           LDELE, ALL

SECDATA, ANCS, ANCS, ESCS, ESCS, ESCS, ESCS                    LSEL, ALL

/COM, Propiedades de las vigas superiores                         *ELSEIF, SEAR,EQ,2

ARE6 = (ANVS*PEVS)-(ANVS-2*ESVS)*(PEVS-2*ESVS)                  LSEL, S, LINE, , NR1+1, NURI

INE6      =      ((PEVS*ANVS**3)-(PEVS-2*ESVS)*(ANVS-
2*ESVS)**3)*(1/12)*(100**4)                                       LDELE, ALL

RAG6 = SQRT(INE6/(ARE6*(100**2)))                                  *ELSEIF, SEAR,EQ,3

MZX6      =      2*(ANVS*ESVS*(0.5*PEVS-0.5*ESVS)+((0.5*PEVS-
ESVS)**2)*ESVS)                                                  LSEL, S, LINE, , NUCT+1, NR1

SECNUM,6                                                         LDELE, ALL

SECTYPE,6,BEAM,HRECT                                           LSEL, ALL

SECDATA, ANVS, PEVS, ESVS, ESVS, ESVS, ESVS                    *ELSEIF, SEAR,EQ,4

/COM, Propiedades de los contraventeos superiores               LSEL, ALL

ARE7 = (ACTS*ACTS)-(ACTS-2*ECTS)*(ACTS-2*ECTS)                  *ENDIF

INE7 = ((ACTS**4)-(ACTS-2*ECTS)**4)*(1/12)*(100**4)              *END

RAG7 = SQRT(INE7/(ARE7*(100**2)))                                  !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

SECNUM,7                                                         !!      MALLADO DE ELEMENTOS      !!

SECTYPE,7,LINK                                                  !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

SECDATA, ARE7                                                    *CREATE,MALLADO

/COM, Propiedades de los rigidizantes superiores                !Se coloca un valor NKTO muy grande para aadir nuevos puntos

ARE8 = (ANRS*ANRS)-(ANRS-2*ESRS)*(ANRS-2*ESRS)                  NKT2 = 100000

INE8 = ((ANRS**4)-(ANRS-2*ESRS)**4)*(1/12)*(100**4)              /COM, Se colocan los puntos de los planos auxiliares

RAG8 = SQRT(INE8/(ARE8*(100**2)))                                  K, NKT2+1, -LLMO-1, HTOR+1, -LLMO*SIN(PI/3)

SECNUM,8                                                         !NUMSTR,KP,NKT2+1

SECTYPE,8,LINK                                                  K, NKT2+2, -LLMO-1,HTOR+1,0

SECDATA, ARE8                                                   K, NKT2+3, -LLMO-1,HTOR+1, LLMO*SIN(PI/3)

/COM, Propiedades del acero                                     K, NKT2+4, 0, HTOR+1, 2*LLMO

MP,EX,1,MEAC                                                    K, NKT2+5, 0, HTOR+1, -2*LLMO

MP,PRXY,1,MPAC                                                  K, NKT2+6, -LLMO-1, HTOR+1, -0.5*(LLMO*SIN(PI/3))

MP,DENS,1,PVAC/9.81                                             K, NKT2+7, -LLMO-1, HTOR+1, 0.5*(LLMO*SIN(PI/3))

