



## Trabajo Fin de Grado

# Análisis resistente de la estructura de una torre de alta tensión

Autor

Fernando Hórreo González

Directora

Elena Ibarz Montaner

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel

2019



## RESUMEN

Son diversos los modelos de torre utilizados para el transporte de energía, dependiendo de la zona en la que se encuentren o el uso que se le dé.

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se plantea el análisis estructural mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) de un diseño comercial de torre de alta tensión.

Con este proyecto se pretende observar el comportamiento de dicha torre sometida a unas condiciones específicas, mediante análisis tanto estático como de pandeo.

Durante el análisis resistente se llevará a cabo el ajuste de los diferentes tipos de perfil que componen la torre, bien sea para su optimización mediante su reducción en peso, como para sobredimensionar las zonas más críticas de la torre, en caso de ser necesario.

Este TFG hace referencia al análisis resistente de la estructura metálica de una torre de alta tensión de cara al dimensionado óptimo de sus perfiles, por lo que queda fuera del alcance de este estudio todo lo referente a planos y detalles constructivos, así como el cálculo de la cimentación.

## ABSTRACT

Several models of electric towers have been used to transport energy.

In this work, end of degree, the structural analysis is proposed by the Method of the finite elements (FEM) of a commercial design of high voltage tower.

The aim of this project is to observe the behaviour of this tower under specific conditions, by means of both static and buckling analysis.

During the resistant analysis, the adjustment of the different types of beams that make up the tower will be carried out, either for its optimization through its weight reduction or to oversize the most critical areas of the tower if necessary.

This work refers to the resistant analysis of the metallic structure of a high voltage tower with a view to the optimal dimensioning of its beams, so it is outside the scope of this study everything regarding plans and construction details, as well as the calculation of the foundation.



## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>1</b>
<b>LISTADO DE IMÁGENES.....</b>	<b>4</b>
<b>LISTADO DE TABLAS.....</b>	<b>6</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
1.1. Descripción del TFG.....	7
1.2. Objetivos y alcance .....	7
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>8</b>
2.1. Descripción de tipos de torres .....	8
2.2. Problemática .....	11
<b>3. DEFINICIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO .....</b>	<b>12</b>
3.1. Definición del modelo geométrico .....	12
3.1.1. Tramo I .....	12
3.1.2. Tramo II .....	13
3.1.3. Tramo III.....	14
3.1.4. Tramo IV .....	14
3.2. Definición del modelo de elementos finitos .....	16
3.2.1. Características de la malla.....	18
3.2.2. Propiedades de los materiales .....	19
3.2.3. Condiciones de contorno .....	20
<b>4. ANÁLISIS ESTÁTICO .....</b>	<b>28</b>
4.1. Resultados de tensiones.....	28
4.2. Resultados de deformadas .....	34
4.3. Resultados de desplazamientos.....	38
<b>5. ANÁLISIS A PANDEO .....</b>	<b>44</b>
5.1. Modos de pandeo .....	44
5.2. Conclusiones.....	49
<b>6. CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS.....</b>	<b>50</b>
6.1. Conclusiones.....	50
6.2. Futuros estudios .....	50
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO 1: PERFILES CONVENCIONALES EMPLEADOS .....</b>	<b>52</b>



ANEXO 2: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	55
ANEXO 3: RESULTADOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS PARA EL SEGUNDO ANÁLISIS .....	58
ANEXO 4: RESULTADOS DE LAS DEFORMADAS PARA EL SEGUNDO ANÁLISIS .....	72
ANEXO 5: CÁLCULOS DE LAS FUERZAS A APLICAR EN LA SIMULACIÓN. ....	80
ANEXO 6: CÁLCULO DEL CABLEADO TIPO CATENARIA. ....	83



## LISTADO DE IMÁGENES

<i>Figura 1. Poste de madera [1]</i> .....	8
<i>Figura 2. Poste de hormigón [2]</i> .....	9
<i>Figura 3. Tipos de torres de alta tensión [3]</i> .....	9
<i>Figura 4. Torres de suspensión [4]</i> .....	10
<i>Figura 5. Torres de retención [5]</i> .....	10
<i>Figura 6. Torres de remate [6]</i> .....	11
<i>Figura 7. Cabeza de la torre (Tramo 1)</i> .....	13
<i>Figura 8. Cuerpo en V (Tramo 2)</i> .....	13
<i>Figura 9. Cuerpo piramidal (Tramo 3)</i> .....	14
<i>Figura 10. Base de la torre (Tramo 4)</i> .....	15
<i>Figura 11. Ensamblaje de la torre mediante SolidWorks</i> .....	15
<i>Figura 12. Vista 3D de los perfiles utilizados</i> .....	16
<i>Figura 13. Código de colores de los diferentes perfiles utilizados en la torre</i> .....	17
<i>Figura 14. Perfiles utilizados</i> .....	17
<i>Figura 15. Modelo de elementos finitos de la torre de alta tensión</i> .....	19
<i>Figura 16. Perfil angular de acero</i> .....	19
<i>Figura 17. Empotramiento de la torre de alta tensión</i> .....	20
<i>Figura 18. Mapa geográfico de las altitudes sobre el nivel del mar [9]</i> .....	21
<i>Figura 19. Altitud sobre el nivel del mar de la ciudad de Teruel [10]</i> .....	21
<i>Figura 20. Peso propio de la torre de alta tensión</i> .....	22
<i>Figura 21. Cargas permanentes en la torre de alta tensión</i> .....	22
<i>Figura 22. Viento frontal aplicado a la torre de alta tensión</i> .....	23
<i>Figura 23. Perspectiva viento lateral aplicado a la torre</i> .....	23
<i>Figura 24. Sobrecarga motivada por el hielo</i> .....	24
<i>Figura 25. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-1</i> .....	29
<i>Figura 26. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-2</i> .....	29
<i>Figura 27. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-3</i> .....	29
<i>Figura 28. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-4</i> .....	29
<i>Figura 29. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-5</i> .....	30
<i>Figura 30. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-6</i> .....	30
<i>Figura 31. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-7</i> .....	30
<i>Figura 32. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-8</i> .....	30
<i>Figura 33. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-1</i> .....	32
<i>Figura 34. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-2</i> .....	32
<i>Figura 35. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-3</i> .....	32
<i>Figura 36. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU4</i> .....	32
<i>Figura 37. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-5</i> .....	33
<i>Figura 38. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-6</i> .....	33
<i>Figura 39. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-7</i> .....	33
<i>Figura 40. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-8</i> .....	33
<i>Figura 41. Análisis de deformadas para la hipótesis 1</i> .....	34
<i>Figura 42. Análisis de deformadas para la hipótesis 2</i> .....	35
<i>Figura 43. Análisis de deformadas para la hipótesis 3</i> .....	35
<i>Figura 44. Análisis de deformadas para la hipótesis 4</i> .....	36



<i>Figura 45. Análisis de deformadas para la hipótesis 5.....</i>	36
<i>Figura 46. Análisis de deformadas para la hipótesis 6.....</i>	37
<i>Figura 47. Análisis de deformadas para la hipótesis 7.....</i>	37
<i>Figura 48. Análisis de deformadas para la hipótesis 8.....</i>	38
<i>Figura 49. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 1 .....</i>	39
<i>Figura 50. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 2 .....</i>	39
<i>Figura 51. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 3 .....</i>	40
<i>Figura 52. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 4 .....</i>	40
<i>Figura 53. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 5 .....</i>	41
<i>Figura 54. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 6 .....</i>	41
<i>Figura 55. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 7 .....</i>	42
<i>Figura 56. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 8 .....</i>	42
<i>Figura 57. Análisis de pandeo para la hipótesis 1.....</i>	45
<i>Figura 58. Análisis de pandeo para la hipótesis 2.....</i>	45
<i>Figura 59. Análisis de pandeo para la hipótesis 3.....</i>	46
<i>Figura 60. Análisis de pandeo para la hipótesis 4.....</i>	46
<i>Figura 61. Análisis de pandeo para la hipótesis 5.....</i>	47
<i>Figura 62. Análisis de pandeo para la hipótesis 6.....</i>	47
<i>Figura 63. Análisis de pandeo para la hipótesis 7.....</i>	48
<i>Figura 64. Análisis de pandeo para la hipótesis 8.....</i>	48
<i>Figura 65. Perfil L45x45x5 .....</i>	52
<i>Figura 66. Perfil L50x50x6 .....</i>	52
<i>Figura 67. Perfil L60x60x6 .....</i>	53
<i>Figura 68. Perfil L70x70x7 .....</i>	53
<i>Figura 69. Perfil L80x80x8 .....</i>	54
<i>Figura 70. Perfil L100x100x12 .....</i>	54
<i>Figura 71. Método de elementos finitos (MEF) .....</i>	55
<i>Figura 72. Elemento lineal .....</i>	56
<i>Figura 73. Elemento plano .....</i>	56
<i>Figura 74. Elemento sólido.....</i>	57
<i>Figura 75. Esquema del análisis mediante elementos finitos (MEF) .....</i>	57
<i>Figura 76. Resultados desde diferentes ángulos de los desplazamientos de la torre .....</i>	65
<i>Figura 77. Desplazamientos tomados sobre el eje X (ELS) .....</i>	67
<i>Figura 78. Desplazamientos tomados sobre el eje Y (ELS) .....</i>	69
<i>Figura 79. Desplazamientos tomados sobre el eje Z (ELS) .....</i>	71
<i>Figura 80. Resultados desde diferentes ángulos de las deformadas de la torre .....</i>	79
<i>Figura 81. Cálculo de sobrecarga de hielo en los conductores de la torre.....</i>	80
<i>Figura 82. Cálculo del viento frontal sobre la estructura de la torre.....</i>	80
<i>Figura 83. Cálculo de los manguitos de hielo sobre los conductores de la torre .....</i>	81
<i>Figura 84. Cálculo del viento lateral con sobrecarga de hielo en los conductores de la torre .....</i>	81
<i>Figura 85. Cálculo del viento lateral sobre los conductores de la torre sin sobrecarga de hielo .....</i>	82
<i>Figura 86. Esquema del cable de una torre de tipo catenaria.....</i>	83



## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Secciones utilizadas en la construcción de la torre .....	16
Tabla 2. Número de nodos y elementos de los que se compone la torre .....	18
Tabla 3. Elementos de la torre clasificados por sección y color .....	18
Tabla 4. Tabla resumen de las diferentes fuerzas a aplicar en las hipótesis .....	24
Tabla 5a. Hipótesis de cálculo utilizadas para la simulación de la torre.....	23
Tabla 5b. Hipótesis de cálculo utilizados para la simulación de la torre (ELU). Para esfuerzos y tensiones .....	24
Tabla 5c. Hipótesis de cálculo utilizadas para la simulación de la torre (ELS). Para desplazamiento.....	24
Tabla 6. Descripción de las hipótesis .....	27
Tabla 7. Resultados de las hipótesis ELU correspondientes a las tensiones que soporta la estructura .	31
Tabla 8. Resultados de las hipótesis ELU correspondientes a las tensiones que soporta la estructura después de las modificaciones.....	34
Tabla 9. Resultados de las hipótesis ELS correspondientes a los desplazamientos .....	43
Tabla 10. Resumen de fuerzas de compresión máxima en las diferentes hipótesis .....	44
Tabla 11. Resumen de factores de carga crítica.....	49



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción del TFG

El presente Trabajo de Fin de Grado trata de la modelización y el análisis estructural mediante el método de Elementos Finitos (MEF) de un diseño real de torre eléctrica. Para realizar dicho trabajo, primero se modela cada uno de los perfiles de la torre eléctrica mediante el software de diseño 3D, SolidWorks 2014, y una vez se ha ensamblado y finalizado el modelo geométrico, se realiza el análisis resistente de la estructura, mediante el Método de los Elementos Finitos, utilizando el programa I-deas 11 NX Series de PLM software.

De este modo, para la realización del TFG, se han utilizado como programas específicos:

- SolidWorks para el diseño geométrico.
- I-deas para la generación del modelo de Elementos Finitos, el cálculo y el procesado de resultados.

### 1.2. Objetivos y alcance

En la actualidad existen numerosos modelos de torres eléctricas que se utilizan para la distribución eléctrica de alta y baja tensión. La estructura principal de dichas torres puede construirse en diferentes materiales y con distintos diseños. Las de mayor envergadura, por lo general, están formadas por celosías de acero y se caracterizan por su elevada altura y su esbeltez.

En este TFG se plantea el análisis estructural mediante Elementos Finitos de un diseño real de torre eléctrica de alta tensión, ampliamente utilizada en la actualidad, de cara a comprobar su comportamiento resistente y a plantear, en caso necesario, propuestas de mejora y optimización de su diseño actual, lo que podría suponer una mejora muy competitiva para el sector. La ubicación propuesta para la torre analizada será Teruel.



## 2. ANTECEDENTES

Las torres eléctricas son estructuras de gran altura y envergadura, construidas de diferentes materiales y concebidas principalmente para servir de soporte a los conductores eléctricos que albergan las líneas de alta tensión.

Una torre eléctrica de alta tensión es una estructura construida en celosía de acero, cuya función no es otra que la de soportar el peso de los conductores y cables de guarda. De esta manera se hace posible el transporte de la energía eléctrica a través de líneas formadas por varias torres eléctricas.

Este tipo de torres pueden tener una amplia variedad de tamaños y de formas, dependiendo de su localización geográfica, así como de en qué zona de la línea se encuentre. De este modo, los rangos de altura de este tipo de torres suelen oscilar entre los 15 metros y los 55 metros. Las diferentes tipologías se describen en el apartado siguiente, donde se incluyen imágenes con las características fundamentales de cada una de ellas.

### 2.1. Descripción de tipos de torres

Dentro del transporte de energía eléctrica aérea existen multitud de estructuras diferentes dependiendo de la zona o lugar en el que se localiza.

Generalmente los tipos de torres existentes en la actualidad se dividen en tres grandes grupos dependiendo del material con que se construyen y de su funcionalidad. Estos tipos de torres son los detallados a continuación:

#### ➤ Postes de madera

Este tipo de apoyos es casi exclusivo de la baja tensión, además son estructuras que están en claro desuso. La principal ventaja de este tipo de postes es la facilidad a la hora de su transporte e instalación.



Figura 1. Poste de madera [1]

### ➤ Postes de hormigón

Este tipo de postes son los más utilizados en la actualidad en las líneas de baja tensión. La ventaja principal de este tipo de estructura es su duración ilimitada en el tiempo y la ausencia de mantenimiento.



Figura 2. Poste de hormigón [2]

### ➤ Torres metálicas

Se trata de celosías de acero ensambladas mediante perfiles tipo L. Este tipo de estructuras son muy esbeltas, por lo que presentan elevadas exigencias desde el punto de vista de su comportamiento resistente. Principalmente se usan el transporte de líneas de media y alta tensión. Los principales tipos de torres vienen detalladas en la siguiente imagen:

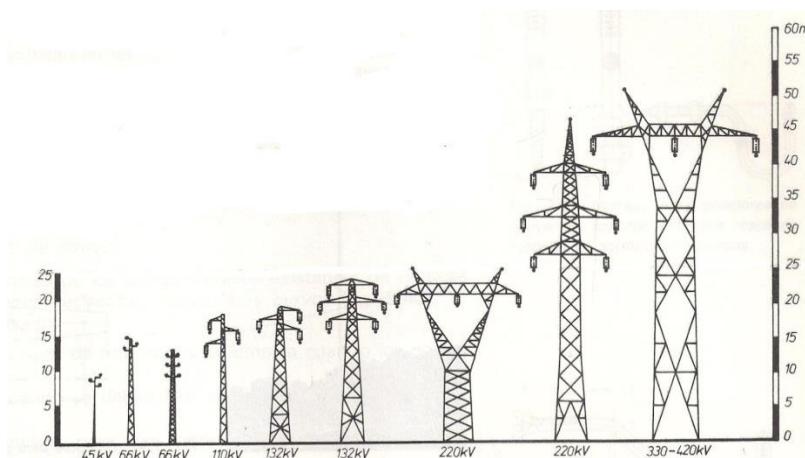


Figura 3. Tipos de torres de alta tensión [3]

El estudio de este TFG se centra en lo que concierne a las torres metálicas, por lo que se realiza una revisión de los tipos de estructuras metálicas existentes hoy en día. Estas estructuras

difieren dependiendo del voltaje que máximo que puede transportar la línea de alta tensión. Además, dependiendo de la posición que ocupa cada torre a lo largo de la línea se pueden encontrar tres grandes grupos de torres:

### 1. Torres de suspensión

Este tipo de torres tienen la función de soportar el poseo de los cables, aisladores y herrajes que componen la torre, además del viento que incida sobre la estructura. Las torres de suspensión son utilizadas en los tramos rectos de la línea de transmisión.



Figura 4. Torres de suspensión [4]

### 2. Torres de retención

Soportan las mismas cargas que las torres de suspensión, pero con la diferencia de que este tipo de torres también soportan las cargas transversales producidas por el ángulo entre los cables de entrada y salida de la torre. Principalmente se utilizan en zonas donde se necesita un cambio de dirección de la línea. Además son más robustas para soportar de esta forma los esfuerzos a los que es sometida la torre, en general mayores que los ejercidos en una torre de suspensión.



Figura 5. Torres de retención [5]

### 3. Torres de remate

El último tipo de torre se coloca al inicio y al final de cada una de las líneas de transmisión. Son torres que soportan una carga muy grande, por lo que son estructuras robustas y con una mejor cimentación que cualquier otro tipo de torres.



Figura 6. Torres de remate [6]

## 2.2. Problemática

Desde los tiempos en que se descubre la electricidad como una alternativa para mejorar la calidad de vida, se ha generado una gran demanda de energía, necesaria no sólo para uso doméstico, sino que la gran mayoría de la energía va destinada al sector industrial.

De este modo, para transportar esa energía desde las centrales hasta los puntos de abastecimiento se necesitan de líneas para su transporte. Es ahí donde surge el concepto de torre de alta tensión.

La principal problemática reside en la optimización de la estructura, intentando aligerar el peso de los perfiles que conforman la torre pero manteniendo el nivel resistente necesario. Así, mediante la optimización de los perfiles, se logran estructuras más esbeltas con un menor coste de material, pero se hace vital comprobar tanto su funcionalidad resistente como la inexistencia de problemas por inestabilidad (pandeo).



### 3. DEFINICIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

#### 3.1. Definición del modelo geométrico

Una vez observados los tipos de torres que existen en la actualidad, tal y como se explica en el apartado 2.1 “Descripción de tipos de torres”, el presente documento se centra en las estructuras metálicas de celosía.

Para realizar el modelo geométrico de la estructura, se desglosa la estructura en cuatro grandes tramos, diferenciados para facilitar el proceso de modelización mediante el software de CAD. Así, de acuerdo con cada una de las partes de las que se compone una torre eléctrica, se modela la estructura mediante la utilización de software de diseño 3D, SolidWorks, ampliamente utilizado en el sector del diseño de estructuras por la gran variedad de formas de trabajo que permite el programa.

Las torres metálicas tienen cuatro grandes bloques para desglosar que son:

- Cabeza de la torre. (Tramo I).
- Cuerpo en V. (Tramo II).
- Cuerpo piramidal. (Tramo III).
- Base de la torre. (Tramo IV).

A continuación se entra más en detalle en cada una de las partes modeladas para la construcción de la torre de alta tensión.