MP,ALPX,1,CEAC                                                  K, NKT2+8, -0.5*LLMO, HTOR+1, 2*LLMO

*END                                                            K, NKT2+9, 0.5*LLMO, HTOR+1, 2* LLMO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!        !Para el primer plano para columnas inferiores

```

|   |   |
|---|---|
| LSEL, S, LINE, , 1, NCMI                        | LSEL, ALL                                       |
| LSEL, R, LOC, Z, -LLMO*SIN(PI/3)                | !Para el primer plano para vigas inferiores     |
| LATT,1, ,1, , , NKT2+1,1                        | LSEL, S, LINE, , NUCO+9, NUCO+10                |
| LSEL, ALL                                       | *DO, I, NUCO+21, NVMI, 12                       |
| !Para el segundo plano para columnas inferiores | LSEL, A, LINE, , I, I+1                         |
| LSEL, S, LINE, , 1, NCMI                        | *ENDDO  |
| LSEL, R, LOC, Z, 0                              | LATT,1, ,1, , , NKT2+1,2                        |
| LATT,1, ,1, , , NKT2+2,1                        | !LMESH, ALL                                     |
| LSEL, ALL                                       | LSEL, ALL                                       |
| !Para el tercer plano para columnas inferiores  | !Para el primer plano para columnas superiores  |
| LSEL, S, LINE, , 1, NCMI                        | LSEL, S, LINE, , NCMI+1, NUCO                   |
| LSEL, R, LOC, Z, LLMO*SIN(PI/3)                 | LSEL, R, LOC, Z, -LLMO*SIN(PI/3)                |
| LATT,1, ,1, , , NKT2+3,1                        | LATT,1, ,1, , , NKT2+1,5                        |
| LSEL, ALL                                       | LSEL, ALL                                       |
| !Para el cuarto plano para vigas inferiores     | !Para el segundo plano para columnas superiores |
| LSEL, S, LINE, , NUCO+1, NUCO+2                 | LSEL, S, LINE, , NCMI, NUCO                     |
| LSEL, A, LINE, , NUCO+5, NUCO+6                 | LSEL, R, LOC, Z, 0                              |
| *DO, I, NUCO+13, NVMI, 12                       | LATT,1, ,1, , , NKT2+2,5                        |
| LSEL, A, LINE, , I, I+1                         | LSEL, ALL                                       |
| LSEL, A, LINE, , I+4, I+5                       | !Para el tercer plano para columnas superiores  |
| *ENDDO  | LSEL, S, LINE, , NCMI, NUCO                     |
| LATT,1, ,1, , , NKT2+4,2                        | LSEL, R, LOC, Z, LLMO*SIN(PI/3)                 |
| LSEL, ALL                                       | LATT,1, ,1, , , NKT2+3,5                        |
| !Para el tercer plano para vigas inferiores     | LSEL, ALL                                       |
| LSEL, S, LINE, , NUCO+3, NUCO+4                 | !Para el cuarto plano para vigas superiores     |
| *DO, I, NUCO+15, NVMI, 12                       | LSEL, S, LINE, , NVMI+1, NVMI+2                 |
| LSEL, A, LINE, , I, I+1                         | LSEL, A, LINE, , NVMI+5, NVMI+6                 |
| *ENDDO  | *DO, I, NVMI+13, NUVI, 12                       |
| LATT,1, ,1, , , NKT2+3,2                        | LSEL, A, LINE, , I, I+1                         |
| LSEL, ALL                                       | LSEL, A, LINE, , I+4, I+5                       |
| !Para el quinto plano para vigas inferiores     | *ENDDO  |
| LSEL, S, LINE, , NUCO+7, NUCO+8                 | LATT,1, ,1, , , NKT2+4,6                        |
| LSEL, A, LINE, , NUCO+11, NUCO+12               | LSEL, ALL                                       |
| *DO, I, NUCO+19, NVMI, 12                       | !Para el tercer plano para vigas superiores     |
| LSEL, A, LINE, , I, I+1                         | LSEL, S, LINE, , NVMI+3, NVMI+4                 |
| LSEL, A, LINE, , I+4, I+5                       | *DO, I, NVMI+15, NUVI, 12                       |
| *ENDDO  | LSEL, A, LINE, , I, I+1                         |
| LATT,1, ,1, , , NKT2+5,2                        | *ENDDO  |

|  |  |
|--|--|
| LATT,1,,1,,NKT2+3,6                            | !Para el cuarto plano para vigas de entrepiso        |
| LSEL, ALL                                      | LSEL, S, LINE, , NURI+17, NURI+20                    |
| !Para el quinto plano para vigas superiores    | LSEL, A, LINE, , NURI+41, NURI+44                    |
| LSEL, S, LINE, , NVMI+7, NVMI+8                | LATT,1,,1,,NKT2+4,6                                  |
| LSEL, A, LINE, , NVMI+11, NVMI+12              | LSEL, ALL  |
| *DO, I, NVMI+19, NUVI, 12                      | !Para el noveno plano para vigas de entrepiso        |
| LSEL, A, LINE, , I, I+1                        | LSEL, S, LINE, , NURI+21, NURI+24                    |
| LSEL, A, LINE, , I+4, I+5                      | LSEL, A, LINE, , NURI+45, NURI+48                    |
| *ENDDO   | LATT,1,,1,,NKT2+9,6                                  |
| LATT,1,,1,,NKT2+5,6                            | LSEL, ALL  |
| LSEL, ALL                                      | /COM, Se hace el mallado de las columnas inferiores  |
| !Para el primer plano para vigas superiores    | LSEL,S,SEC,,1  |
| LSEL, S, LINE, , NVMI+9, NVMI+10               | LESIZE,ALL,,,NUEF                                    |
| *DO, I, NVMI+21, NUVI, 12                      | LMESH,ALL  |
| LSEL, A, LINE, , I, I+1                        | LSEL,ALL   |
| *ENDDO   | /COM, Se hace el mallado de las vigas inferiores     |
| LATT,1,,1,,NKT2+1,6                            | LSEL,S,SEC,,2  |
| LSEL, ALL                                      | LESIZE,ALL,,,NUEF                                    |
| !Para el sexto plano para vigas de entrepiso   | LMESH,ALL  |
| LSEL, S, LINE, , NURI+1, NURI+4                | LSEL,ALL   |
| LSEL, A, LINE, , NURI+25, NURI+28              | /COM, Se hace el mallado de las columnas superiores  |
| LATT,1,,1,,NKT2+6,6                            | LSEL,S,SEC,,5  |
| LSEL, ALL                                      | LESIZE,ALL,,,NUEF                                    |
| !Para el segundo plano para vigas de entrepiso | LMESH,ALL  |
| LSEL, S, LINE, , NURI+5, NURI+8                | LSEL,ALL   |
| LSEL, A, LINE, , NURI+29, NURI+32              | /COM, Se hace el mallado de las vigas superiores     |
| LATT,1,,1,,NKT2+2,6                            | LSEL,S,SEC,,6  |
| LSEL, ALL                                      | LESIZE,ALL,,,NUEF                                    |
| !Para el septimo plano para vigas de entrepiso | LMESH,ALL  |
| LSEL, S, LINE, , NURI+9, NURI+12               | LSEL,ALL   |
| LSEL, A, LINE, , NURI+33, NURI+36              | !Para el cuarto plano para las diagonales inferiores |
| LATT,1,,1,,NKT2+7,6                            | LSEL, S, LINE, , NUVI+1, NUVI+4                      |
| LSEL, ALL                                      | LSEL, A, LINE, , NUVI+9, NUVI+12                     |
| !Para el octavo plano para vigas de entrepiso  | *DO, I, NUVI+25, NCTI, 24                            |
| LSEL, S, LINE, , NURI+13, NURI+16              | LSEL, A, LINE, , I, I+3                              |
| LSEL, A, LINE, , NURI+37, NURI+40              | LSEL, A, LINE, , I+8, I+11                           |
| LATT,1,,1,,NKT2+8,6                            | *ENDDO   |
| LSEL, ALL                                      | LATT,1,,2,,NKT2+4,3                                  |

|   |  |
|---|--|
| LSEL, ALL   | LSEL, ALL  |
| !Para el tercer plano para diagonales inferiores      | !Para el tercer plano para arriostadores inferiores  |
| LSEL, S, LINE, , NUVI+5, NUVI+8                       | LSEL, S, LINE, , NUCT+3, NUCT+4                      |
| *DO, I, NUVI+29, NCTI, 24                             | *DO, I, NUCT+15, NRII, 12                            |
| LSEL, A, LINE, , I, I+3                               | LSEL, A, LINE, , I, I+1                              |
| *ENDDO  | *ENDDO   |
| LATT,1, ,2, , , NKT2+3,3                              | LATT,1, ,2, , ,NKT2+3,4                              |
| LSEL, ALL   | LSEL, ALL  |
| !Para el quinto plano para diagonales inferiores      | !Para el quinto plano para arriostadores inferiores  |
| LSEL, S, LINE, , NUVI+13, NUVI+16                     | LSEL, S, LINE, , NUCT+7, NUCT+8                      |
| LSEL, A, LINE, , NUVI+21, NUVI+24                     | LSEL, A, LINE, , NUCT+11, NUCT+12                    |
| *DO, I, NUVI+37, NCTI, 24                             | *DO, I, NUCT+19, NRII, 12                            |
| LSEL, A, LINE, , I, I+3                               | LSEL, A, LINE, , I, I+1                              |
| LSEL, A, LINE, , I+8, I+11                            | LSEL, A, LINE, , I+4, I+5                            |
| *ENDDO  | *ENDDO   |
| LATT,1, ,2, , ,NKT2+5,3                               | LATT,1, ,2, , ,NKT2+5,4                              |
| LSEL, ALL   | LSEL, ALL  |
| !Para el primer plano para diagonales inferiores      | !Para el primer plano para arriostadores inferiores  |
| LSEL, S, LINE, , NUVI+17, NUVI+20                     | LSEL, S, LINE, , NUCT+9, NUCT+10                     |
| *DO, I, NUVI+41, NCTI, 24                             | *DO, I, NUCT+21, NRII, 12                            |
| LSEL, A, LINE, , I, I+3                               | LSEL, A, LINE, , I, I+1                              |
| *ENDDO  | *ENDDO   |
| LATT,1, ,2, , ,NKT2+1,3                               | LATT,1, ,2, , ,NKT2+1,4                              |
| LSEL, ALL   | LSEL, ALL  |
| /COM, Se hace el mallado de las diagonales inferiores | /COM, Se hace el mallado de las riorstras inferiores |
| LSEL,S,SEC,,3   | LSEL,S,SEC,,4  |
| LESIZE,ALL,,,1  | LESIZE,ALL,,,1                                       |
| LMESH,ALL   | LMESH,ALL  |
| LSEL,ALL  | LSEL,ALL   |
| *IF, SEAR,EQ,2,THEN                                   | *ELSE  |
| !Para el cuarto plano para arriostadores inferiores   | *ENDIF   |
| LSEL, S, LINE, , NUCT+1, NUCT+2                       | *IF, SEAR,EQ,4,THEN                                  |
| LSEL, A, LINE, , NUCT+5, NUCT+6                       | !Para el cuarto plano para arriostadores superiores  |
| *DO, I, NUCT+13, NRII, 12                             | LSEL, S, LINE, , NUCT+1, NUCT+2                      |
| LSEL, A, LINE, , I, I+1                               | LSEL, A, LINE, , NUCT+5, NUCT+6                      |
| LSEL, A, LINE, , I+4, I+5                             | *DO, I, NUCT+13, NRII, 12                            |
| *ENDDO  | LSEL, A, LINE, , I, I+1                              |
| LATT,1, ,2, , ,NKT2+4,4                               | LSEL, A, LINE, , I+4, I+5                            |