##### 3.1.1. Tramo I

Se trata de una celosía metálica, con una altura de 5.4 metros, y una anchura de 15.6 metros. Está fabricada mediante perfiles convencionales de tipo angular, con diferentes secciones (80x80x8, 70x70x7, 60x60x6, 50x50x5 y 45x45x5), los cuales serán detallados posteriormente en el apartado 3.2 “Definición del modelo de elementos finitos”.

Dicho tramo es el más alto de la estructura y es la llamada “Cabeza de la torre”. Su principal funcionalidad es la de soportar el peso de los tirantes que cuelgan de ella (cables por los que se transporta la electricidad), a través de los aisladores de suspensión. En concreto, el tramo I soporta en este caso las tres fases (R, S y T), y los dos cables de guarda, situados en las dos puntas más altas de la torre.

Este tramo de torre está anclado al tramo II, mediante unos soportes, con la tornillería adecuada.

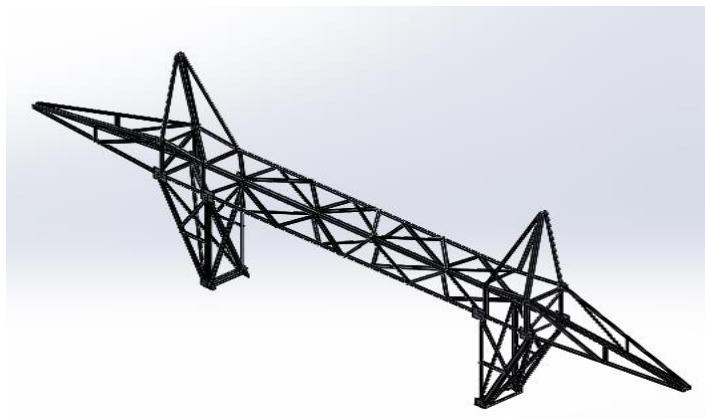


Figura 7. Cabeza de la torre (Tramo 1)

### 3.1.2. Tramo II

Este tramo es el llamado “Cuerpo de la torre” o “Cuerpo en V” por la forma del mismo. Se trata de un entramado de perfiles angulares que dan rigidez a la estructura. Los principales perfiles que la componen son angulares de 80x80x8 en la parte externa y de 70x70x7 en la zona interna. El entramado está compuesto por perfiles de 45x45x5 y lateralmente de 60x60x6.

En este tramo se observa como en la parte superior es donde se apoya el tramo I, explicado en el apartado anterior. Por otra parte, en la zona inferior, este tramo apoya sobre el tramo III, o cuerpo piramidal.

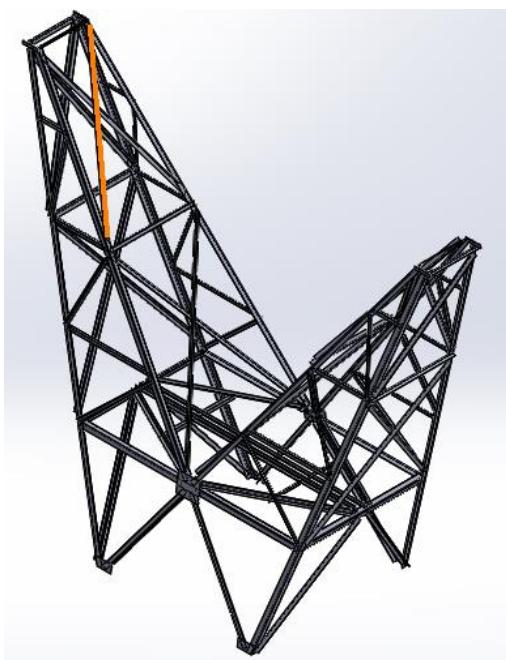


Figura 8. Cuerpo en V (Tramo 2)

### 3.1.3. Tramo III

El tramo III de la torre correspondiente al “Cuerpo piramidal” consiste en una celosía formada por perfiles angulares de 80x80x8 en la parte externa de la estructura y 60x60x6 en lo que al entramado interno se refiere.

Dicho tramo apoya sobre la base de la torre y da sujeción, en la zona superior, al tramo I y al tramo II. Además, tiene una gran anchura para poder soportar el peso de los tramos I y II, así como las cargas que soporta el tramo I de los cables de fase y los cables de guarda.

Este tramo tiene una altura de 5.5 metros y una base inferior de 4 metros y otra superior de 2.6 metros. El tramo queda detallado según la figura 9 que se expone a continuación.

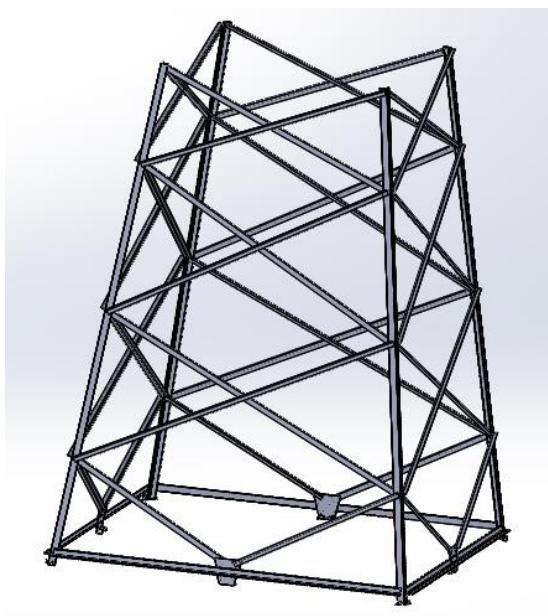


Figura 9. Cuerpo piramidal (Tramo 3)

### 3.1.4. Tramo IV

Con una altura de 5 metros y una base principal de 5.5 metros, se trata del tramo que está unido a la cimentación de la torre de alta tensión. Esta unión, tanto como la unión entre los diversos tramos, se realiza anclando los perfiles correspondientes entre sí, mediante la tornillería necesaria para que la unión sea adecuada para resistir los esfuerzos transmitidos.

Los perfiles utilizados en la base son de 80x80x8 en la parte externa de la base, y una celosía interna de 50x50x6 y de 45x45x5.

Este tramo además es el que le da estabilidad al resto de la estructura y los elementos que ésta lleva anclados, tales como aisladores, las tres fases y los cables de guarda.

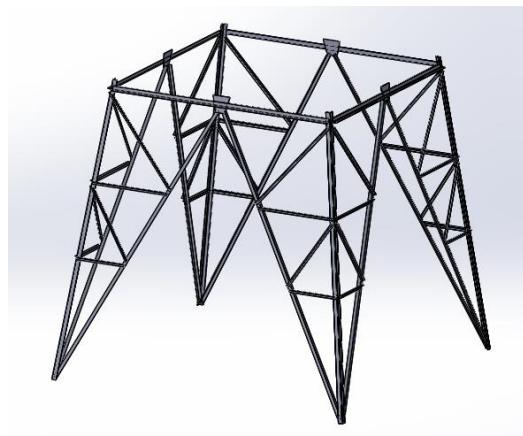


Figura 10. Base de la torre (Tramo 4)

Finalmente, se lleva a cabo el ensamblaje de los cuatro tramos explicados anteriormente, logrando así el modelo final completo de la estructura de la torre. Este modelo final está formado por el conjunto de los cuatro tramos modelizados. En la figura 11 se muestra el ensamblaje final de la torre diseñada mediante el programa de diseño SolidWorks.



Figura 11. Ensamblaje de la torre mediante SolidWorks

### 3.2. Definición del modelo de elementos finitos

Se genera el modelo de elementos finitos de la torre de alta tensión mediante el software I-deas. El uso de dicho programa para esta fase del TFG se debe a que este programa ofrece un mayor número de posibilidades de mallado (tanto manual como automático) y permite generar una malla de elementos finitos más adecuada a la geometría estructural de la torre.

En primer lugar, se importa a I-deas el modelo geométrico creado en SolidWorks, ya que una de las ventajas que tienen estos dos programas es la compatibilidad de sus archivos, facilitando de este modo poder utilizar diferentes programas en función de las necesidades específicas de los modelos.

En concreto, la alternativa elegida de utilizar los dos programas se debe a que SolidWorks es mucho mejor a la hora de realizar el modelo geométrico, ya que se trata de un programa mucho más intuitivo y fácil de manejar, mientras que I-deas es mucho más potente de cara al proceso de mallado, lo que conlleva una mayor fiabilidad en la simulación así como en los resultados finales. De este modo, el uso combinado de ambos programas permite al máximo la funcionalidad de los mismos.

A la hora de realizar la simulación se van a utilizar elementos tipo barra porque es el tipo de elemento que más se asemeja a la geometría de los diferentes perfiles estructurales de nuestro modelo. En concreto, todos los perfiles de los que está compuesta la torre de alta tensión son perfiles angulares.

Cada uno de estos elementos tendrá la sección original de la parte del modelo geométrico al que representa. Los perfiles utilizados para la construcción de dicha torre son los detallados a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 1. Secciones utilizadas en la construcción de la torre

Tipo de perfil	Sección del perfil
Angular L	80x80x8
Angular L	70x70x7
Angular L	60x60x6
Angular L	50x50x6
Angular L	45x45x5

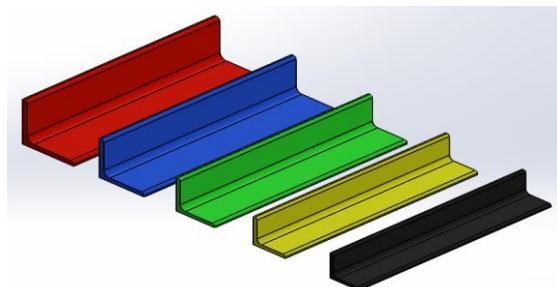


Figura 12. Vista 3D de los perfiles utilizados

A continuación se muestra la imagen de la estructura de celosía utilizada para el desarrollo del estudio. Esta imagen está sacada de la referencia [7]. En dicha imagen se ha establecido un código de colores, de tal modo que cada tipo de perfil está coloreado dependiendo de la sección utilizada (indicadas en la Tabla 1). Las características geométricas, dimensionales, así como los parámetros mecánicos fundamentales de los diferentes perfiles utilizados se pueden observar en el Anexo 1: “Perfiles convencionales empleados”.

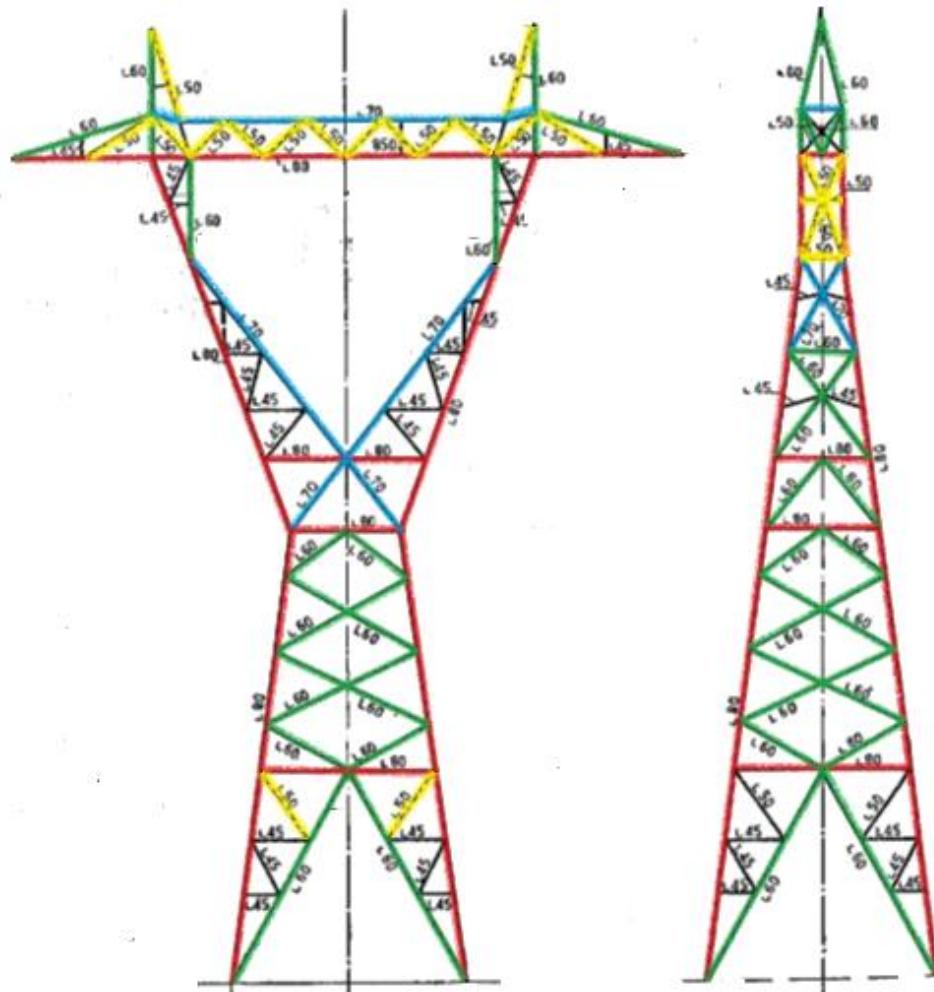


Figura 13. Código de colores de los diferentes perfiles utilizados en la torre

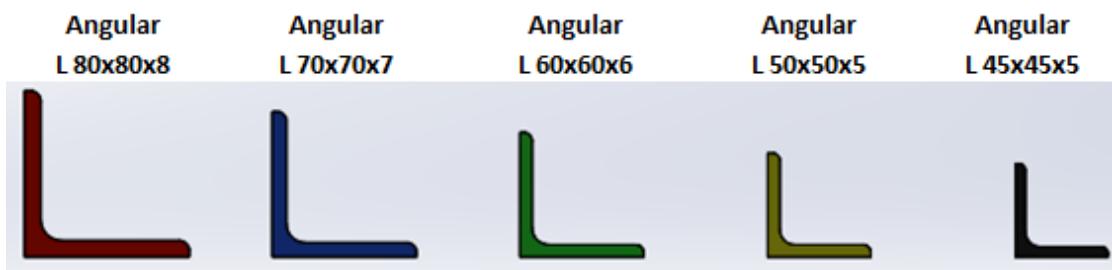


Figura 14. Perfiles utilizados



### 3.2.1. Características de la malla

Finalmente, el modelo de elementos finitos de la torre consta de 3747 elementos. De ellos, 3745 son elementos tipo barra, generados para modelizar los diferentes perfiles de la torre. Además, a parte de los elementos tipo barra utilizados en la simulación de la torre, se han utilizado dos elementos rígidos para introducir las cargas que irían ubicadas en la posición donde se localiza la unión del cable conductor central.

En cuanto al número de nudos del modelo, el modelo de la torre está compuesto por 3456 nodos. Estos nodos son los puntos de unión entre los diferentes elementos de los que se compone la estructura. Cada nodo tiene tres desplazamientos en el espacio y tres giros, por lo que se generan 20736 grados de libertad.

En la Tabla 2 se muestra el resumen del número de nudos y elementos del modelo, mientras que en la Tabla 3 se muestra el número de elementos empleados en el modelo de elementos finitos de la torre, para cada tipología de perfil utilizado.

Tabla 2. Número de nudos y elementos de los que se compone la torre

Definición	Cantidad (Unidades)
Número de nodos	3456
Número de elementos	3747

Tabla 3. Elementos de la torre clasificados por sección y color

Sección	Número de elementos	Color del elemento
Angular L 80 x 80 x 8	829	Blue
Angular L 70 x 70 x 7	419	Green
Angular L 60 x 60 x 6	1246	Red
Angular L 50 x 50 x 6	731	Pink
Angular L 45 x 45 x 5	520	Blue

El modelo de elementos finitos de la torre de alta tensión, una vez realizado el mallado con el programa de simulación I-deas, queda tal y como se muestra en la siguiente figura:

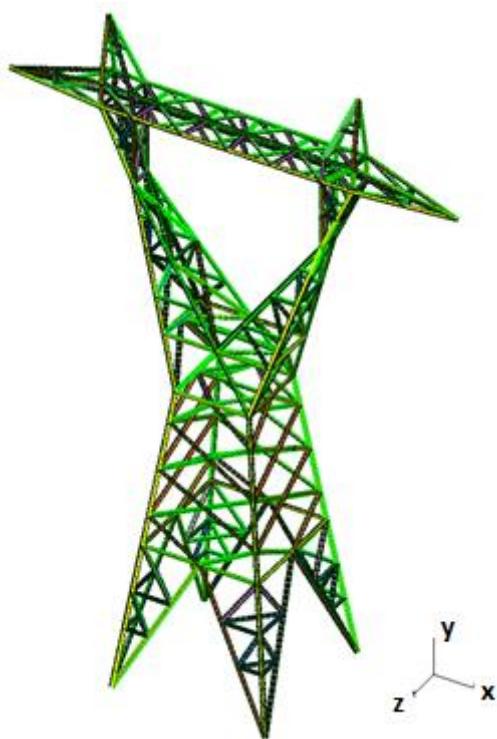


Figura 15. Modelo de elementos finitos de la torre de alta tensión

### 3.2.2. Propiedades de los materiales

El material a utilizar para cada estructura depende del tipo de torre que se desea colocar en cada lugar. También depende del tipo de voltaje que tiene que transportar la línea y la zona en la que se sitúa dicha torre. Tal como se detalla en el punto 2.1 “Descripción de tipos de torre” se puede observar que existen tres principales materiales utilizados para los diferentes tipos de torre que son madera, hormigón y acero.

El tipo de material que se utiliza para la construcción de las torres de alta tensión de estructura metálica, es decir, el tipo de torre que se analiza en este TFG, es el acero, ya que se trata de un material muy utilizado para el uso estructural, gracias a sus importantes ventajas técnicas a nivel resistente. Dentro de los diferentes tipos de acero existentes, las torres de alta tensión están formadas por un entramado de perfiles angulares de acero, que puede ser de dos tipos [8]:

- Acero 355.
- Acero 275.



Figura 16. Perfil angular de acero

El acero utilizado para realizar la simulación en dicha torre es el acero 355, debido a que tiene un límite elástico mayor que el acero 275 y la zona en la que se sitúa la torre es una zona donde existe un alto riesgo de sobrecargas de nieve y fuertes vientos.

### 3.2.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se sitúan en las zonas donde la estructura queda vinculada al exterior. Existen condiciones de contorno en apoyo y en cargas.

#### Condiciones de apoyo

Al tratarse de una torre de alta tensión, las condiciones de apoyo se producen en la parte inferior de la misma, donde ésta se une a la cimentación. Así, se modelizan como condiciones de apoyo el empotramiento en los nudos inferiores de la torre, debido a que en estos puntos, la estructura está fijada al suelo, y por lo tanto se restringe cualquier movimiento posible en dichos puntos de apoyo. En la siguiente imagen se muestra la restricción impuesta sobre la torre de alta tensión.

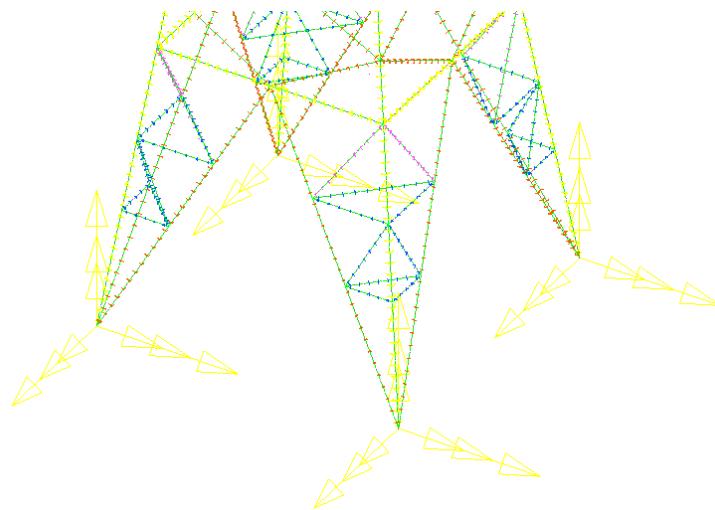


Figura 17. Empotramiento de la torre de alta tensión

#### Cargas individuales

En el análisis estructural se deben considerar todos los casos de cargas susceptibles de que afecten a la estructura analizada. Las cargas de tipo climático dependen de la ubicación de la torre.

En España se encuentran tres zonas diferenciadas según la altitud sobre el nivel del mar.

- Zona A: Situada en zonas donde la altitud sobre el nivel del mar es menor a 500 metros.
- Zona B: Situada en zonas donde la altitud sobre el nivel del mar se comprende entre los 500 metros y los 1000 metros.
- Zona C: Situada en zonas donde la altitud sobre el nivel del mar es superior a 1000 metros.

El estudio del análisis resistente de la estructura de la torre de alta tensión se va a realizar sobre el suelo de la provincia de Teruel. Esta localidad está situada en el Noreste de la Península Ibérica, tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 18. Mapa geográfico de las altitudes sobre el nivel del mar [9]

Teruel se encuentra a una altitud media de 915 metros sobre el nivel del mar, según el instituto geográfico nacional, tal como se puede ver en la figura mostrada a continuación. Esto afectará a los valores de las cargas que deberán aplicarse, y que se obtienen considerando su ubicación en la zona B.

#### :: Altitud sobre el nivel del mar de las capitales españolas (de mayor a menor)

Capital	Altitud (m)
Ávila	1.131
Soria	1.061
Segovia	1.002
Cuenca	997
Teruel	915
Burgos	859

Figura 19. Altitud sobre el nivel del mar de la ciudad de Teruel [10]

Las cargas individuales que actúan sobre la torre de alta tensión, corresponden con los cinco casos expuestos a continuación:

- **PP:** Peso Propio de la torre. Se trata del total del peso de la estructura, se obtiene mediante la aplicación de la aceleración de gravedad al conjunto de la estructura.

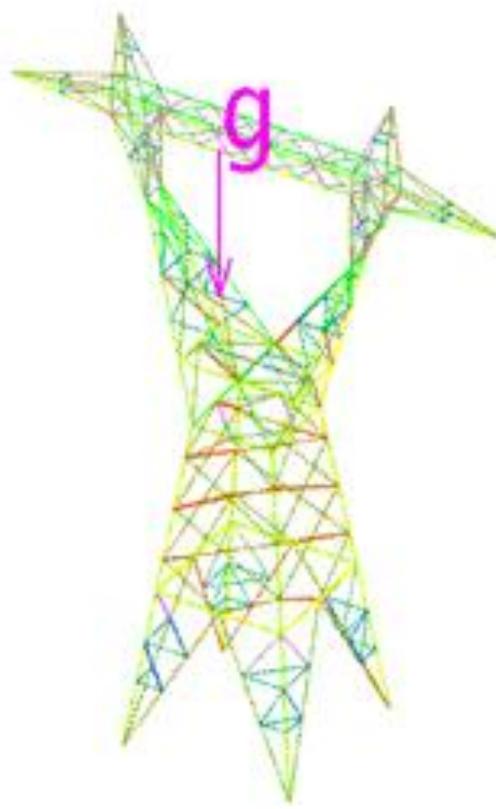


Figura 20. Peso propio de la torre de alta tensión

- **CP:** Cargas Permanentes. Se considerarán las cargas verticales debidas al peso propio de los distintos elementos: conductores, cables de guarda.

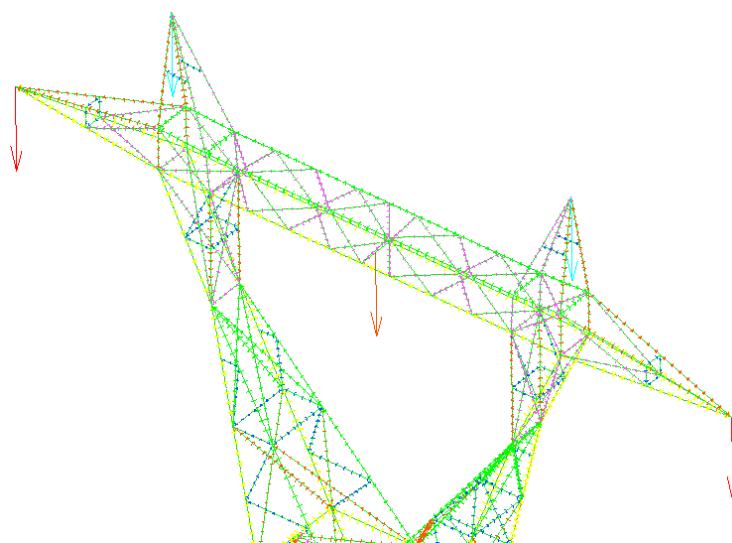


Figura 21. Cargas permanentes en la torre de alta tensión

- **FVFrontal:** *Fuerzas de Viento Frontal sobre la estructura de la Torre.* Según la Normativa que afecta a las líneas eléctricas de alta tensión [11] y la ubicación geográfica para la cual se realiza el análisis estructural de la torre (Teruel), se debe considerar un viento mínimo de referencia de 120 Km/h-(33.3 m/s) de velocidad, excepto en las líneas de categorías especiales, donde se considerará un viento mínimo de 140 Km/h-(38.89 m/s) de velocidad.

Para este tipo de cargas se supondrá el viento horizontal, actuando perpendicularmente sobre los distintos elementos de la línea, tal y como se observa en las siguientes imágenes.

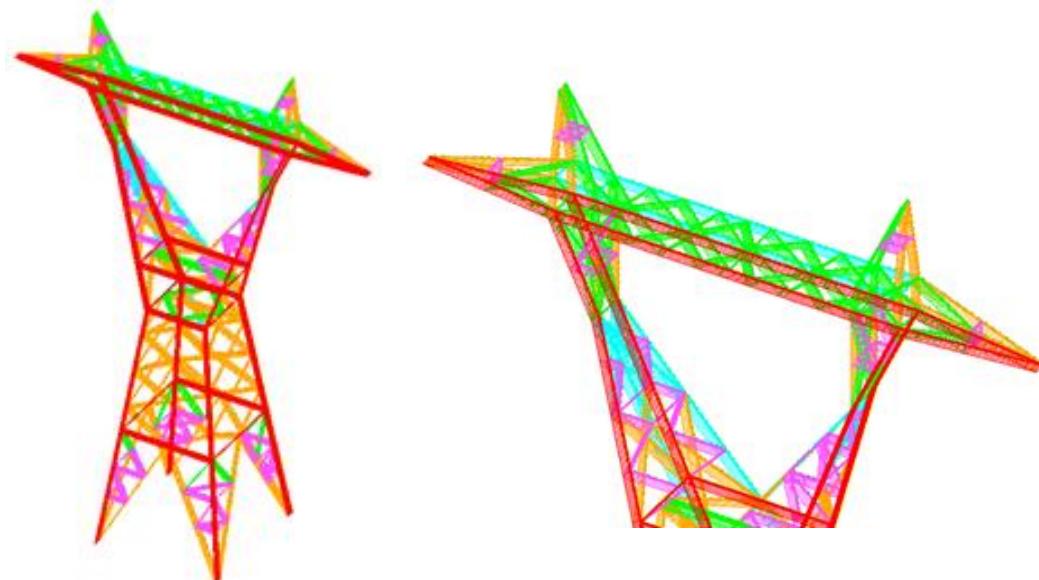


Figura 22. Viento frontal aplicado a la torre de alta tensión

- **FVlateral:** *Fuerzas de Viento lateral sobre los conductores de la torre.* La presión del viento en los conductores causa fuerzas transversales a la dirección de la línea, al igual que aumenta las tensiones sobre los conductores.

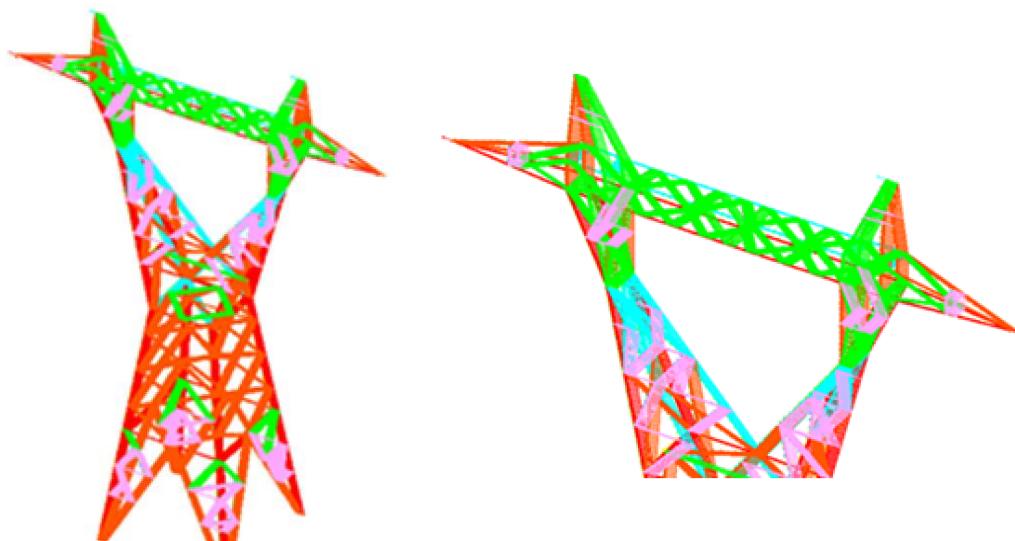


Figura 23. Perspectiva viento lateral aplicado a la torre

- **SH: Sobre cargas motivadas por Hielo.** Al tratarse de una torre situada a 910 metros de altitud con respecto al mar, se trata de una sobre carga de tipo B [11].

Esta sobre carga de hielo se considera debido a que, la existencia de hielo, provoca que sobre los cables se cree un manguito de hielo, que hace que, tanto los conductores, como los cables de guarda aumenten de tamaño y por tanto la fuerza ejercida sobre dichos cables sea mayor.

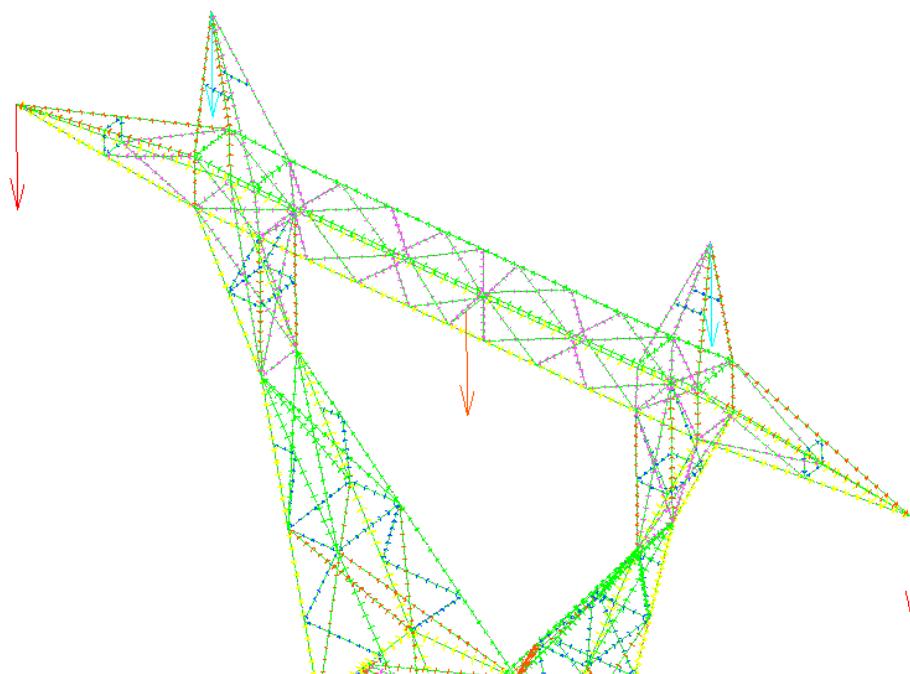


Figura 24. Sobre carga motivada por el hielo

A continuación se muestra una tabla resumen de las diferentes fuerzas aplicadas en el análisis estático de la torre de alta tensión.

Tabla 4. Tabla resumen de las diferentes fuerzas a aplicar en las hipótesis

Abreviatura	Definición
PP	Peso Propio de la Torre
CP	Cargas Permanentes
FV Frontal	Fuerzas del Viento frontal sobre la estructura de la torre.
FV Lateral	Fuerzas del Viento lateral sobre los Conductores de la Torre.
SH	Sobre cargas motivadas por el Hielo

### 3.2.3.3. Hipótesis de cálculo

Las hipótesis que se consideran para realizar el cálculo de todos los modelos son ocho. Estas están detalladas en la siguiente tabla, donde se puede ver cada una de las hipótesis y los casos de carga individuales que contiene cada una de ellas.



Tabla 5a. Hipótesis de cálculo utilizadas para la simulación de la torre. (\*) A tener en cuenta como hipótesis accidental

HIPÓTESIS	PP	CP	FV	FV	FV	SH	Rotura Cable central(*)	Rotura Cable extremo(*)
			Frontal (E) (SH)	Lateral (E+C) (SH)	Lateral (E+C) (CH)			
I	X	X						
II	X	X	X					
III	X	X		X				
IV	X	X				X		
V	X	X	X				X	
VI	X	X			X		X	
VII	X	X					X	
VIII	X	X						X

En el análisis estructural se deben distinguir dos situaciones diferentes que permitan garantizar la funcionalidad y resistencia de las estructuras evaluadas. Los dos tipos de estados límite existentes [12], empleados en el cálculo estructural de la torre son los siguientes:

➤ Estados límite últimos (ELU):

Se tratan de aquellos estados, en los que si se sobrepasa el valor obtenido en la hipótesis, originaría un fallo resistente de la estructura, o de alguno de los perfiles que la componen. Estos estados tienen como función asegurar un coeficiente de seguridad para que, de esta forma cada una de las hipótesis cumpla de forma superior los valores máximos que se obtendrían sobre la torre en una situación real.

Con estos estados se calculan los valores de tensiones que soportará la estructura, siguiendo las hipótesis expuestas en la Tabla 5b “Hipótesis de cálculo utilizadas para la simulación de la torre (ELU). Para esfuerzos y tensiones”.

➤ Estados límite de servicio (ELS):

Dichos estados corresponden a aquellos valores, por los cuales, si las hipótesis sobrepasan el valor obtenido, podrían afectar a la funcionalidad de la estructura, bien por deformaciones excesivas o por problemas de vibraciones.

Con estos estados obtendremos los valores de las deformadas y de los desplazamientos con las hipótesis analizadas en la Tabla 5c “Hipótesis de cálculo utilizadas para la simulación de la torre (ELS). Para desplazamientos”.

A continuación se muestran las tablas tanto de ELU como de ELS para cada una de las hipótesis a analizar. Los coeficientes de mayoración y simultaneidad empleados se han obtenido de la Normativa correspondiente [12].



Tabla 5b. Hipótesis de cálculo utilizados para la simulación de la torre (ELU). Para esfuerzos y tensiones. (\*) A tener en cuenta como hipótesis accidental

HIPÓTESIS	PP	CP	FV	FV	FV	SH	Rotura Cable central(*)	Rotura Cable extremo(*)
			Frontal (E) (SH)	Lateral (E+C) (SH)	Lateral (E+C) (CH)			
I	1.35	1.35						
II	1.35	1.35	1.5					
III	1.35	1.35		1.5				
IV	1.35	1.35				1.5		
V	1.35	1.35	1.5x0.6				1.5	
VI	1.35	1.35			1.5x0.6	1.5		
VII	1.0	1.0					1.0	
VIII	1.0	1.0						1.0

Tabla 5c. Hipótesis de cálculo utilizadas para la simulación de la torre (ELS). Para desplazamientos. (\*) A tener en cuenta como hipótesis accidental

HIPÓTESIS	PP	CP	FV	FV	FV	SH	Rotura Cable central(*)	Rotura Cable extremo(*)
			Frontal (E) (SH)	Lateral (E+C) (SH)	Lateral (E+C) (CH)			
I	1.0	1.0						
II	1.0	1.0	1.0					
III	1.0	1.0		1.0				
IV	1.0	1.0				1.0		
V	1.0	1.0	1.0x0.6				1.0	
VI	1.0	1.0			1.0x0.6	1.0		
VII	1.0	1.0					1.0	
VIII	1.0	1.0						1.0

En la siguiente tabla se describe en detalle cada una de las ocho hipótesis que se van a llevar a estudio en el presente documento, para comprobar que la estructura de la torre realmente es capaz de soportar las fuerzas aplicadas y es apta para cumplir con su funcionalidad una vez esté simulada la estructura sometida a estudio.



Tabla 6. Descripción de las hipótesis

Hipótesis	Descripción
I	Torre de alta tensión con su propio peso y las cargas permanentes que soporta.
II	Torre de alta tensión con fuerzas de viento frontales aplicadas directamente sobre los elementos estructurales.
III	Torre de alta tensión con fuerzas de viento lateral aplicadas sobre los conductores, cables de guarda y estructura.
IV	Torre de alta tensión con sobrecarga de hielo en la estructura.
V	Torre de alta tensión con fuerzas de viento frontal aplicadas sobre los diferentes componentes y con sobrecargas de hielo en la estructura.
VI	Torre de alta tensión con fuerzas de viento laterales aplicadas a los conductores y cables de guarda con sobrecarga de hielo en los propios conductores.
VII	Rotura del cable central de los tres conductores.
VIII	Rotura de uno de los cables laterales de los tres conductores.



## 4. ANÁLISIS ESTÁTICO

El cálculo estructural estático permite determinar el valor de las tensiones y desplazamientos a los que está sometida la torre de alta tensión en cada uno de los casos llevados a estudio.

A modo de resumen, a continuación se describe el proceso a seguir a la hora de realizar un análisis estructural.

- Generación del modelo geométrico de la estructura.
- Generación del modelo de elementos finitos: mallado y definición de materiales.
- Definición de las hipótesis, considerando todas las combinaciones posibles de casos individuales que actúen sobre la estructura.
- Modelización en el modelo de elementos finitos de la estructura de las condiciones de apoyo, así como aplicación en el mismo de los diferentes casos de carga.[13]
- Obtención de deformadas, desplazamientos, esfuerzos y tensiones existentes en cada uno de los elementos resistentes mediante el proceso de cálculo correspondiente, ya sea mediante el análisis de ELU, para tensiones y esfuerzos, o ELS, para deformadas y desplazamientos.
- Comprobación de los valores obtenidos y comparación de éstos con los valores admisibles de desplazamientos y tensiones.