```

*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+4,4
LSEL, ALL
!Para el tercer plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NUCT+3, NUCT+4
*DO, I, NUCT+15, NR1I, 12
  LSEL, A, LINE, , I, I+1
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+3,4
LSEL, ALL
!Para el quinto plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NUCT+7, NUCT+8
LSEL, A, LINE, , NUCT+11, NUCT+12
*DO, I, NUCT+19, NR1I, 12
  LSEL, A, LINE, , I, I+1
  LSEL, A, LINE, , I+4, I+5
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+5,4
LSEL, ALL
!Para el primer plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NUCT+9, NUCT+10
*DO, I, NUCT+21, NR1I, 12
  LSEL, A, LINE, , I, I+1
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+1,4
LSEL, ALL
/COM, Se hace el mallado de las riostras inferiores
LSEL,S,SEC,,4
LESIZE,ALL,,,1
LMESH,ALL
LSEL,ALL
*ELSE
*ENDIF
!Para el cuarto plano para diagonales superiores
LSEL, S, LINE, , NCTI+1, NCTI+4
LSEL, A, LINE, , NCTI+9, NCTI+12
*DO, I, NCTI+25, NUCT, 24
  LSEL, A, LINE, , I, I+3
  LSEL, A, LINE, , I+8, I+11
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+4,7
LSEL, ALL
!Para el tercer plano para diagonales superiores
LSEL, S, LINE, , NCTI+5, NCTI+8
*DO, I, NCTI+29, NUCT, 24
  LSEL, A, LINE, , I, I+3
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+3,7
LSEL, ALL
!Para el quinto plano para diagonales superiores
LSEL, S, LINE, , NCTI+13, NCTI+16
LSEL, A, LINE, , NCTI+21, NCTI+24
*DO, I, NCTI+37, NUCT, 24
  LSEL, A, LINE, , I, I+3
  LSEL, A, LINE, , I+8, I+11
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+5,7
!LMESH, ALL
LSEL, ALL
!Para el primer plano para diagonales superiores
LSEL, S, LINE, , NCTI+17, NCTI+20
*DO, I, NCTI+41, NUCT, 24
  LSEL, A, LINE, , I, I+3
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+1,7
!LMESH, ALL
LSEL, ALL
/COM, Se hace el mallado de las diagonales superiores
LSEL,S,SEC,,7
LESIZE,ALL,,,1
LMESH,ALL
LSEL,ALL
*IF, SEAR,EQ,3,THEN
!Para el cuarto plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NRRI+1, NRRI+2
LSEL, A, LINE, , NRRI+5, NRRI+6

```

```

*DO, I, NRRI+13, NURI, 12
    LSEL, A, LINE, , I, I+1
    LSEL, A, LINE, , I+4, I+5
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+4,8
LSEL, ALL
!Para el tercer plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NRRI+3, NRRI+4
*DO, I, NRRI+15, NURI, 12
    LSEL, A, LINE, , I, I+1
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+3,8
LSEL, ALL
!Para el quinto plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NRRI+7, NRRI+8
LSEL, A, LINE, , NRRI+11, NRRI+12
*DO, I, NRRI+19, NURI, 12
    LSEL, A, LINE, , I, I+1
    LSEL, A, LINE, , I+4, I+5
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+5,8
LSEL, ALL
!Para el primer plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NRRI+9, NRRI+10
*DO, I, NRRI+21, NURI, 12
    LSEL, A, LINE, , I, I+1
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+1,8
LSEL, ALL
/COM, Se hace el mallado de las riostras superiores
LSEL,S,SEC,,8
LESIZE,ALL,,,1
LMESH,ALL
LSEL,ALL
*ELSE
*ENDIF
*IF, SEAR,EQ,4,THEN
    !Para el cuarto plano para arriostadores superiores
    LSEL, S, LINE, , NRRI+1, NRRI+2
    LSEL, A, LINE, , NRRI+5, NRRI+6
*DO, I, NRRI+13, NURI, 12
    LSEL, A, LINE, , I, I+1
    LSEL, A, LINE, , I+4, I+5
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+4,8
LSEL, ALL
!Para el tercer plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NRRI+3, NRRI+4
*DO, I, NRRI+15, NURI, 12
    LSEL, A, LINE, , I, I+1
*ENDDO
LSEL, ALL
!Para el quinto plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NRRI+7, NRRI+8
LSEL, A, LINE, , NRRI+11, NRRI+12
*DO, I, NRRI+19, NURI, 12
    LSEL, A, LINE, , I, I+1
    LSEL, A, LINE, , I+4, I+5
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+5,8
LSEL, ALL
!Para el primer plano para arriostadores superiores
LSEL, S, LINE, , NRRI+9, NRRI+10
*DO, I, NRRI+21, NURI, 12
    LSEL, A, LINE, , I, I+1
*ENDDO
LATT,1, ,2, , ,NKT2+1,8
LSEL, ALL
/COM, Se hace el mallado de las riostras superiores
LSEL,S,SEC,,8
LESIZE,ALL,,,1
LMESH,ALL
LSEL,ALL
*ELSE
*ENDIF
*IF, SEAR,EQ,4,THEN
    save,torre1

```



```

*GET, TES5, ELEM, 0, COUNT          !Total de elementos 5      *END
                                     !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ESEL, ALL
ESEL, S, SEC, , 6          !Vigas superiores
*GET, TES6, ELEM, 0, COUNT          !Total de elementos 6      *CREATE, PESO_PROPIO
                                     !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ESEL, ALL
ESEL, S, SEC, , 3          !Diagonales inferiores
*GET, TES3, ELEM, 0, COUNT          !Total de elementos 3      *GET, ETOT, ELEM, 0, COUNT
                                     !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ESEL, ALL
ESEL, S, SEC, , 4          !Contraventeos inferiores
*GET, TES4, ELEM, 0, COUNT          !Total de elementos 4      *DO, I, 1, ETOT, 1
                                     !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ESEL, ALL
ESEL, S, SEC, , 7          !Diagonales superiores
*GET, TES7, ELEM, 0, COUNT          !Total de elementos 7      *GET, VOLE, ELEM, I, VOLU
                                     !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ESEL, ALL
ESEL, S, SEC, , 8          !Contraventeos superiores
*GET, TES8, ELEM, 0, COUNT          !Total de elementos 8      *END
                                     !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ESEL, ALL
*DIM, ELAC, ARRAY, 8          !Vector cantidad de elementos acumulados
ELAC(1)=TES1
ELAC(2)=TES1+TES2
ELAC(3)=TES1+TES2+TES5
ELAC(4)=TES1+TES2+TES5+TES6
ELAC(5)=TES1+TES2+TES5+TES6+TES3
ELAC(6)=TES1+TES2+TES5+TES6+TES3+TES4
ELAC(7)=TES1+TES2+TES5+TES6+TES3+TES4+TES7
ELAC(8)=TES1+TES2+TES5+TES6+TES3+TES4+TES7+TES8
*END
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!      ASIGNACION DE APOYOS      !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*CREATE, ASIGNACION_APOYOS
FINISH
/SOLU
NSEL, S, LOC, Y, 0
D, ALL, ALL
NSEL, ALL
                                     !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
                                     !!      PESO PROPIO      !!
                                     !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
                                     *CREATE, PESO_PROPIO
                                     *GET, ETOT, ELEM, 0, COUNT
VOLT=0
*DO, I, 1, ETOT, 1
*GET, VOLE, ELEM, I, VOLU
                                     VOLT=VOLT+VOLE
*ENDDO
PESOT=VOLT*PVAC
/TITLE, PESO PROPIO DE LA TORRE = %PESOT% TN.
PESO(IND, 1) = PESOT
*END
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!      ANALISIS MODAL      !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*CREATE, ANALISIS_MODAL
ANTYPE, 2
MODOPT, LANB, 6, 0, 1, 10, , OFF
EQSLV, SPAR
MXPAND, 6, , , 0
LUMPDM, 0
PSTRES, 0
OUTPR, BASIC, ALL,
ALPHAD, 0,
BETAD, 0,
DMPRAT, FAAM,
ace1, , 9.81
/STATUS, SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
SET, FIRST
/dscale, 1, 2
*GET, FREQ, MODE, 1, FREQ
PVIB=1/FREQ

```