De este modo, una vez se tiene la estructura mallada con sus perfiles correspondientes y se aplican las condiciones de apoyo y las cargas indicadas, se procede al análisis estático mediante el programa I-deas. Así, en este apartado, se pueden apreciar los resultados de las deformadas obtenidas una vez simulada la torre de alta tensión, las tensiones que afectan a los diferentes elementos de la estructura y los desplazamientos máximos que se obtienen en cada una de las hipótesis planteadas.

Estos valores quedan reflejados en los tres siguientes puntos del documento, donde se exponen todos los resultados del análisis estático.

### 4.1. Resultados de tensiones

Con respecto a las tensiones que se generan en la torre de alta tensión y debido a que se utilizan estados límites últimos (ELU), incluyen un coeficiente de seguridad, tal y como se expone en la tabla “Tabla 5b. Hipótesis de cálculo utilizadas para la simulación de la torre (ELU). Para esfuerzos y tensiones”.

A continuación se muestran las imágenes de los resultados de tensión obtenidos en la simulación para los ELU.

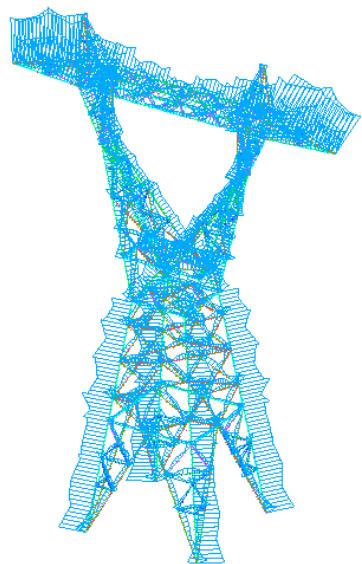


Figura 25. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-1

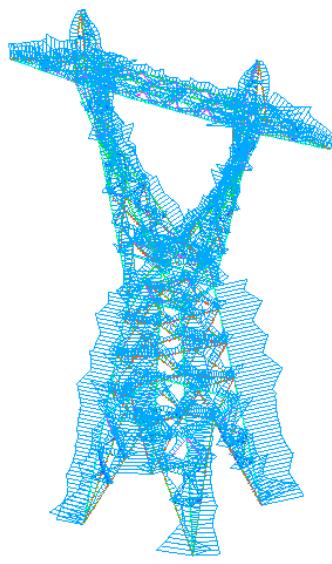


Figura 26. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-2

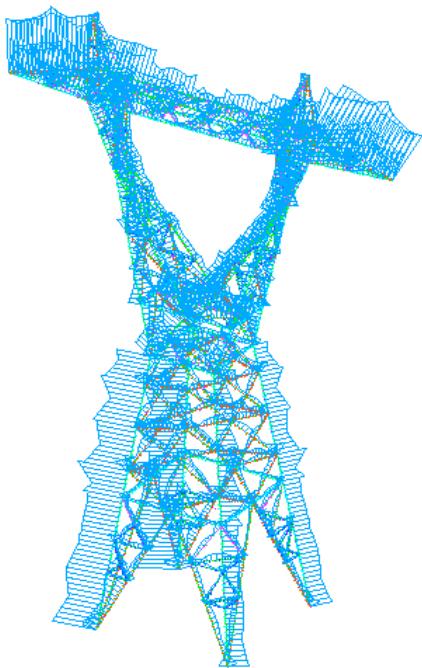


Figura 27. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-3

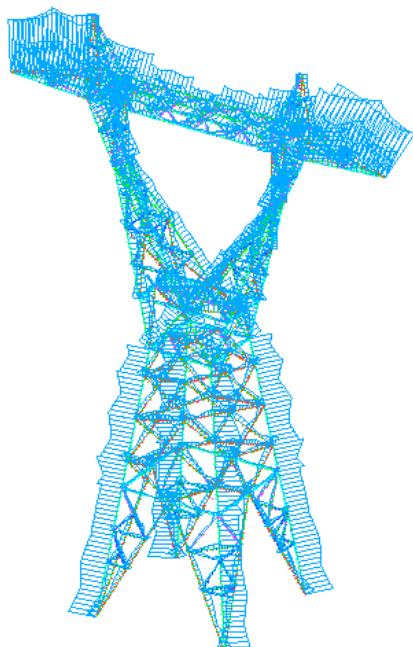


Figura 28. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-4

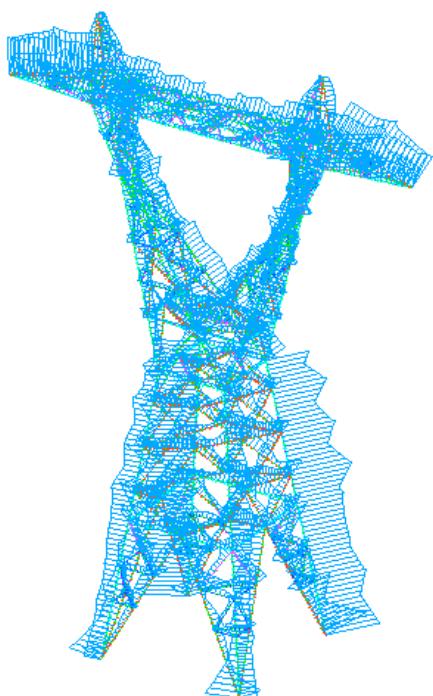


Figura 29. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-5

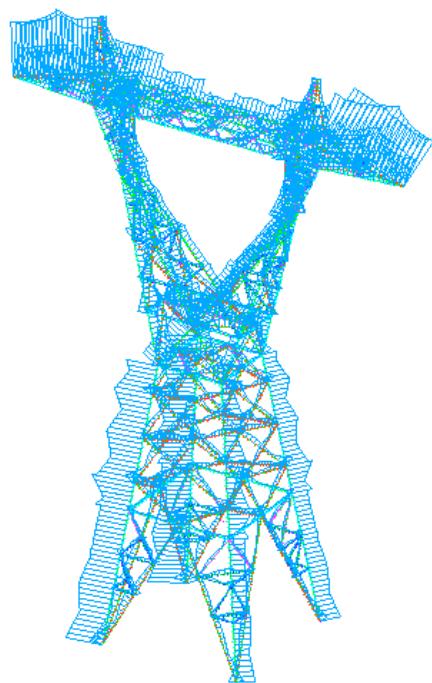


Figura 30. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-6

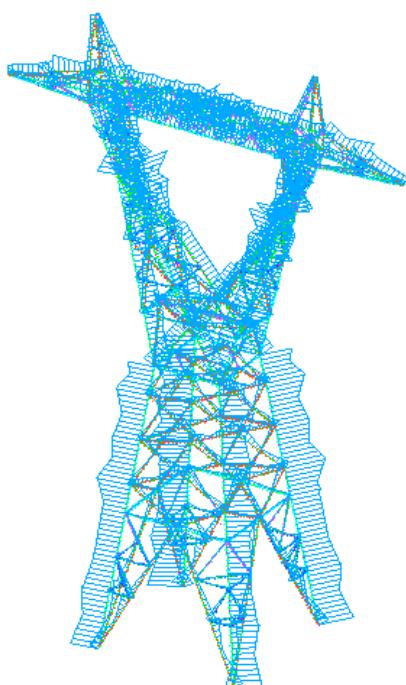


Figura 31. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-7

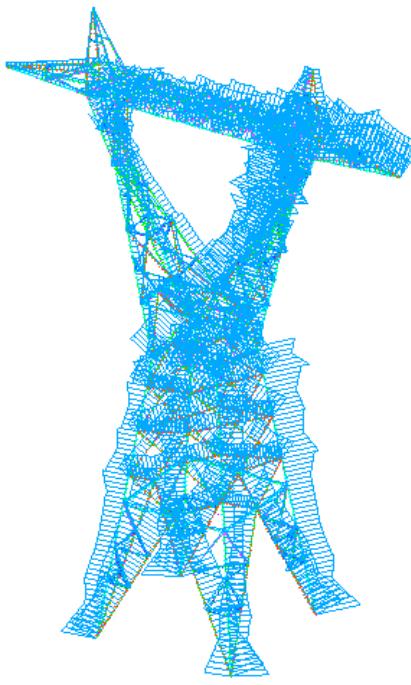


Figura 32. Análisis de tensiones para la hipótesis ELU-8



El valor máximo de los resultados de las tensiones, obtenido para cada hipótesis analizada, se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla 7. Resultados de las hipótesis ELU correspondientes a las tensiones que soporta la estructura*

Hipótesis ELU	Valor obtenido	Valor máximo (355 MPa)
ELU-1	45,22	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-2	148,74	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-3	45,3	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-4	70,54	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-5	109,82	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-6	70,65	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-7	337,37	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-8	428,15	NO CUMPLE HIPÓTESIS

Al tratarse de una torre cuyos perfiles son de acero 355, el límite elástico máximo que podrá soportar la estructura de la torre será de 355 MPa.

Por lo que, tal y como se puede observar en la tabla 7, todas las hipótesis consideradas cumplen, salvo una excepción. Dicha hipótesis es la ELU-8 (Rotura de uno de los cables laterales de la torre) donde se aprecia, que el valor obtenido es superior al valor máximo permitido, por lo que se tendrá que hacer modificaciones en los perfiles de la torre, hasta que cumplan todas las hipótesis.

Para poder conseguir que todas las hipótesis cumplan los requisitos de tensiones, se va a realizar una modificación en los perfiles de la torre de alta tensión para poder disminuir el valor de tensiones.

Se realiza un segundo análisis en el que se opta por cambiar los perfiles principales de la torre, que están compuestos por un perfil angular de 80x80x8, a un perfil angular de 100x100x10.

Se piensa que con este perfil será suficiente, ya que el valor obtenido no es muy superior al límite elástico de dicho acero, por lo que mayorando la estructura con un perfil superior podría ser suficiente.

Una vez vuelto a simular todos los casos, se observa que los resultados siguen siendo negativos, incumpliéndose la hipótesis 8, por lo que el resultado no puede ser válido.

Finalmente se prueba a cambiar los mismos perfiles principales de la torre por un perfil angular de 100x100x12. En este caso, como resultado de la simulación, se observa que todas las hipótesis cumplen con los valores máximos permitidos, ya que todos los valores de tensión de von Mises máxima obtenidos están por debajo de los 355 MPa (valor máximo permitido por el tipo de acero utilizado en la estructura). Los resultados de las hipótesis anteriores se muestran en las siguientes imágenes.

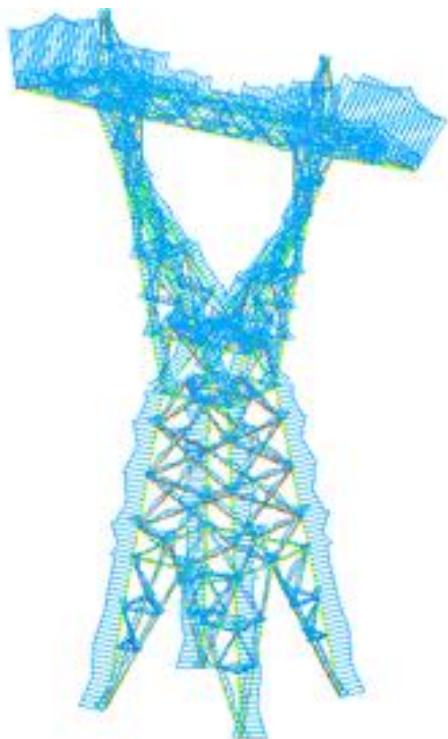


Figura 33. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-1

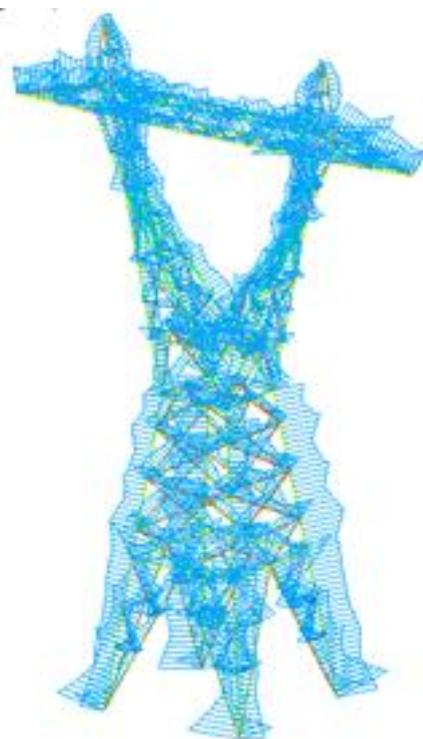


Figura 34. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-2

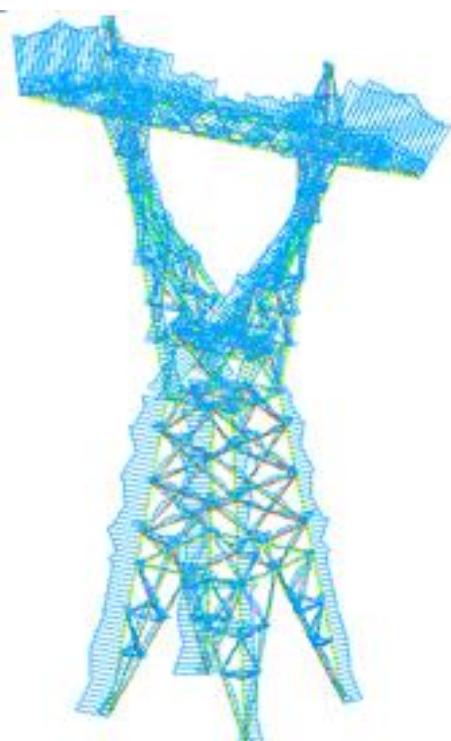


Figura 35. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-3

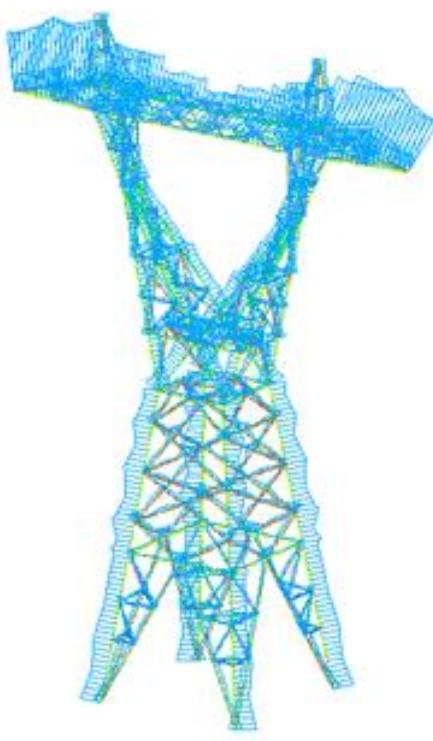


Figura 36. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU4

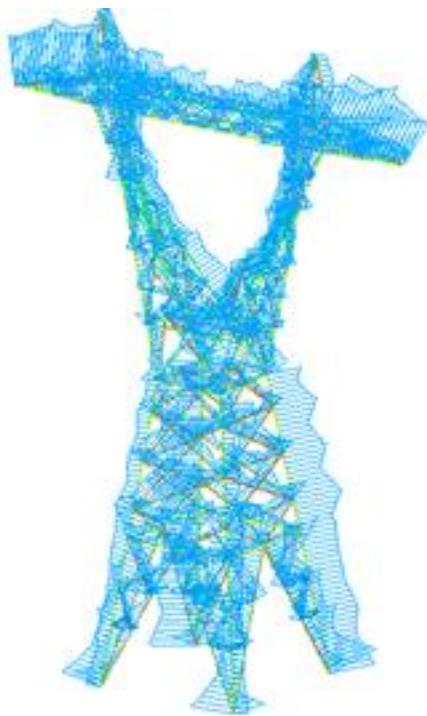


Figura 37. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-5

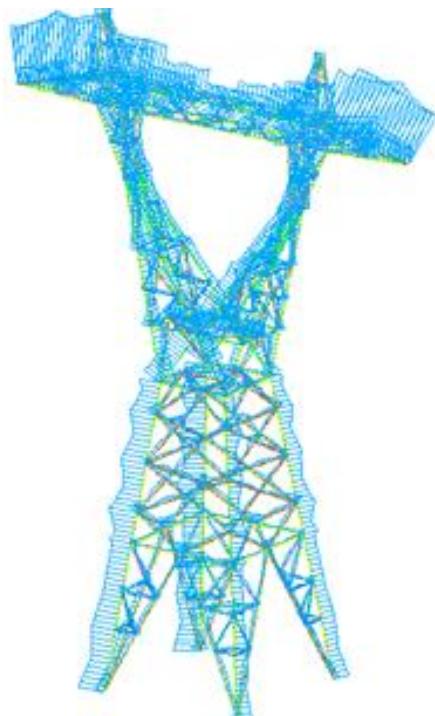


Figura 38. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-6

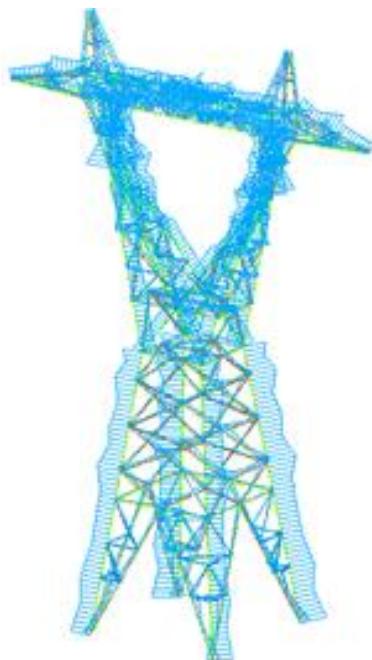


Figura 39. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-7

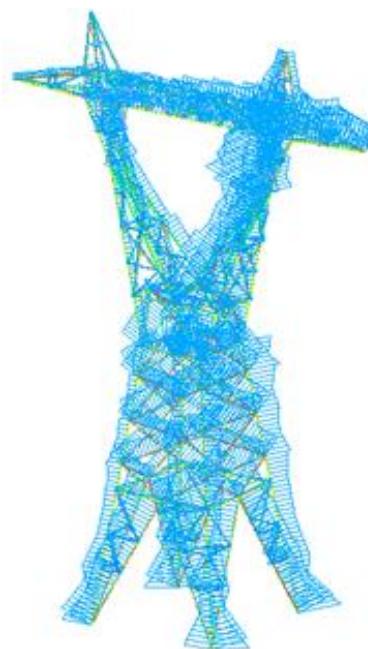


Figura 40. Segundo análisis de tensiones para la hipótesis ELU-8

A continuación se muestran en la siguiente tabla los valores obtenidos de las tensiones en la estructura.

Tabla 8. Resultados de las hipótesis ELU correspondientes a las tensiones que soporta la estructura después de las modificaciones

Hipótesis ELU	Valor obtenido	Valor máximo (355 MPa)
ELU-1	43,2	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-2	118,6	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-3	43,25	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-4	67,08	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-5	81,88	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-6	67,16	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-7	248,36	CUMPLE HIPÓTESIS
ELU-8	341,79	CUMPLE HIPÓTESIS

Se puede comprobar que después de la modificación de perfiles indicada, ya se cumple en todos los casos la condición de que las tensiones sean inferiores al valor del límite elástico (en este caso, 355 MPa).

#### 4.2. Resultados de deformadas

Los resultados de las deformadas, respecto a cada hipótesis ELS, se muestran en las siguientes imágenes. La forma de la deformada ha sido ampliada para facilitar la visualización de la misma.

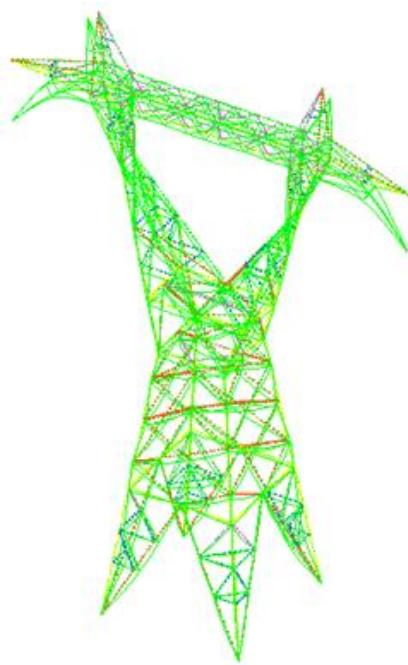
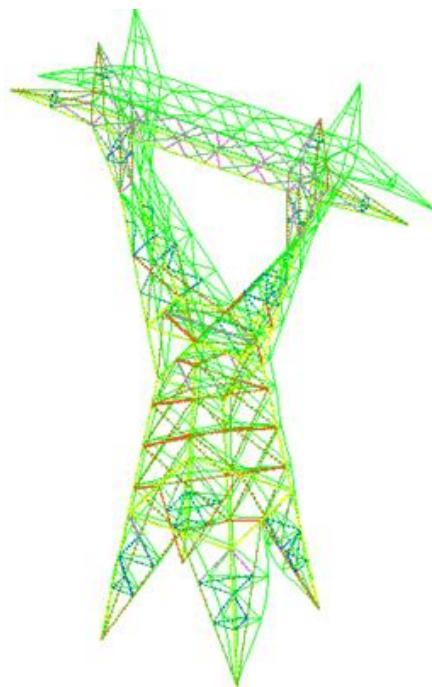
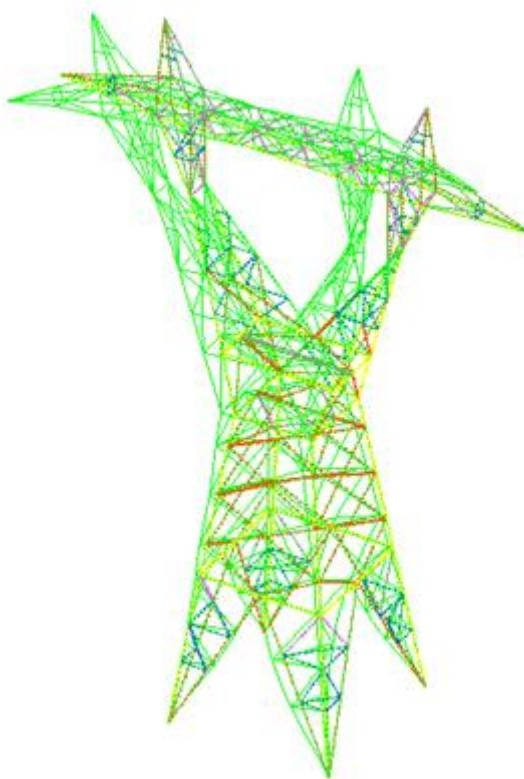


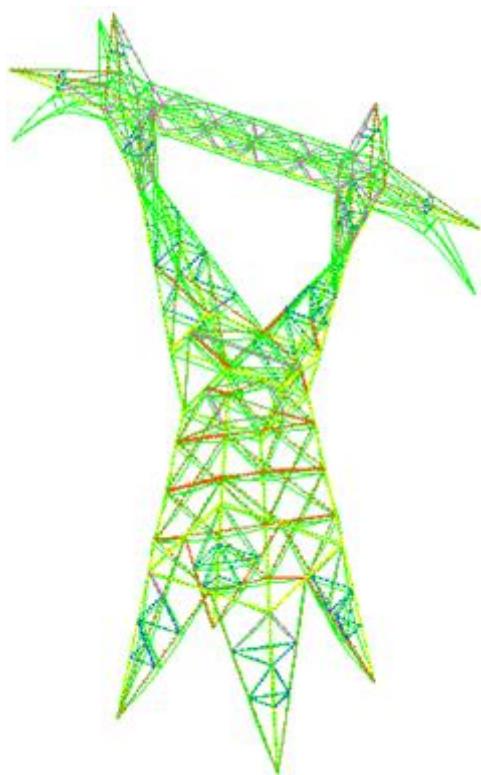
Figura 41. Análisis de deformadas para la hipótesis 1



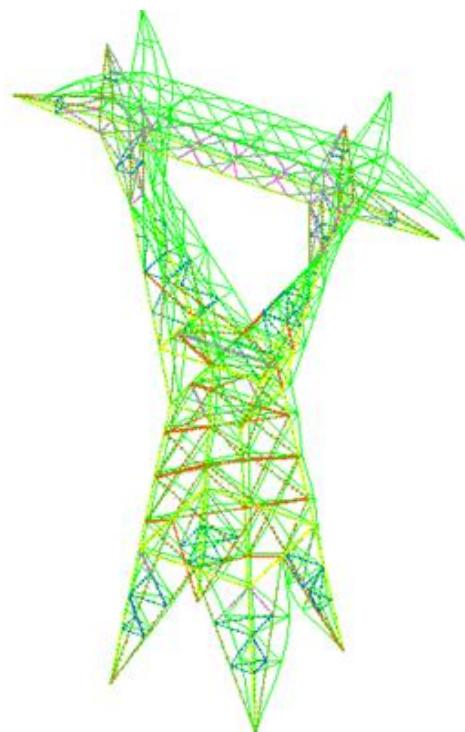
*Figura 42. Análisis de deformadas para la hipótesis 2*



*Figura 43. Análisis de deformadas para la hipótesis 3*



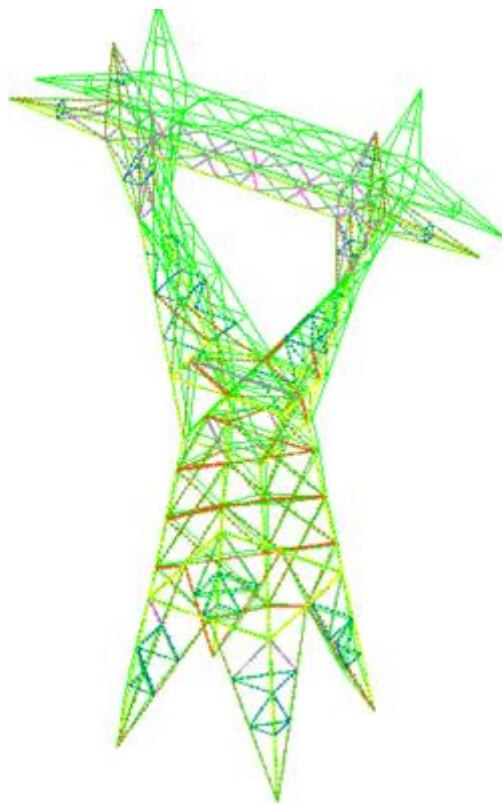
*Figura 44. Análisis de deformadas para la hipótesis 4*



*Figura 45. Análisis de deformadas para la hipótesis 5*



*Figura 46. Análisis de deformadas para la hipótesis 6*



*Figura 47. Análisis de deformadas para la hipótesis 7*

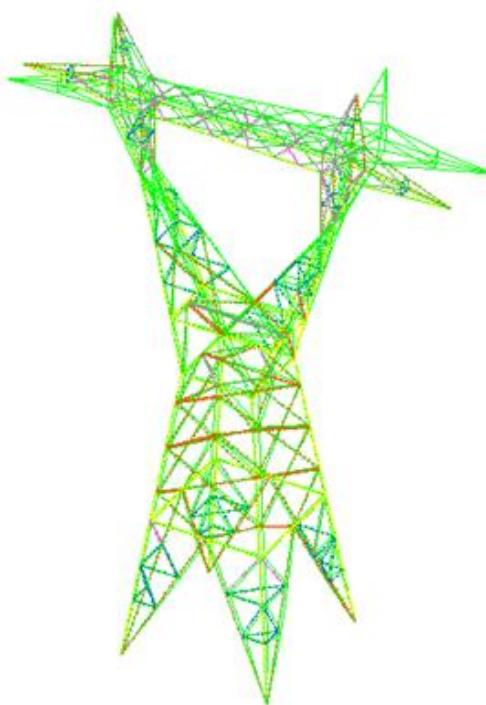


Figura 48. Análisis de deformadas para la hipótesis 8

Se puede comprobar que la forma de la deformada, se ajusta a cada uno de los diferentes casos de carga analizados.

#### 4.3. Resultados de desplazamientos

La limitación de los desplazamientos máximos es necesaria para satisfacer los estados límites de servicio, de manera que la estructura no vea limitada su funcionalidad por modificaciones en su geometría que alteren sustancialmente las condiciones de equilibrio.

Para verificar la condición de flecha máxima en ese tipo de estructura, en la que no existe un límite definido como es el caso de las estructuras de edificación, se considera un límite de referencia de valor:

$$U_{máx} = H/100$$

donde:  $H$  = Altura de la estructura (23 metros).

Por lo que:

$$U_{máx} = 23/100$$

$$U_{máx} = 0,23 \text{ metros}$$

Este límite, al tratarse de una estructura de gran flexibilidad, es ligeramente superior al desplome permitido en pilares de naves industriales, por ejemplo, que se limita a  $H/150$ .

A continuación, se muestran los resultados de desplazamiento, en magnitud, para cada una de las hipótesis ELS. Se presentan los valores de desplazamiento en mm.

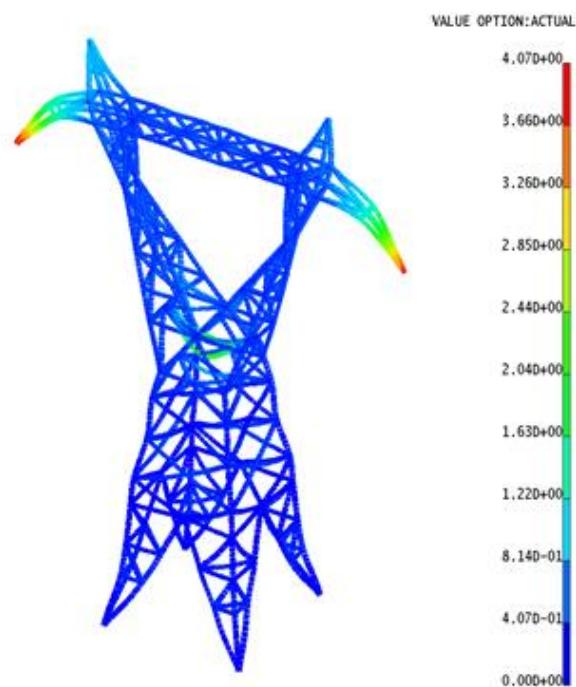


Figura 49. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 1

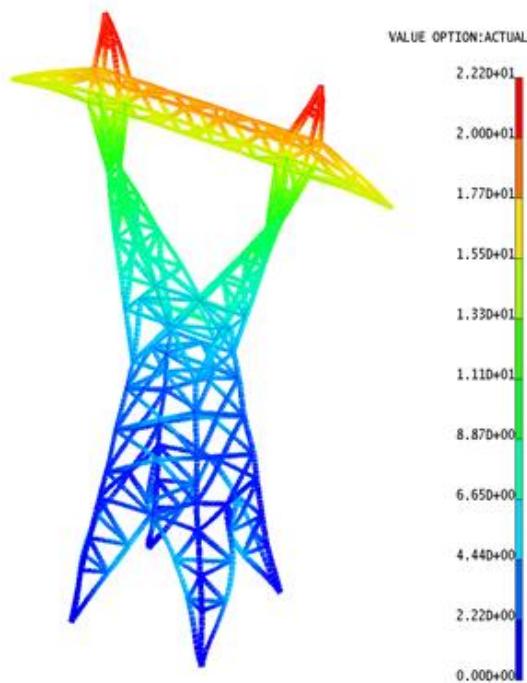


Figura 50. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 2

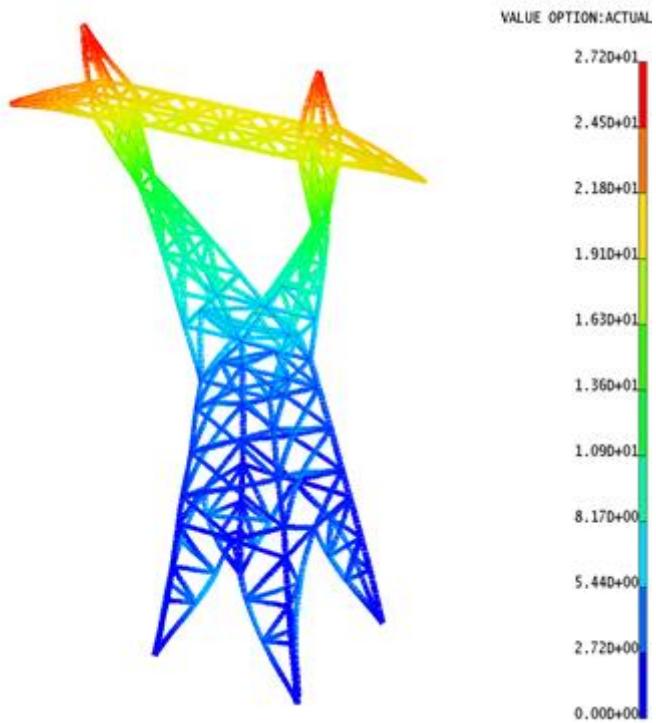


Figura 51. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 3

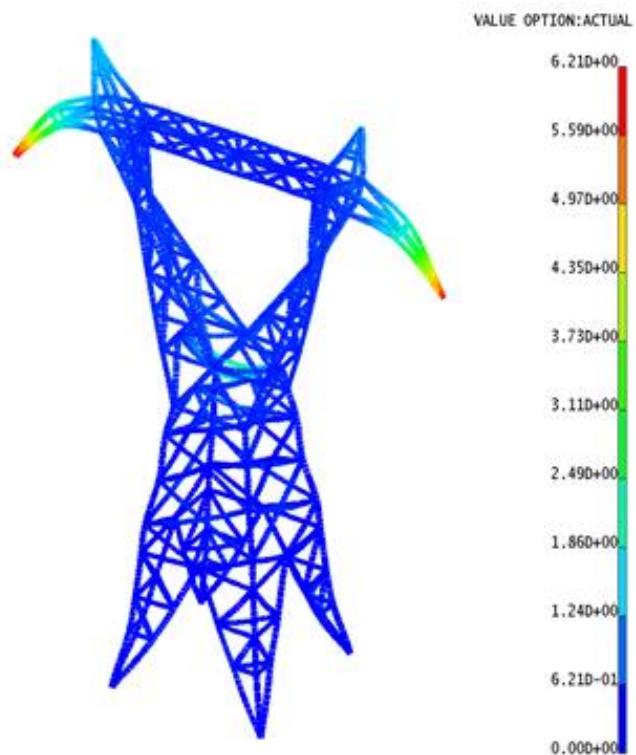


Figura 52. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 4

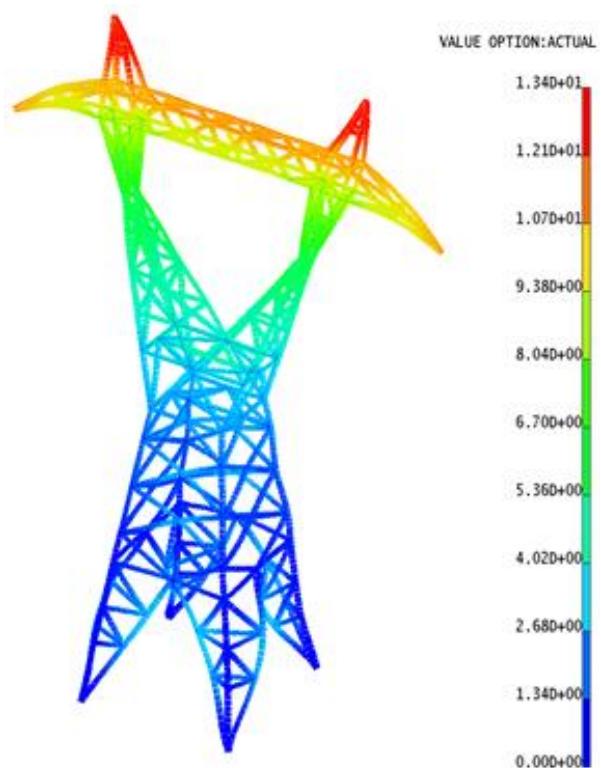


Figura 53. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 5

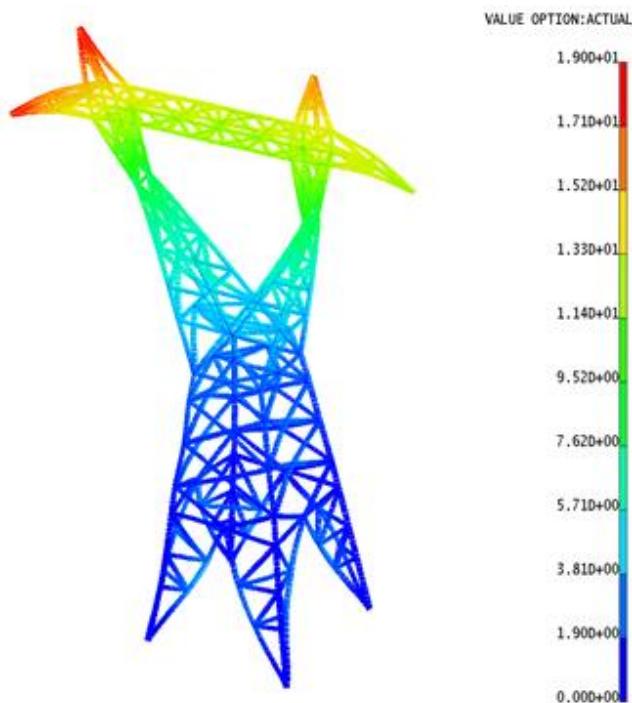


Figura 54. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 6

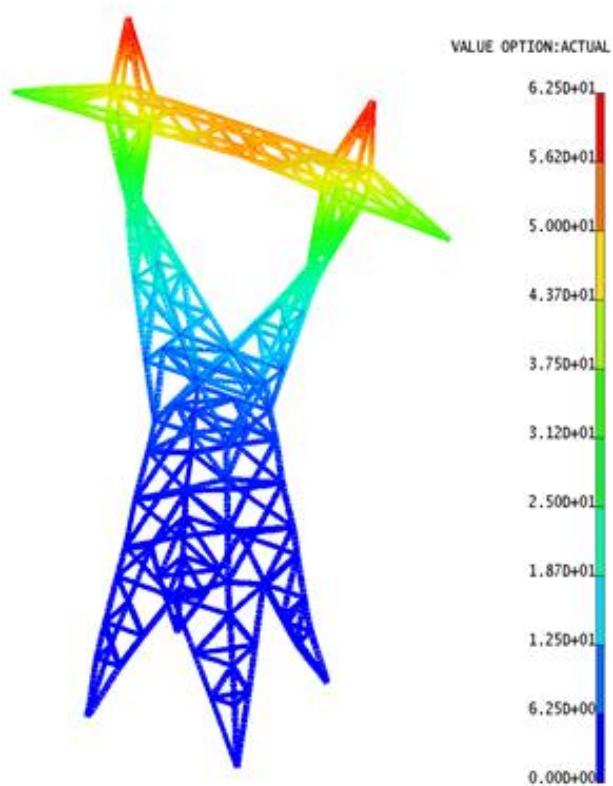


Figura 55. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 7

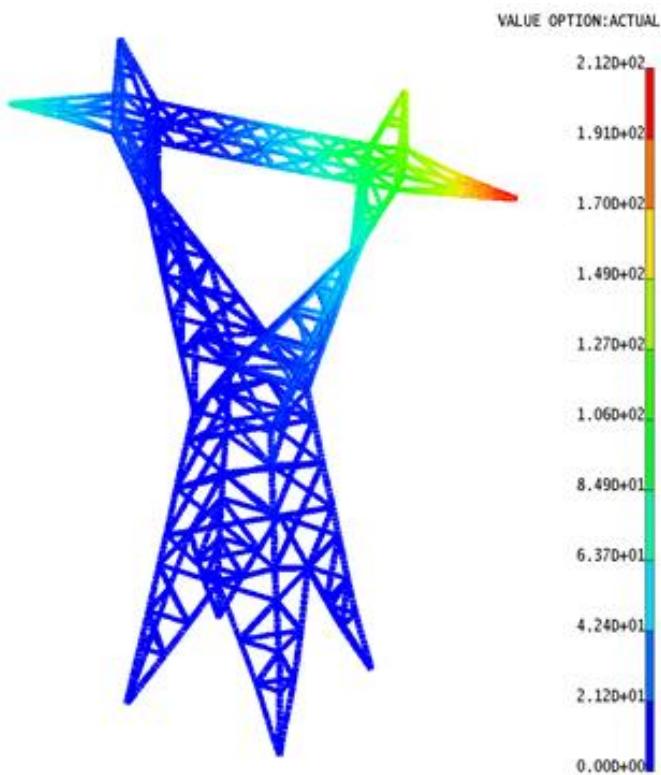


Figura 56. Análisis de desplazamientos para la hipótesis 8



Los desplazamientos en las direcciones X, Y y Z se pueden observar en el anexo 3: "RESULTADOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS PARA EL SEGUNDO ANÁLISIS".