```

DEL1 = 0.29
*ELSE
BET1 = 0.55
ALF1 = 0.29
ZMIN = 10
ALF2 = 0.67
Z0 = 1.0
DEL1 = 0.43
*ENDIF
!Se calcula el factor de exposición Frz dinamico
*IF, HTOR, LE, 10, THEN
FRZD = 0.702*BET1
*ELSEIF, HTOR, LE, 200, THEN
FRZD = 0.702*BET1*(HTOR*0.1)**ALF1
*ELSE
*ENDIF
/COM, Calculo de Velocidad de Diseño Caso Dinamico (tiempo promedio 10
min)
VEDD = VERE*FRZD*FATO/3.6
/COM, Factor de correccion por masa
!Se considera el factor de corrección de masa
!con valor unitario, esto al calcular los valores
!de la torre mediante análisis de elemntos finitos
/COM, Constantes correctivas de la forma modal
!Al ser de sección constante el valor Lb=0.
CG = (1/(2*ALF1+3))
CRG = (1/(ALF1+3))
/COM, Longitud de la escala de turbulencia LZS
!Se considera ZS como la altura al centro del cuarto
!de maquinas
ZS = HTOR-0.5*HAMO
*IF,ZS, LT, ZMIN, THEN
LZS = ZMIN
*ELSE
LZS = 300*(ZS/200)**ALF2
*ENDIF
/COM, Factor de respuesta de fondo B2
B2 = 1/(1+2*((HTOR*LCBA)**0.5)/LZS)
/COM, DENSIDAD DE POTENCIA SL
SL = 4*(FREQ*LZS/VEDD)/((1+71*((FREQ*LZS/VEDD)**2))**(5/6))
/COM, FUNCIONES DE ADMITANCIA RH Y RB
NH = 2*FREQ*HTOR/VEDD
NB = 3.5*FREQ*LCBA/VEDD
RH = 1/(1+NH)
RB = 1/(1+NB)
/COM, FACTOR DE RESPUESTA EN RESONANCIA
R2 = (PI/(4*FAAM))*SL*RH*RB
/COM, Factor pico FPKP
VV = FREQ*(R2/(B2+R2))**0.5
*IF, VV, LE, 0.08, THEN
VV = 0.008
*ELSE
VV = VV
*ENDIF
FPKP = ((2*LOG(600*VV))**0.5)+0.6/(((2*LOG(600*VV))**0.5))
*IF, FPKP, LE, 3.0, THEN
FPKP = 3.0
*ELSE
FPKP = FPKP
*ENDIF
/COM, Indice de turbulencia
*IF,ZS, LT, ZMIN, THEN
IV = 1/(LOG(ZMIN/Z0))
*ELSE
IV = DEL1*(ZS/10)**(-ALF1)
*ENDIF
/COM, FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICA FAD
FAD = ((1+2*IV*FPKP*(B2+R2)**0.5)/(1+7*IV))*(CRG/CG)
/COM, PRESION DINAMICA DE BASE CASO DINAMICO
*IF, FAD, LE, 1, THEN
PDBD = PDBE
*ELSE
PDBD = FAD*PDBE
*ENDIF
/COM, CRITERIOS DE CASO DE DISEÑO
!Se considera el analisis dinamico si la relacion de
!esbeltez es mayor a 5, y/o si el periodo fundamental

```

|   |  |
|---|--|
| <pre> les mayor de 1 seg y menor de 5 seg CRT1 = HTOR/LCBA !Relacion de esbeltez de la torre *IF, CRT1, GT, 5, THEN     PDBA = PDBD *ELSEIF, PVIB, GT, 1, THEN     PDBA = PDBD *ELSE     PDBA = PDBE *ENDIF *END !! !!      CARGAS VIENTO DE DISEÑO      !! !! *CREATE, CARGAS_VIENTO FINISH /SOLU ANTYPE,0 /Com, Cargas Muertas !Se utiliza como factor de carga muerta el valor de 1.1, !obtenido de las NTC 2017 ACEL, ,9.81*1.1      !Peso Propio amplificado CMPA = CMPI*1.1      !Carga de piso amplificada CMMMA = CMMQ*1.1      !Carga de maqnaria amplificada !Cargas de sistema de piso      Cuarto de maquinas y azotea KSEL, S, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV)+24+12 !Kp extremos FK,ALL,FY,-CMPA*ARRE*0.5      !Media carga KSEL, ALL KSEL, S, LOC, Y, HTOR      !Piso azotea KSEL, A, LOC, Y, (HTOR-HAMO)      !Cuarto de maquinas KSEL, U, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV)+24+12 !Quitar Kp extremos FK,ALL,FY,-CMPA*ARRE      !Carga completa KSEL, ALL !Cargas de maquinaria      Solo cuarto de maquinas KSEL, S, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV-1)+24+12 !Kp extremos FK,ALL,FY,-CMMMA*ARRE*0.5      !Media carga KSEL, ALL KSEL, S, LOC, Y, (HTOR-HAMO)      !Cuarto de maquinas KSEL, U, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV-1)+24+12 !Quitar Kp extremos </pre> | <pre> FK,ALL,FY,-CMMMA*ARRE      !Carga completa KSEL, ALL /Com, Cargas Vivas Accidentales !Se utiliza como factor de carga viva el valor de 1.1, !obtenido de las NTC 2017 CVAA = CVAA*1.1      !Carga máxima de azotea amplificada CVEA = CVAE*1.1      !Carga máxima de entrepiso amplificada !Cargas de entrepiso      Cuarto de maquinas KSEL, S, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV-1)+24+12 !Kp extremos FK,ALL,FY,-CVME*ARRE*0.5      !Media carga KSEL, ALL KSEL, S, LOC, Y, (HTOR-HAMO)      !Cuarto de maquinas KSEL, U, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV)+24+12 !Quitar Kp extremos FK,ALL,FY,-CVME*ARRE      !Carga completa KSEL, ALL !Cargas de azotea      Cuarto de azotea KSEL, S, KP, ,12*(NNIV)+24+1,12*(NNIV)+24+12 !Kp extremos FK,ALL,FY,-CVMA*ARRE*0.5      !Media carga KSEL, ALL KSEL, S, LOC, Y, (HTOR)      !Cuarto de azotea KSEL, U, KP, ,12*(NNIV)+24+1,12*(NNIV)+24+12 !Quitar Kp extremos FK,ALL,FY,-CVMA*ARRE      !Carga completa KSEL, ALL /Com, Cargas de Viento !Se utiliza como factor de carga el valor de 1.1, !obtenido de las NTC 2017 !Losa factores de 2.3 y 1.8 se obtienen del apartado para Torres !de celosía aisladas, del método estático del Manual de Obras !civiles, en su apartado de fuerzas de viento, versión 2007. Son !relacion de solidez &gt;=5. !Para el resto de la torre donde no estan cubiertas las caras, !el factor será de 0.2 considerando ancho de columnas de 20 cms !peralte de vigas de 20 cms y ancho de ptr de 7.62 cms, no se !consideran rigidizantes. Los factores serán de 2.8 y 3.2 CWC1 = PDBA*1.1*1.8      !Presion Cara R1 CWE1 = PDBA*1.1*2.3      !Presión Esquina R1 CWC2 = PDBA*1.1*2.8      !Presion Cara R2 CWE2 = PDBA*1.1*3.2      !Presión Esquina R2 </pre> |
|---|--|