El resumen de los valores de desplazamientos máximos, respecto a cada hipótesis ELS, según los ejes de la figura 15, así como en magnitud, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9. Resultados de las hipótesis ELS correspondientes a los desplazamientos

Hipótesis ELS	Ux (mm)	Uy (mm)	Uz (mm)	Umagnitud (mm)	Desplazamiento máximo (m)
ELS-1	-0,7	-4,1	-0,7	4,1	0,004
ELS-2	-5,3	-4,1	-22,2	22,2	0,022
ELS-3	-26,2	-16,7	5,9	27,2	0,027
ELS-4	-1,2	-6,2	-0,7	6,21	0,006
ELS-5	-3,3	-6,2	-13,3	13,4	0,013
ELS-6	-18,0	-14,6	3,7	19,0	0,019
ELS-7	2,0	-4,7	-62,5	62,5	0,062
ELS-8	11,9	-9,9	-212,0	212	0,212

El valor máximo permisible de máximo desplazamiento será de 0,23 metros, por lo que se puede observar que todas las hipótesis de desplazamientos cumplen los requisitos.

Todo valor que estuviera por encima del valor máximo, no cumpliría con las condiciones de desplazamiento permisibles para esta estructura y se tendría que realizar cambios en los perfiles utilizados de la zona que no cumple las especificaciones para disminuir ese desplazamiento máximo y de esa forma, esté dentro de los valores prefijados.



## 5. ANÁLISIS A PANDEO

### 5.1. Modos de pandeo

Se trata de verificar la estabilidad de la estructura frente a esfuerzos predominantes de compresión, cuyos valores máximos para cada hipótesis se recogen en la tabla siguiente.

Tabla 10. Resumen de fuerzas de compresión máxima en las diferentes hipótesis

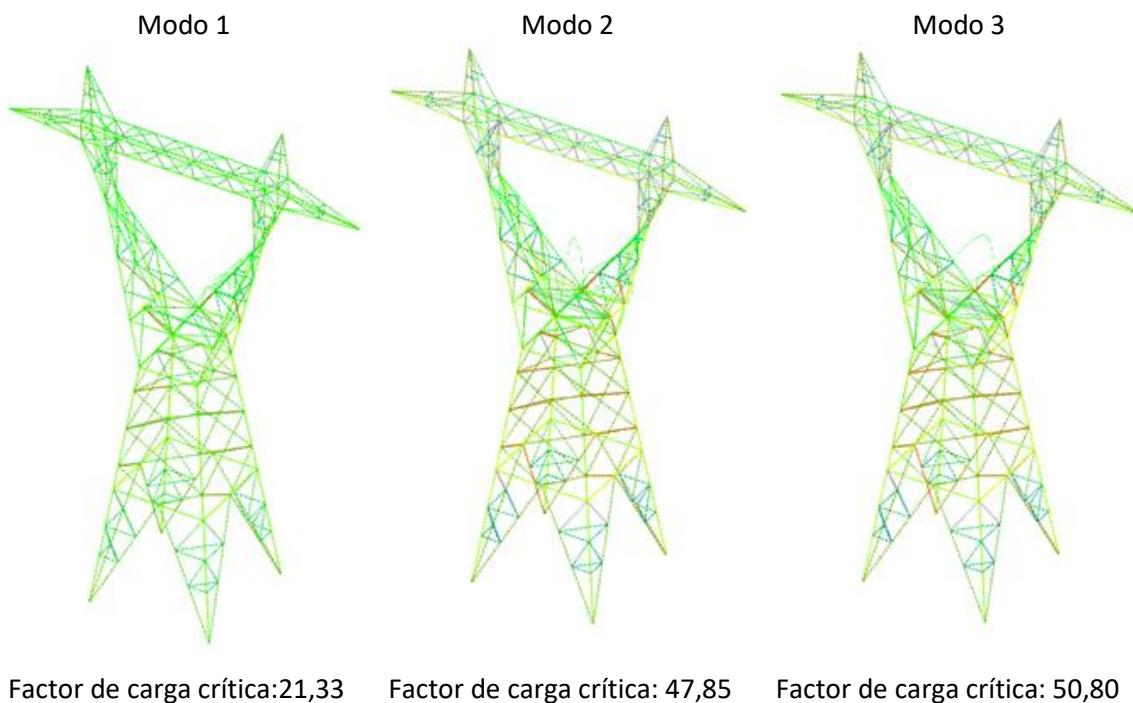
Hipótesis	Fuerza axial (Máxima compresión) (N)
1	19529,24
2	87783,13
3	93011,66
4	28195,22
5	65078,61
6	71161,97
7	185706,9
8	366151,1

Para este análisis a pandeo se han calculado los tres primeros modos de pandeo, aunque el más significativo será siempre el primero por corresponder a un factor de carga crítica menor.

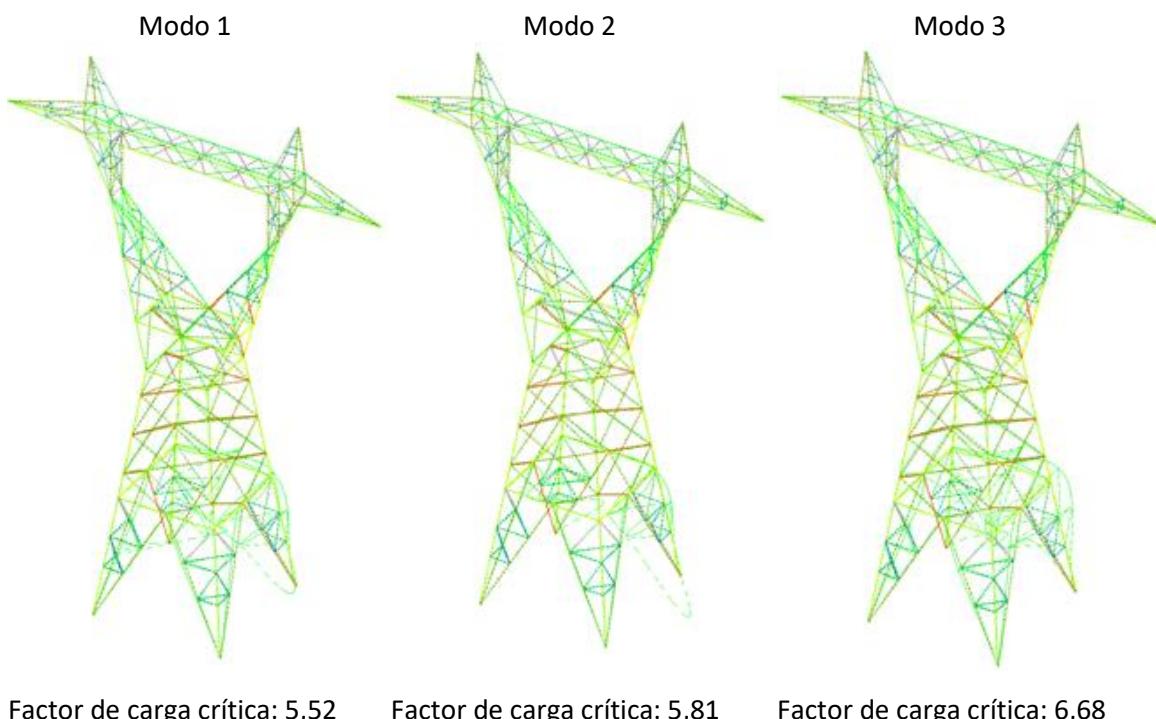
Se observa que con tres modos cumplen todas las hipótesis, estando al límite la hipótesis número ocho, que coincide con la hipótesis más crítica a analizar, de rotura de uno de los cables laterales de la torre.

El factor de carga crítica corresponde al coeficiente de seguridad que se tendría en cada hipótesis frente al fenómeno de inestabilidad.

Una vez obtenidos los modos del análisis a pandeo, se muestran las imágenes de los tres modos calculados para cada una de las ocho hipótesis ELS, así como su factor de carga crítica para cada modo de funcionamiento.



*Figura 57. Análisis de pandeo para la hipótesis 1*



*Figura 58. Análisis de pandeo para la hipótesis 2*

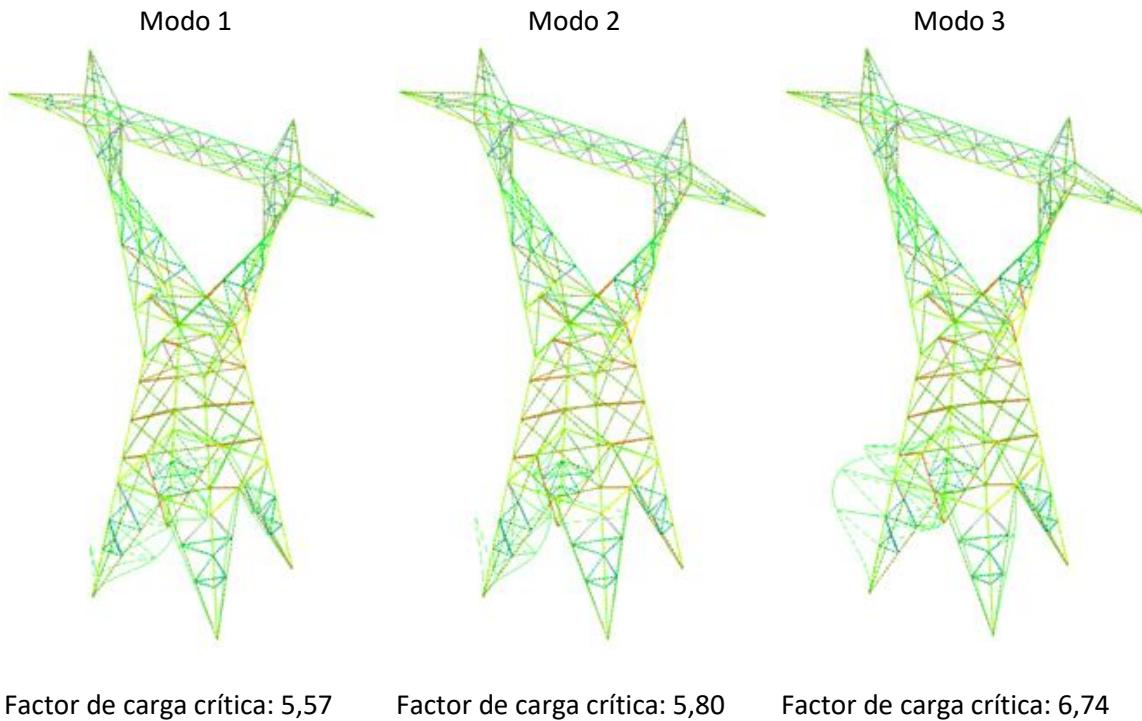


Figura 59. Análisis de pandeo para la hipótesis 3

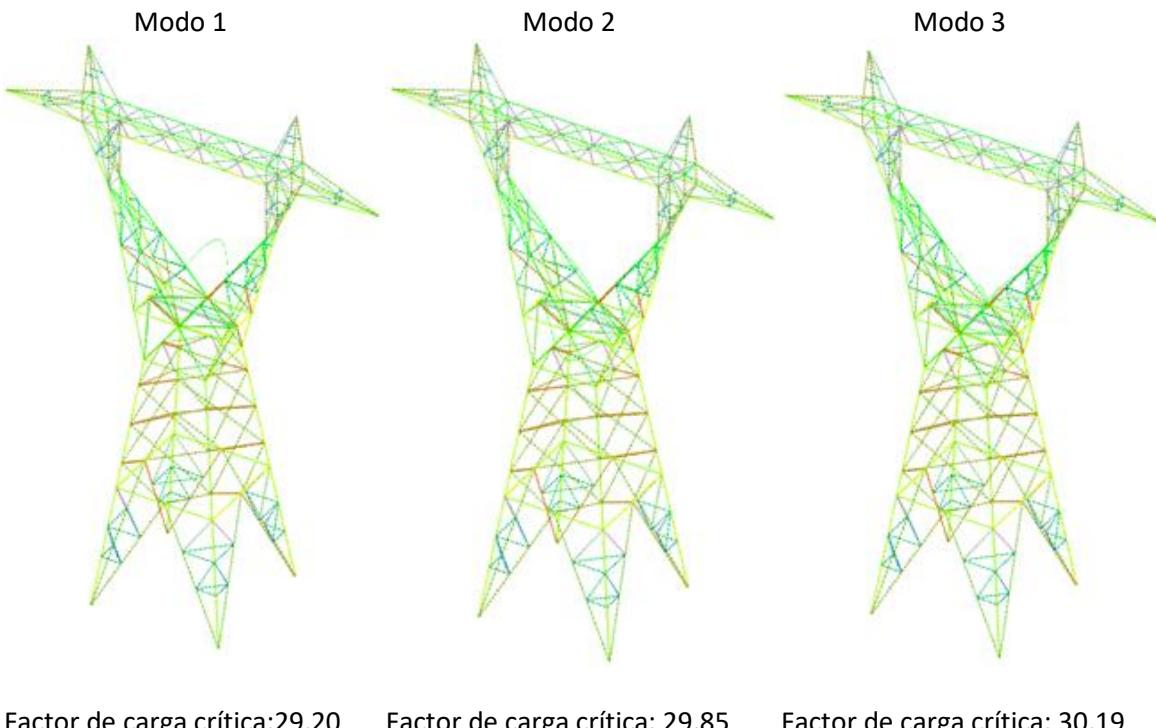


Figura 60. Análisis de pandeo para la hipótesis 4

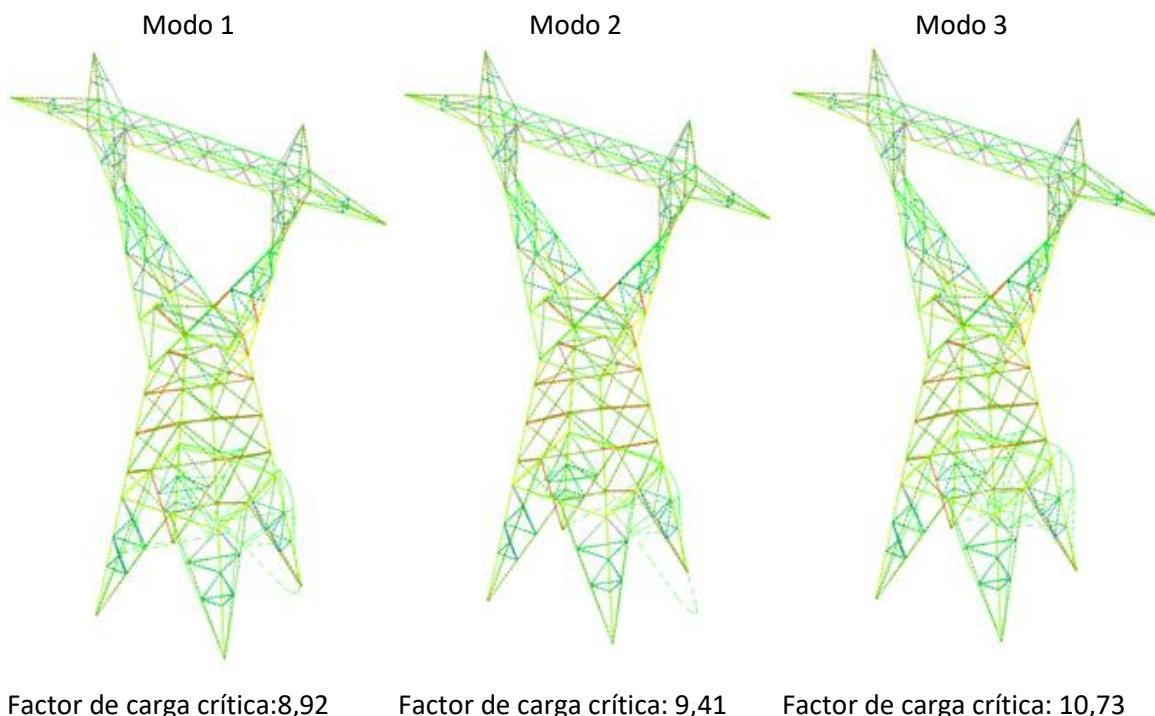


Figura 61. Análisis de pandeo para la hipótesis 5

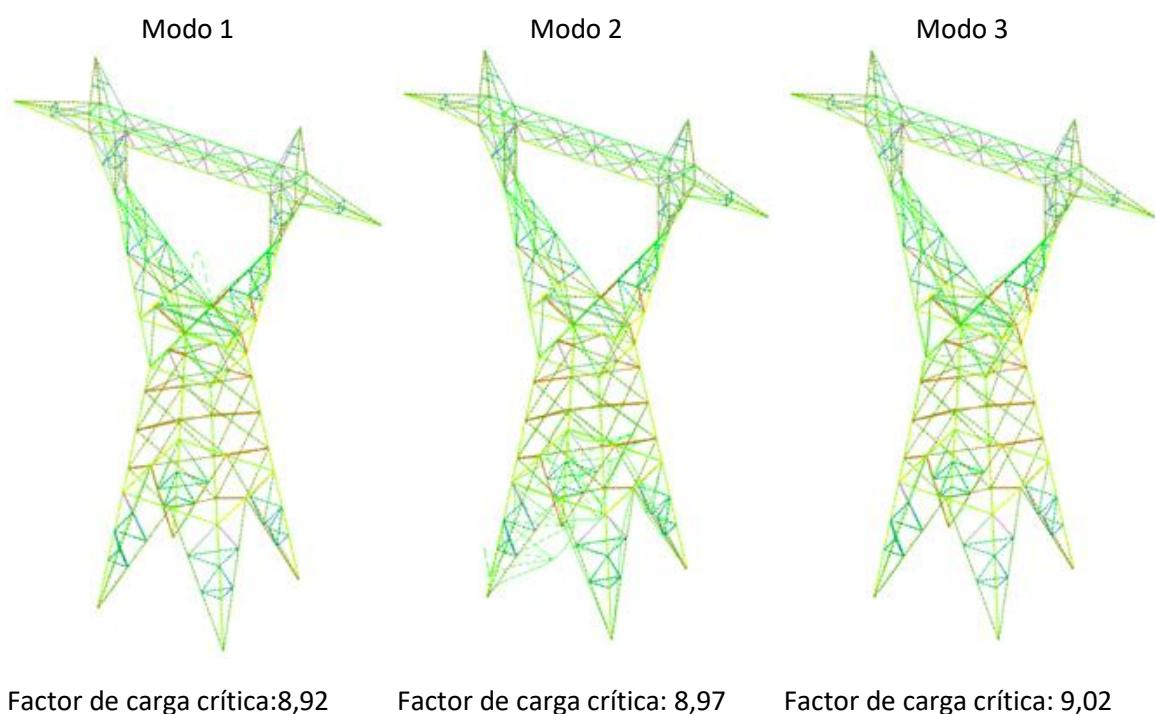
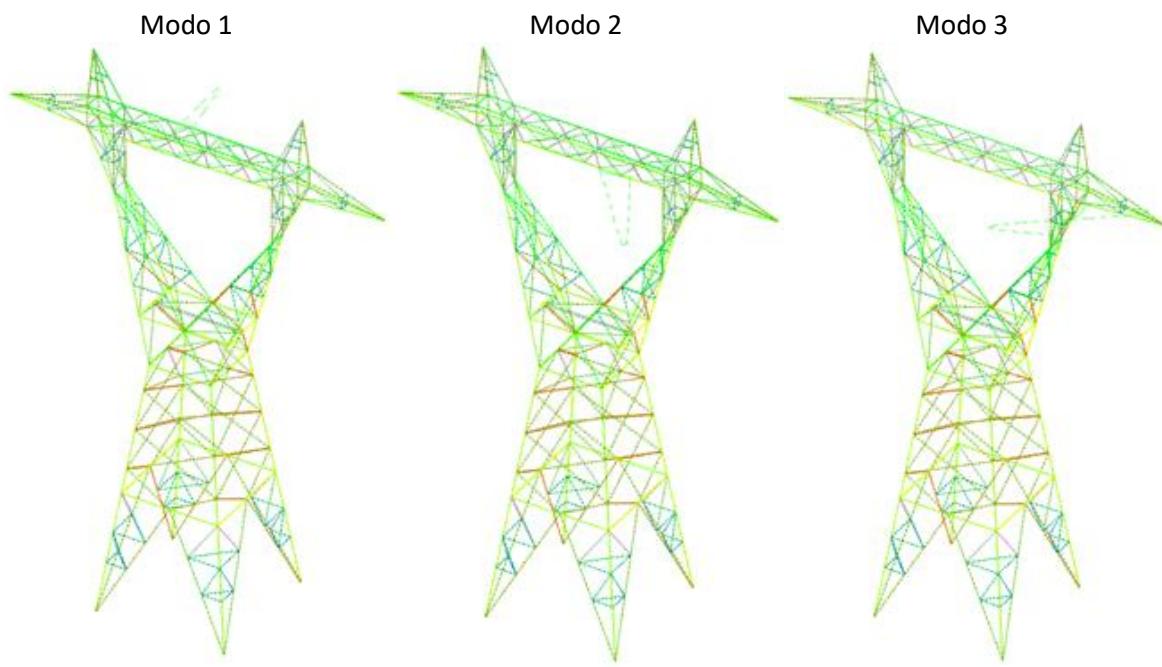
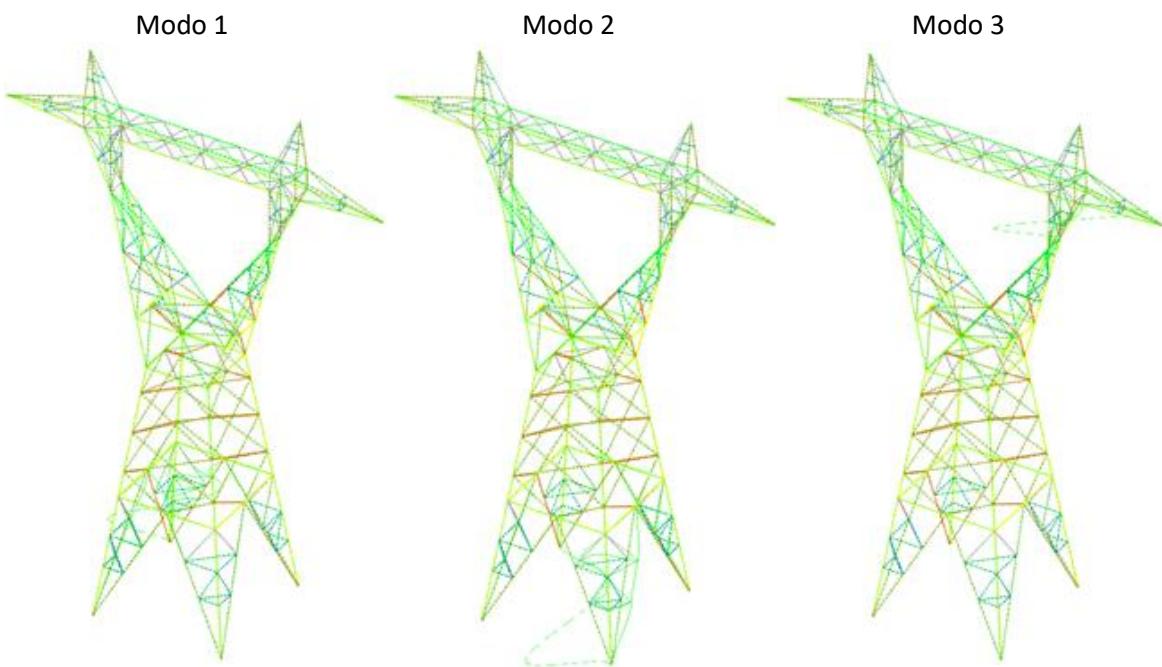


Figura 62. Análisis de pandeo para la hipótesis 6



Factor de carga crítica: 4,40      Factor de carga crítica: 4,42      Factor de carga crítica: 4,88

**Figura 63. Análisis de pandeo para la hipótesis 7**



Factor de carga crítica: 1,07      Factor de carga crítica: 1,22      Factor de carga crítica: 1,31

**Figura 64. Análisis de pandeo para la hipótesis 8**



## 5.2. Conclusiones

Se puede observar, de acuerdo a los resultados obtenidos, que el análisis a pandeo se cumple en cada una de las hipótesis analizadas.

Esto se debe a que en el modo 1, que es el modo con el valor de carga crítica más bajo, dicho valor es bastante superior a 1.5 en las hipótesis de tipo persistente (1 a 6), y es mayor a la unidad en las hipótesis accidentales (7, 8), por lo que el factor de seguridad cumple con los requisitos exigidos.

A continuación se muestra una tabla con los modos obtenidos para cada hipótesis y su factor de carga crítico mínimo.

*Tabla 11. Resumen de factores de carga crítica*

ELS	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Factor de carga crítico mínimo
1	21,33	47,85	50,80	21,33
2	5,52	5,81	6,68	5,52
3	5,57	5,80	6,74	5,57
4	29,20	29,85	30,19	29,20
5	8,92	9,41	10,73	8,92
6	8,92	8,97	9,02	8,92
7	4,40	4,42	4,88	4,40
8	1,07	1,22	1,31	1,07



## 6. CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS

### 6.1. Conclusiones

Una vez realizados el estudio y el consiguiente cálculo a raíz de las hipótesis expuestas, se procede a sacar conclusiones de los resultados, que nos ofrece el programa de simulación de estructuras “I-deas”.

La conclusión fundamental que se alcanza una vez llegado a este punto es la siguiente:

- La hipótesis más desfavorable será en el caso de que se produzca una rotura en uno de los cables laterales de la torre (cables de fase), debido a que se produce una fuerza de una magnitud muy grande que hace que la torre al romperse dicho cable se torsione. Esta situación generaría tensiones tan elevadas que harían que la estructura se dañara o llegara a romperse, generando probablemente de este modo daños en las torres cercanas a dicha torre y por lo tanto daños en la línea de alta tensión. En consecuencia, se decide ampliar los perfiles principales de la torre de un perfil angular de 80x80x8 a un perfil angular de 100x100x10 y finalmente a un perfil de 100x100x12 , volviendo a realizar los cálculos para poder verificar que con la última sección escogida (100x100x12) se cumplen los requerimientos estructurales en todas las hipótesis y por lo tanto es una torre apta para soportar todos los esfuerzos a los que ha sido sometida a estudio y que permitirían considerarla óptima para su utilización en la zona de Teruel.

### 6.2. Futuros estudios

Se podría contemplar, como un trabajo adicional y complementario al realizado en el presente proyecto, un análisis de vibraciones en la torre, para descartar fenómenos de resonancia producidos por las rachas de viento.

Por otra parte, se podrían analizar las diferentes uniones entre perfiles de la estructura.

Finalmente, se podría completar el estudio con el diseño de la cimentación más adecuada para la torre.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

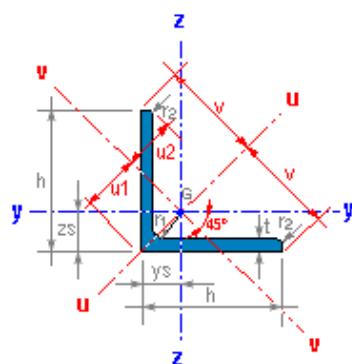
- [1] [https://www.freepik.es/fotos-premium/linea-alimentacion-postes-electricos-hormigon\\_1423734.htm](https://www.freepik.es/fotos-premium/linea-alimentacion-postes-electricos-hormigon_1423734.htm)
- [2] <http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com/2011/07/argentina-nueva-linea-en-alta-tension.html>
- [3] <http://www.sectorelectricidad.com/5612/tipos-de-estructuras-para-alta-media-y-baja-tension/>
- [4] <http://footage.framepool.com/es/shot/429993871-paso-albula-alta-tension-electrica-corriente-electricidad-brillar>
- [5] [http://2.bp.blogspot.com/3ONNI3a6pOw/TdAnCNAR\\_BI/AAAAAAAABI/t1An32GWxco/s1600/electricidad-torres.jpg](http://2.bp.blogspot.com/3ONNI3a6pOw/TdAnCNAR_BI/AAAAAAAABI/t1An32GWxco/s1600/electricidad-torres.jpg)
- [6] [https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=ik0K78jJ&id=E1A2BE0A1EBACB69350A1A2E0D51DF8251C9EC5A&thid=OIP.ik0K78jJbVPPG6Db8R\\_ysgDVEk&q=torre+de+alta+tension+de+remate+estacion+electrica&simid=608011312960309685&selectedIndex=14&ajaxhist=0](https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=ik0K78jJ&id=E1A2BE0A1EBACB69350A1A2E0D51DF8251C9EC5A&thid=OIP.ik0K78jJbVPPG6Db8R_ysgDVEk&q=torre+de+alta+tension+de+remate+estacion+electrica&simid=608011312960309685&selectedIndex=14&ajaxhist=0)
- [7] Redes eléctricas de alta tensión y baja tensión para conducir y distribuir la energía eléctrica. Sexta edición “Ediciones G.Gili. S.A. México D.F. 1984”.
- [8] PROYECTO TIPO DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN AÉREAS (>36 kV.). E.ON Distribución. 2013.
- [9] <https://www.enterat.com/servicios/altitud-sobre-nivel-del-mar-ciudades-espanolas.php>
- [10] <https://www.enterat.com/servicios/altitud-sobre-nivel-del-mar-ciudades-espanolas.php>
- [11] Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio «BOE» núm. 68, de 19 de marzo de 2008 Referencia: BOE-A-2008-5269
- [12] Documento Básico SE Seguridad Estructural. 2006
- [13] Reglamento de alta tensión. Instrucción ITC-LAT 07 “*Líneas aéreas con conductores desnudos*”. <http://www.boe.es/boe/dias/2008/03/19/pdfs/A16436-16554.pdf>, 2018
- [14] Prontuario CELSA v1.01.
- [15] Introducción a la teoría de elementos finitos. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata, 2007.
- [16] Gracia L, Ibarz E. Estructuras de acero. 2011.

## ANEXO 1: PERFILES CONVENCIONALES EMPLEADOS

Gracias al grupo CELSA se puede observar los diferentes perfiles que se han utilizado en la construcción de la torre de alta tensión, junto a una tabla con el centro de gravedad, mediadas del perfil y las inercias tanto en el eje X como en el eje Y. [14]

Los perfiles angulares utilizados son los siguientes:

### L 45x45x5

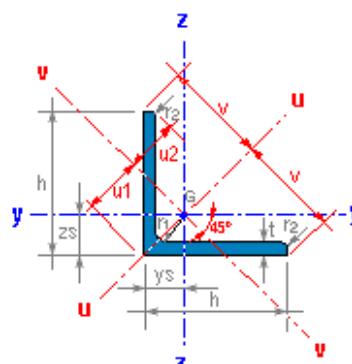


$h = 45 \text{ mm}$	$t = 5,0 \text{ mm}$
$r_1 = 7,0 \text{ mm}$	$r_2 = 3,5 \text{ mm}$
$y_s = z_s = 1,28 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$A = 4,3 \text{ cm}^2$	$M = 3,4 \text{ kg/m}$
<hr/>	<hr/>
$I_y = I_z = 7,84 \text{ cm}^4$	$I_{yz} = 4,58 \text{ cm}^4$
$W_y = W_z = 2,43 \text{ cm}^3$	
$i_y = i_z = 1,35 \text{ cm}$	
$I_u = 12,42 \text{ cm}^4$	$I_v = 3,26 \text{ cm}^4$
$i_u = 1,70 \text{ cm}$	$i_v = 0,87 \text{ cm}$
<hr/>	<hr/>
$u_1 = 1,81 \text{ cm}$	$v = 3,18 \text{ cm}$
$u_2 = 1,58 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$AL = 0,174 \text{ m}^2/\text{m}$	$AG = 51,51 \text{ m}^2/\text{t}$



Figura 65. Perfil L45x45x5

### L 50x50x6



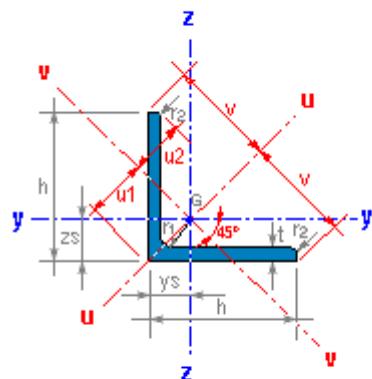
$h = 50 \text{ mm}$	$t = 6,0 \text{ mm}$
$r_1 = 7,0 \text{ mm}$	$r_2 = 3,5 \text{ mm}$
$y_s = z_s = 1,45 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$A = 5,7 \text{ cm}^2$	$M = 4,5 \text{ kg/m}$
<hr/>	<hr/>
$I_y = I_z = 12,84 \text{ cm}^4$	$I_{yz} = 7,50 \text{ cm}^4$
$W_y = W_z = 3,61 \text{ cm}^3$	
$i_y = i_z = 1,50 \text{ cm}$	
$I_u = 20,34 \text{ cm}^4$	$I_v = 5,34 \text{ cm}^4$
$i_u = 1,89 \text{ cm}$	$i_v = 0,97 \text{ cm}$
<hr/>	<hr/>
$u_1 = 2,04 \text{ cm}$	$v = 3,54 \text{ cm}$
$u_2 = 1,77 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$AL = 0,194 \text{ m}^2/\text{m}$	$AG = 43,41 \text{ m}^2/\text{t}$



Figura 66. Perfil L50x50x6



## L 60x60x6

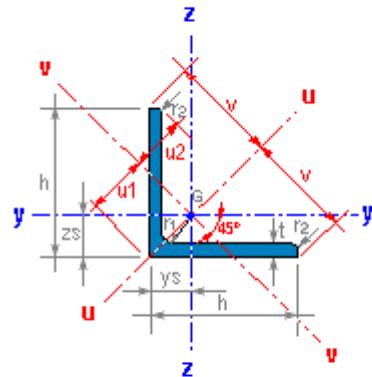


$h = 60 \text{ mm}$	$t = 6,0 \text{ mm}$
$r1 = 8,0 \text{ mm}$	$r2 = 4,0 \text{ mm}$
$y_s = z_s = 1,69 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$A = 6,9 \text{ cm}^2$	$M = 5,4 \text{ kg/m}$
<hr/>	<hr/>
$I_y = I_z = 22,79 \text{ cm}^4$	$I_{yz} = 13,35 \text{ cm}^4$
$W_y = W_z = 5,28 \text{ cm}^3$	
$i_y = i_z = 1,82 \text{ cm}$	
$I_u = 36,14 \text{ cm}^4$	$I_v = 9,44 \text{ cm}^4$
$i_u = 2,29 \text{ cm}$	$i_v = 1,17 \text{ cm}$
<hr/>	<hr/>
$u_1 = 2,39 \text{ cm}$	$v = 4,24 \text{ cm}$
$u_2 = 2,11 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$AL = 0,233 \text{ m}^2/\text{m}$	$AG = 42,99 \text{ m}^2/\text{t}$



Figura 67. Perfil L60x60x6

## L 70x70x7



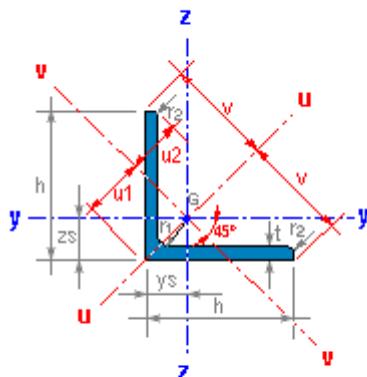
$h = 70 \text{ mm}$	$t = 7,0 \text{ mm}$
$r1 = 9,0 \text{ mm}$	$r2 = 4,5 \text{ mm}$
$y_s = z_s = 1,97 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$A = 9,4 \text{ cm}^2$	$M = 7,4 \text{ kg/m}$
<hr/>	<hr/>
$I_y = I_z = 42,29 \text{ cm}^4$	$I_{yz} = 24,79 \text{ cm}^4$
$W_y = W_z = 8,41 \text{ cm}^3$	
$i_y = i_z = 2,12 \text{ cm}$	
$I_u = 67,08 \text{ cm}^4$	$I_v = 17,50 \text{ cm}^4$
$i_u = 2,67 \text{ cm}$	$i_v = 1,36 \text{ cm}$
<hr/>	<hr/>
$u_1 = 2,79 \text{ cm}$	$v = 4,95 \text{ cm}$
$u_2 = 2,47 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$AL = 0,272 \text{ m}^2/\text{m}$	$AG = 36,91 \text{ m}^2/\text{t}$