```

!Longitud de contraventeo
LOCT = (((0.5*LLMO)**2)+(HAMO**2))**0.5
!En calculo de fuerzas se usara la mitad de LOCT,
!ya que no todos los pisos cargan presiones en CT
!Fuerzas de viento
FWM1 = CWE2*(PEVI*LLMO+ANCI*HAMO)+CWC2*(ACTI*LOCT)*0.5
FWM2 = CWE2*(PEVS*LLMO+ANCS*HAMO)+CWC2*(ACTS*LOCT)*0.5
FWM3 = 0.5*FWM1 + 0.5*FWM2
FWM4 = (0.8*CWC1+0.2*CWE1)*(LLMO*HAMO)
FWM5 = 0.5*FWM2+0.5*FWM4
FWM6 = 0.5*FWM4
!Para los kp del módulo inferior
KSEL, S, KP, ,12*(1)+24+1,12*(NNMI-1)+24+12
FK,ALL,FZ, FWM1
KSEL, ALL
!Para los kp del centro de la torre
KSEL, S, KP, ,12*(NNMI)+24+1,12*(NNMI)+24+12
FK,ALL,FZ, FWM3
KSEL, ALL
!Para los kp del módulo superior
KSEL, S, KP, ,12*(NNMI+1)+24+1,12*(NNIV-2)+24+12
FK,ALL,FZ, FWM2
KSEL, ALL
!Para los kp del cuarto de mquinas
KSEL, S, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV-1)+24+12
FK,ALL,FZ, FWM5
KSEL, ALL
!Para los kp de la azotea
KSEL, S, KP, ,12*(NNIV)+24+1,12*(NNIV)+24+12
FK,ALL,FZ, FWM6
KSEL, ALL
EPLLOT
FINISH
/SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
SET, LAST

PLDISP,1
/COM, Se obtienen los elementos mecánicos y se añaden a tablas de
elementos
ESEL,ALL
EMEC(1) = 'FAXI' !Fuerzas axiales iniciales
EMEC(2) = 'FAXF' !Fuerzas axiales finales
EMEC(3) = 'MO1' !Momento 1 inicial
EMEC(4) = 'MO1F' !Momento 1 final
EMEC(5) = 'MO2' !Momento 2 inicial
EMEC(6) = 'MO2F' !Momento 2 final
EMEC(7) = 'FC1' !Cortante 1 inicial
EMEC(8) = 'FC1F' !Cortante 1 final
EMEC(9) = 'FC2' !Cortante 2 inicial
EMEC(10) = 'FC2F' !Cortante 2 final
!Se obtienen los elementos mecánicos
ETABLE,FAXI,SMISC,1
ETABLE,FAXF,SMISC,14
ETABLE,MO1,SMISC,2
ETABLE,MO1F,SMISC,15
ETABLE,MO2,SMISC,3
ETABLE,MO2F,SMISC,16
ETABLE,FC1,SMISC,5
ETABLE,FC1F,SMISC,18
ETABLE,FC2,SMISC,6
ETABLE,FC2F,SMISC,19
!PLLS,EMEC(1),EMEC(1),-0.1 !Para plotear los elem mecanicos
*DO,I,1,10,1
*DIM, AUXI, ,ETOT !Vector de apoyo
*VGET,AUXI,ELEM,,ETAB,EMEC(I)
*DO,J,1,ETOT,1
MCVI(J,I) = AUXI(J)
*ENDDO
*DEL,AUXI
*ENDDO
ESEL,ALL
!ESEL, S,ELEM, ,ELAC(3)+1, ELAC(4)
!EPLLOT
!Se corrigen los valores de los link, solo se usa axial inicial
*DO, I,ELAC(4)+1,ELAC(8)

```



|  |                                       |   |
|--|---------------------------------------|---|
| !Cargas de maquinaria  | Solo cuarto de maquinas               | !peralte de vigas de 20 cms y ancho de ptr de 7.62 cms, no se |
| KSEL, S, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV-1)+24+12 !Kp extremos        |                                       | !consideran rigidizantes. Los factores serán de 2.8 y 3.2     |
| FK,ALL,FY,-CMMA*ARRE*0.5   | !Media carga                          | CWC1 = PDBA*1.0*1.8 !Presion Cara R1                          |
| KSEL, ALL  |                                       | CWE1 = PDBA*1.0*2.3 !Presión Esquina R1                       |
| KSEL, S, LOC, Y, (HTOR-HAMO)   | !Cuarto de maquinas                   | CWC2 = PDBA*1.0*2.8 !Presion Cara R2                          |
| KSEL, U, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV-1)+24+12 !Quitar Kp extremos |                                       | CWE2 = PDBA*1.0*3.2 !Presión Esquina R2                       |
| FK,ALL,FY,-CMMA*ARRE   | !Carga completa                       | !Longitud de contraventeo                                     |
| KSEL, ALL  |                                       | LOCT = (((0.5*LLMO)**2)+(HAMO**2))**0.5                       |
| /Com, Cargas Vivas Accidentales                                      |                                       | !En calculo de fuerzas se usara la mitad de LOCT,             |
| !Se utiliza como factor de carga viva el valor de 0.9,               |                                       | !ya que no todos los pisos cargan presiones en CT             |
| !obtenido de las NTC 2017  |                                       | !Fuerzas de viento  |
| CVAA = CVAA*0.9  | !Carga máxima de azotea amplificada   | FWM1 = CWE2*(PEVI*LLMO+ANCI*HAMO)+CWC2*(ACT*LOCT)*0.5         |
| CVEA = CVAE*0.9<br>amplificada                                       | !Carga máxima de entepiso amplificada | FWM2 = CWE2*(PEVS*LLMO+ANCS*HAMO)+CWC2*(ACTS*LOCT)*0.5        |
| !Cargas de entepiso  | Cuarto de maquinas                    | FWM3 = 0.5*FWM1 + 0.5*FWM2                                    |
| KSEL, S, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV-1)+24+12 !Kp extremos        |                                       | FWM4 = (0.8*CWC1+0.2*CWE1)*(LLMO*HAMO)                        |
| FK,ALL,FY,-CVME*ARRE*0.5   | !Media carga                          | FWM5 = 0.5*FWM2+0.5*FWM4                                      |
| KSEL, ALL  |                                       | FWM6 = 0.5*FWM4   |
| KSEL, S, LOC, Y, (HTOR-HAMO)   | !Cuarto de maquinas                   | !Para los kp del módulo inferior                              |
| KSEL, U, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV)+24+12 !Quitar Kp extremos   |                                       | KSEL, S, KP, ,12*(1)+24+1,12*(NNMI-1)+24+12                   |
| FK,ALL,FY,-CVME*ARRE   | !Carga completa                       | FK,ALL,FZ, FWM1   |
| KSEL, ALL  |                                       | KSEL, ALL   |
| !Cargas de azotea  | Cuarto de azotea                      | !Para los kp del centro de la torre                           |
| KSEL, S, KP, ,12*(NNIV)+24+1,12*(NNIV)+24+12 !Kp extremos            |                                       | KSEL, S, KP, ,12*(NNMI)+24+1,12*(NNMI)+24+12                  |
| FK,ALL,FY,-CVMA*ARRE*0.5   | !Media carga                          | FK,ALL,FZ, FWM3   |
| KSEL, ALL  |                                       | KSEL, ALL   |
| KSEL, S, LOC, Y, (HTOR)  | !Cuarto de azotea                     | !Para los kp del módulo superior                              |
| KSEL, U, KP, ,12*(NNIV)+24+1,12*(NNIV)+24+12 !Quitar Kp extremos     |                                       | KSEL, S, KP, ,12*(NNMI+1)+24+1,12*(NNIV-2)+24+12              |
| FK,ALL,FY,-CVMA*ARRE   | !Carga completa                       | FK,ALL,FZ, FWM2   |
| KSEL, ALL  |                                       | KSEL, ALL   |
| /Com, Cargas de Viento   |                                       | !Para los kp del cuarto de máquinas                           |
| !Se utiliza como factor de servicio el valor de 1.0,                 |                                       | KSEL, S, KP, ,12*(NNIV-1)+24+1,12*(NNIV-1)+24+12              |
| !obtenido de las NTC 2017  |                                       | FK,ALL,FZ, FWM5   |
| !Los factores de 2.3 y 1.8 se obtienen del apartado para Torres      |                                       | KSEL, ALL   |
| !de celosía aisladas, del método estático del Manual de Obras        |                                       | !Para los kp de la azotea                                     |
| !civiles, en su apartado de fuerzas de viento, versión 2007. Son     |                                       | KSEL, S, KP, ,12*(NNIV)+24+1,12*(NNIV)+24+12                  |
| !relacion de solidez >=5.  |                                       | FK,ALL,FZ, FWM6   |
| !Para el resto de la torre donde no estan cubiertas las caras,       |                                       | KSEL, ALL   |
| !el factor será de 0.2 considerando ancho de columnas de 20 cms      |                                       | EPL0T   |

## ANEXOS

```

FINISH                                QTOR=2    !Se coloca ductilidad con valor de 2
/SOLU                                  DIRX=0.33 !30% del sismo por factor de 1.1
SOLVE                                  DIRY=0
FINISH                                  DIRZ=1.1  !100% del sismo por factor de 1.1
/POST1                                  /COM, Analisis espectral
SET, LAST                               ANTYPE,8
PLDISP,1                                SVTYP,2,1/QTOR,
/COM, Se obtiene el desplazamiento máximo lateral
SED,DIRX,DIRY,DIRZ,    !Dirección del sismo
NOSU = NODE(0,HTOR,LLMO*SIN(PI/3))    !Nodo superior de la torre
ROCK,0,0,0,0,0,0,
*GET, DESA, NODE, NOSU, U, Z
!Se introduce el espectro de respuesta, Suelo II, Región B, NTC93
/COM, Se obtiene la eficiencia de trabajo
FREQ, 0.2857, 0.3333,0.4000,0.5000,0.6666,3.3333,5.0000,10,100
DESP = 0.005*HTOR                      !Se usa el factor de la normativa NTCDF
2017 de 0.005*H                          !FREQ,0.01,0.1,0.2,0.333,0.4,0.5,0.666,0.833,1
SERV = DESA/DESP                          !FREQ,1.667,5,10,20,30,40,0,0,0
PESO(IND,2) = SERV                          SV, 0.15, 0.171, 0.189,0.213,0.248,0.3,0.3,0.227,0.153,0.08
*END                                         !SV,.15,0.01,.0392,0.0554,0.071,0.078,0.0876,0.098,0.113,0.124,
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  !SV,.15,0.16,0.16,0.105,0.0775,0.0683,0.06375,
!!      CARGAS SISMO DE DISEÑO      !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*CREATE, CARGAS_SISMO
/COM, Se realiza un analisis modal
FINISH
/SOLU
ANALISIS MODAL
ANALISIS MODAL
ANTYPE,2
EXPASS,1
MXPAND,10,0,300,1,0.001,
SOLVE
FINISH
/SOLU
!Analisis espectral
ANALISIS MODAL
ANTYPE,8
SPOPT,SPRS,10,0
SRSS,0.001,DISP
SOLVE
FINISH
/POST1
!SE INTRODUCE EL ARCHIVO MCOM GENERADO
*USE,FILE.MCOM
/TITLE,DESPLAZAMIENTOS TORRE POR SISMOX (MT)
PLDISP,1
/COM, Se señalan valores del reglamento NTC 1993

```





```

*ELSEIF,I,LE,ELAC(2)
    MCGR(I,19) = RAG2
*ELSEIF,I,LE,ELAC(3)
    MCGR(I,19) = RAG5
*ELSEIF,I,LE,ELAC(4)
    MCGR(I,19) = RAG6
*ELSEIF,I,LE,ELAC(5)
    MCGR(I,19) = RAG3
*ELSEIF,I,LE,ELAC(6)
    MCGR(I,19) = RAG4
*ELSEIF,I,LE,ELAC(7)
    MCGR(I,19) = RAG7
*ELSE
    MCGR(I,19) = RAG8
*ENDIF
*ENDIF
MCGR(I,20) = LNGI*100
*COM, Se obtiene el factor de reducci3n por esbeltez
MCGR(I,21) = 1*MCGR(I,20)/(MCGR(I,19))
*COM, Se obtiene el factor de reducci3n por esbeltez
MCGR(I,22) = (PI**2)*(MEAC/(100**2))/((MCGR(I,21))**2)
*COM, Se obtiene el porcentaje de trabajo a compresi3n
MCGR(I,23) = (1+(EFY2/MCGR(I,22))**1.4)**(-1/1.4)
*COM, Se obtiene el porcentaje de trabajo a compresi3n
MCGR(I,24) = MCGR(I,16)*FRCO*EFY2*MCGR(I,23)
*COM, Se obtiene el esfuerzo cr3tico de Euler
MCGR(I,25) = ABS(MCGR(I,12))/MCGR(I,24)
*COM, Se obtiene el esfuerzo cr3tico de Euler
*ENDIF
*ENDDO
AUXI = 0
*COM, Se obtiene el momento nominal, en este caso pl3stico de la secci3n
*DO, I, ELAC(4)+1, ELAC(8),1
    *IF,MCGR(I,25),GT,AUXI,THEN
        AUXI = MCGR(I,25)
    *ELSE
        AUXI = AUXI
    *ENDIF
*ENDDO
PESO(IND,4) = AUXI
*COM, CARGAS VIENTO
MPL1 = (EFY1*(100**2))*MZX1
*COM, Se obtiene el momento nominal, en este caso pl3stico de la secci3n
MPL2 = (EFY1*(100**2))*MZX2
*COM, Se obtiene el momento nominal, en este caso pl3stico de la secci3n
MPL5 = (EFY1*(100**2))*MZX5
*COM, Se obtiene el momento nominal, en este caso pl3stico de la secci3n
MPL6 = (EFY1*(100**2))*MZX6

```

!Se obtiene el momento por pandeo local del patin comprimido, para secciones tipo 1

$$MNP1 = \frac{MPL1 - (MPL1 - EFY1 * MSX1 * 0.01) * (3.57 * (ANCI/ESCI) * SQRT(EFY1 * 100 * 100 / MEAC) - 4)}{1}$$

\*IF, ANCI/ESCI, LE, 1.12 \* SQRT(MEAC / (EFY1 \* 100 \* 100)), THEN

MPL1 = MPL1

\*ELSE

\*IF, MNP1, LE, MPL1, THEN

MPL1 = MNP1

\*ELSE

MPL1 = MPL1

\*ENDIF

\*ENDIF

!Se obtiene el momento por pandeo local del patin comprimido, para secciones tipo 5

$$MNP5 = \frac{MPL5 - (MPL5 - EFY1 * MSX5 * 0.01) * (3.57 * (ANCS/ESCS) * SQRT(EFY1 * 100 * 100 / MEAC) - 4)}{1}$$

\*IF, ANCS/ESCS, LE, 1.12 \* SQRT(MEAC / (EFY1 \* 100 \* 100)), THEN

MPL5 = MPL5

\*ELSE

\*IF, MNP5, LE, MPL5, THEN

MPL5 = MNP5

\*ELSE

MPL5 = MPL5

\*ENDIF

\*ENDIF

\*DO, I, 1, ETOT, 1

\*IF, I, LE, ELAC(1), THEN

MCGR(I, 26) = MPL1 \* FRFL

\*ELSEIF, I, LE, ELAC(2)

MCGR(I, 26) = MPL2 \* FRFL

\*ELSEIF, I, LE, ELAC(3)

MCGR(I, 26) = MPL5 \* FRFL

\*ELSEIF, I, LE, ELAC(4)

MCGR(I, 26) = MPL6 \* FRFL

\*ELSE

MCGR(I, 26) = 0

\*ENDIF

\*ENDDO

\*DO, I, 1, ELAC(4), 1

!Porcentaje de trabajo Momento1

$$MCGR(I, 27) = MCGR(I, 13) / MCGR(I, 26)$$

!Porcentaje de trabajo Momento2

$$MCGR(I, 28) = MCGR(I, 14) / MCGR(I, 26)$$

\*ENDDO

/COM, Cargas de viento

/COM, Se revisara solo la fluncia como estado limite

!Al ser compactos los perfiles, no aplican las demás revisiones

!Se obtiene el momento nominal, en este caso plástico de la sección

$$MPL1 = (EFY1 * (100 ** 2)) * MZX1$$

$$MPL2 = (EFY1 * (100 ** 2)) * MZX2$$

$$MPL5 = (EFY1 * (100 ** 2)) * MZX5$$

$$MPL6 = (EFY1 * (100 ** 2)) * MZX6$$

!Se obtiene el momento por pandeo local del patin comprimido, para secciones tipo 3

$$MNP1 = \frac{MPL1 - (MPL1 - EFY1 * MSX1 * 0.01) * (3.57 * (ANCI/ESCI) * SQRT(EFY1 * 100 * 100 / MEAC) - 4)}{1}$$

\*IF, ANCI/ESCI, LE, 1.12 \* SQRT(MEAC / (EFY1 \* 100 \* 100)), THEN

MPL1 = MPL1

\*ELSE

\*IF, MNP1, LE, MPL1, THEN

MPL1 = MNP1

\*ELSE

MPL1 = MPL1

\*ENDIF

\*ENDIF

$$MNP5 = \frac{MPL5 - (MPL5 - EFY1 * MSX5 * 0.01) * (3.57 * (ANCS/ESCS) * SQRT(EFY1 * 100 * 100 / MEAC) - 4)}{1}$$

\*IF, ANCS/ESCS, LE, 1.12 \* SQRT(MEAC / (EFY1 \* 100 \* 100)), THEN

MPL5 = MPL5

\*ELSE

\*IF, MNP5, LE, MPL5, THEN

MPL5 = MNP5

\*ELSE

MPL5 = MPL5

\*ENDIF

\*ENDIF

\*DO, I, 1, ETOT, 1

\*IF, I, LE, ELAC(1), THEN

MCVI(I, 26) = MPL1 \* FRFL