Figura 68. Perfil L70x70x7



## L 80x80x8

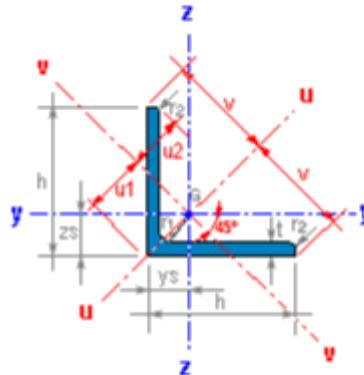


$h = 80 \text{ mm}$	$t = 8,0 \text{ mm}$
$r_1 = 10,0 \text{ mm}$	$r_2 = 5,0 \text{ mm}$
$y_s = z_s = 2,26 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$A = 12,3 \text{ cm}^2$	$M = 9,6 \text{ kg/m}$
<hr/>	<hr/>
$I_y = I_z = 72,24 \text{ cm}^4$	$I_{yz} = 42,37 \text{ cm}^4$
$W_y = W_z = 12,57 \text{ cm}^3$	
$i_y = i_z = 2,43 \text{ cm}$	
$I_u = 114,60 \text{ cm}^4$	$I_v = 29,87 \text{ cm}^4$
$i_u = 3,06 \text{ cm}$	$i_v = 1,56 \text{ cm}$
<hr/>	<hr/>
$u_1 = 3,19 \text{ cm}$	$v = 5,66 \text{ cm}$
$u_2 = 2,83 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$A_L = 0,311 \text{ m}^2/\text{m}$	$A_G = 32,34 \text{ m}^2/\text{t}$



Figura 69. Perfil L80x80x8

## L 100x100x12



$h = 100 \text{ mm}$	$t = 12,0 \text{ mm}$
$r_1 = 12,0 \text{ mm}$	$r_2 = 6,0 \text{ mm}$
$y_s = z_s = 2,90 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$A = 22,7 \text{ cm}^2$	$M = 17,8 \text{ kg/m}$
<hr/>	<hr/>
$I_y = I_z = 206,67 \text{ cm}^4$	$I_{yz} = 120,94 \text{ cm}^4$
$W_y = W_z = 29,12 \text{ cm}^3$	
$i_y = i_z = 3,02 \text{ cm}$	
$I_u = 327,61 \text{ cm}^4$	$I_v = 85,73 \text{ cm}^4$
$i_u = 3,80 \text{ cm}$	$i_v = 1,94 \text{ cm}$
<hr/>	<hr/>
$u_1 = 4,11 \text{ cm}$	$v = 7,07 \text{ cm}$
$u_2 = 3,57 \text{ cm}$	
<hr/>	<hr/>
$A_L = 0,390 \text{ m}^2/\text{m}$	$A_G = 21,86 \text{ m}^2/\text{t}$



Figura 70. Perfil L100x100x12

## ANEXO 2: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos [15] (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método de cálculo utilizado en diversos problemas de ingeniería, que se basa en considerar al cuerpo o estructura dividido en elementos discretos, con determinadas condiciones de vínculo entre sí, generándose un sistema de ecuaciones que se resuelve numéricamente y proporciona el estado de tensiones y deformaciones. También se utiliza en matemáticas como método nodal aproximado para resolver ecuaciones diferenciales en forma numérica.

Es un procedimiento numérico aplicable a un gran número de problemas con condiciones de borde impuestas (en las estructuras las condiciones de borde serían: restricciones y cargas externas). Varios de estos problemas no tienen solución analítica o es muy difícil obtenerla, por lo que se convierte en la única alternativa de resolución.

Con este método se pueden resolver sistemas los cuales no son fáciles de resolver mediante modelos matemáticos simples.

Si bien fue originalmente desarrollado para el análisis de estructuras, con este método se pueden representar entre otros, fenómenos físicos como, fenómenos termodinámicos (distribución de temperaturas en un sólido), simulación de efectos dinámicos (choque de dos cuerpos), o geomecánica (comportamiento de la corteza terrestre).

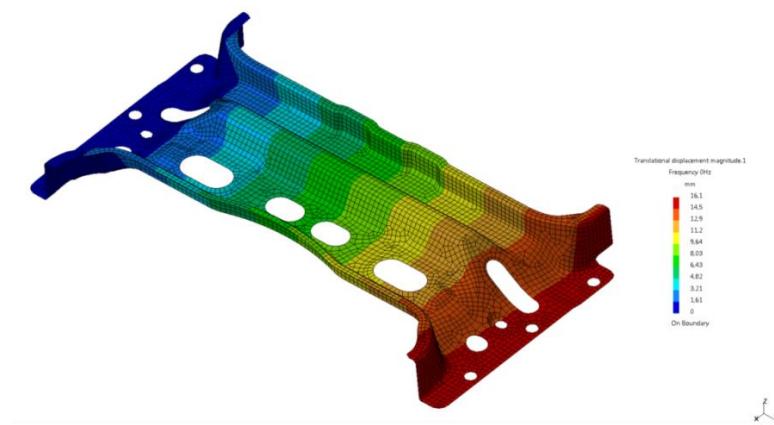


Figura 71. Método de elementos finitos (MEF)

### Concepto

La base del método de los elementos finitos es la representación de un cuerpo por un ensamble de subdivisiones llamadas elementos. Estos elementos se interconectan a través de puntos llamados nodos.

Una manera de discretizar un cuerpo o estructura es dividirla en un sistema equivalente de cuerpos pequeños, tal que su ensamble representa el cuerpo original. La solución que se

obtiene para cada unidad se combina para obtener la solución total. Por ende, La solución del problema consiste en encontrar los desplazamientos de estos puntos y a partir de ellos, las deformaciones y las tensiones del sistema analizado. Las propiedades de los elementos que unen a los nodos, están dadas por el material asignado al elemento, que definen la rigidez del mismo, y la geometría de la estructura a modelizar (a partir de las Leyes de la Elástica). Las deformaciones y las fuerzas externas se relacionan entre sí mediante la rigidez y las relaciones constitutivas del elemento. Trabajando en régimen elástico, las ecuaciones que definen el sistema pueden expresarse de forma matricial como se muestra a continuación:

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{F\}$$

Dónde:

- $[K]$ : es la matriz rigidez del sistema
- $\{\delta\}$ : es el vector desplazamientos
- $\{F\}$ : es el vector de esfuerzos

Los tipos de elementos utilizados generalmente en la resolución a través de FEM son:

- Elementos Lineales (1-D)



Figura 72. Elemento lineal

Estos pueden ser: o Resorte o Barras o Vigas o Caños

- Elementos Planos (2-D)

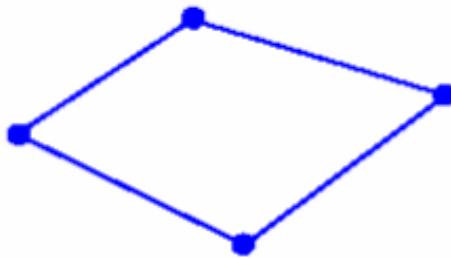


Figura 73. Elemento plano

Estos pueden ser: o membranas o placas

- Elementos Sólidos (3-D)

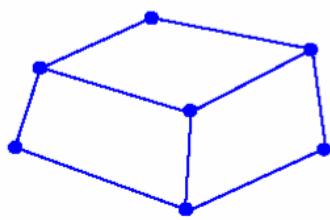


Figura 74. Elemento sólido

Es importante destacar que se puede utilizar combinaciones de estos elementos actuando en conjunto.

El proceso de análisis mediante el método de elementos finitos es el siguiente:

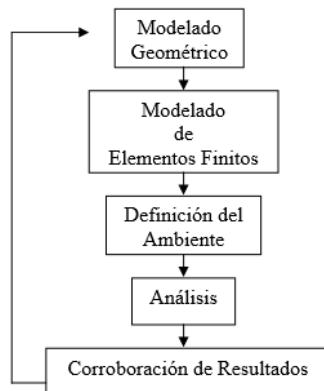


Figura 75. Esquema del análisis mediante elementos finitos (MEF)

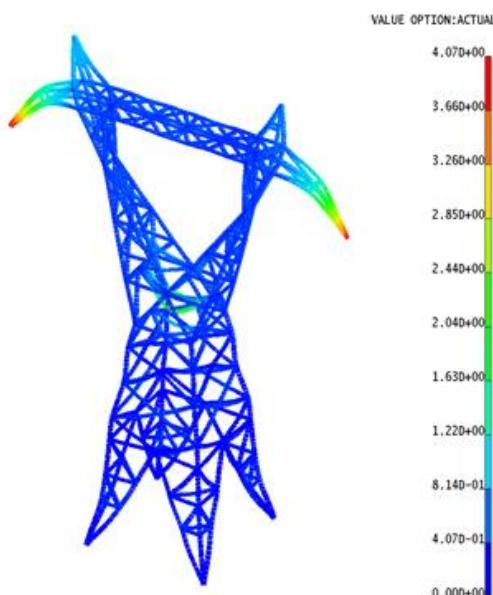
A continuación se detallan cada uno de los puntos del esquema para realizar correctamente el proceso de análisis por elementos finitos.

- **Modelado Geométrico:** Creación del modelo geométrico mediante el software de diseño SolidWorks de la torre de alta tensión, de forma precisa.
- **Modelado de Elementos Finitos:** Subdividir la geometría del modelo en elementos discretos. Asignar las propiedades del material y del elemento.
- **Definición del Ambiente:** Aplicar las cargas y las condiciones de borde para simular el ambiente de la operación.
- **Análisis:** Computar los resultados (tensiones, deformaciones, etc.) a partir de análisis estáticos, dinámicos o de transferencia de calor.
- **Corroboration de Resultados:** Comparar los resultados con los criterios de diseño. Rediseñar la estructura y repetir el proceso si fuese necesario.

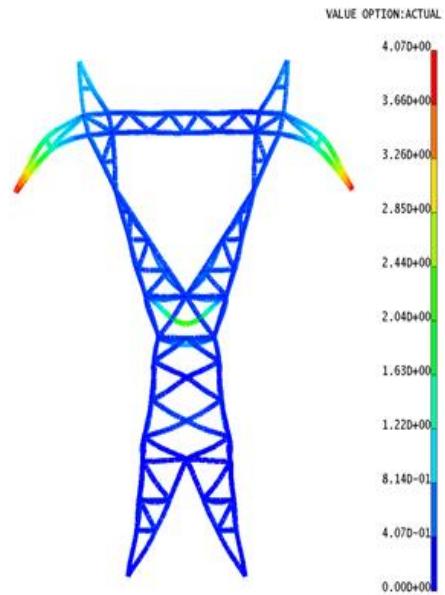
## ANEXO 3: RESULTADOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS PARA EL SEGUNDO ANÁLISIS

En el siguiente anexo se muestran las imágenes desde todas las perspectivas para que de esta forma se puedan apreciar de una mejor manera los desplazamientos que se producen en la torre de alta tensión, para cada uno de las ocho hipótesis propuestas en el documento. Se presentan los resultados en milímetros.

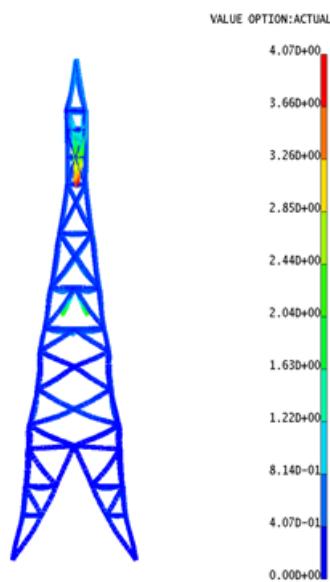
### DESPLAZAMIENTOS EN MAGNITUD



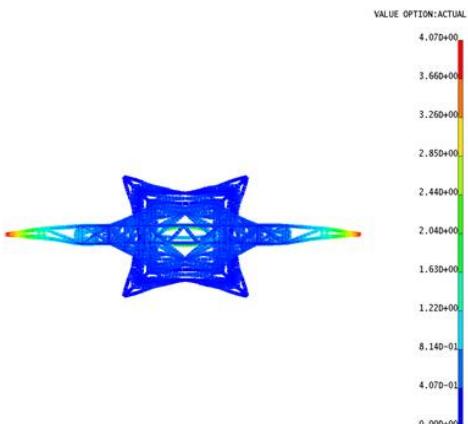
Vista isométrica desplazamiento ELS-1



Vista frontal desplazamiento ELS-1

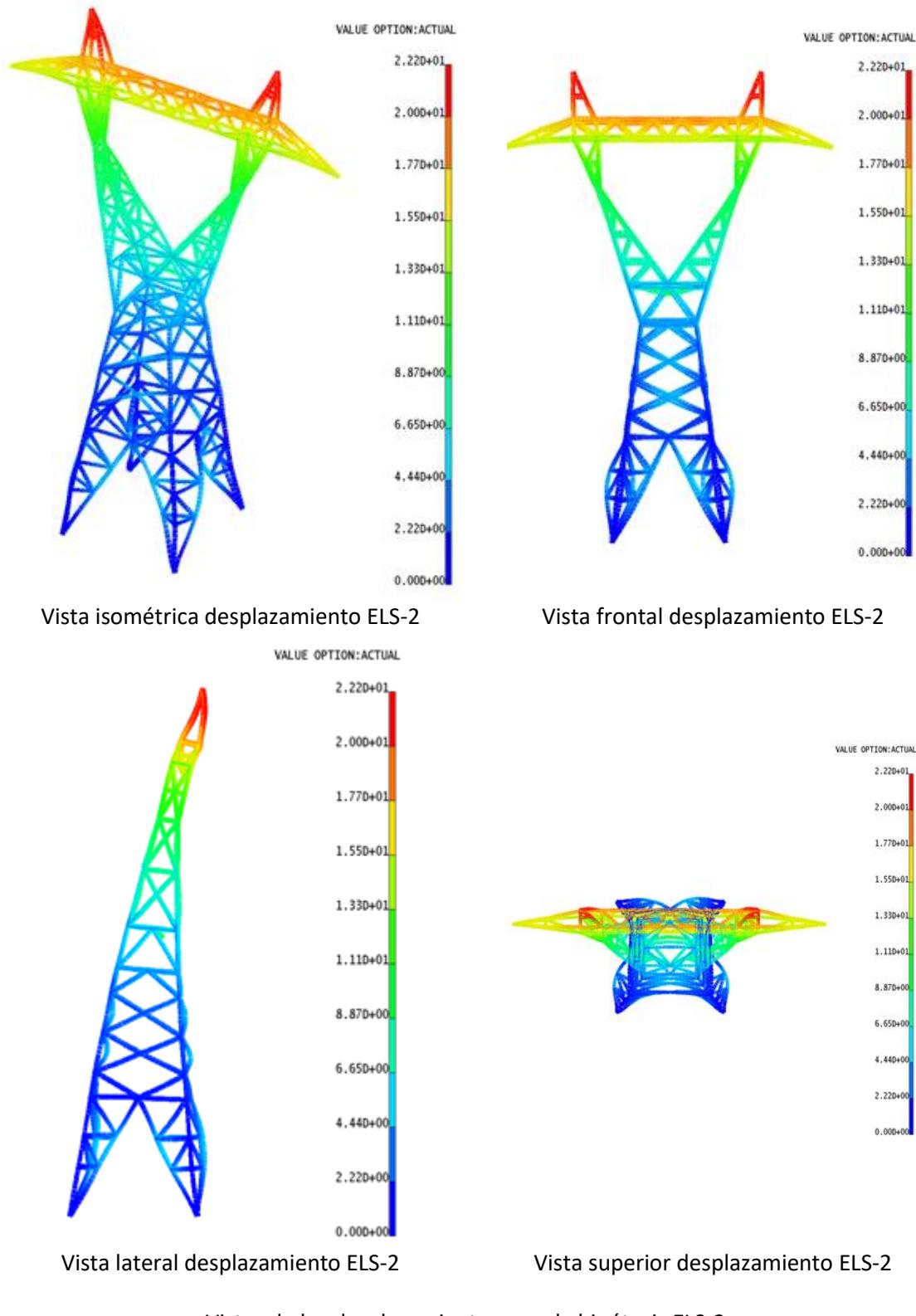


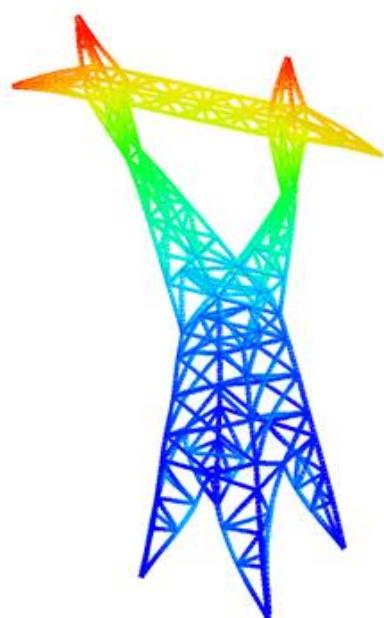
Vista lateral desplazamiento ELS-1



Vista superior desplazamiento ELS-1

Vistas de los desplazamientos para la hipótesis ELS-1

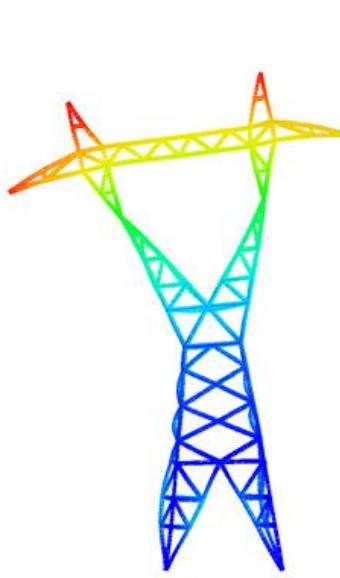




Vista isométrica desplazamiento ELS-3

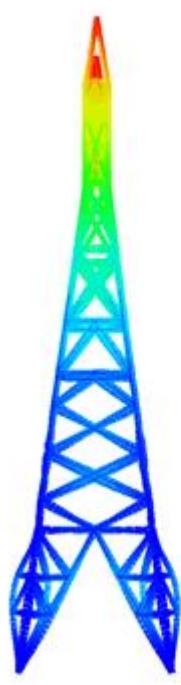
VALUE OPTION:ACTUAL

2.720+01  
2.450+01  
2.180+01  
1.910+01  
1.630+01  
1.360+01  
1.090+01  
8.170+00  
5.440+00  
2.720+00  
0.000+00

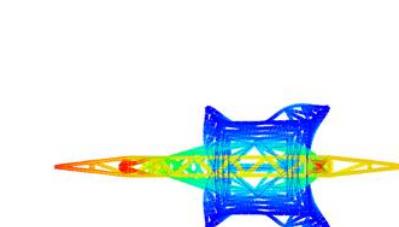


Vista frontal desplazamiento ELS-3

VALUE OPTION:ACTUAL  
2.720+01  
2.450+01  
2.180+01  
1.910+01  
1.630+01  
1.360+01  
1.090+01  
8.170+00  
5.440+00  
2.720+00  
0.000+00



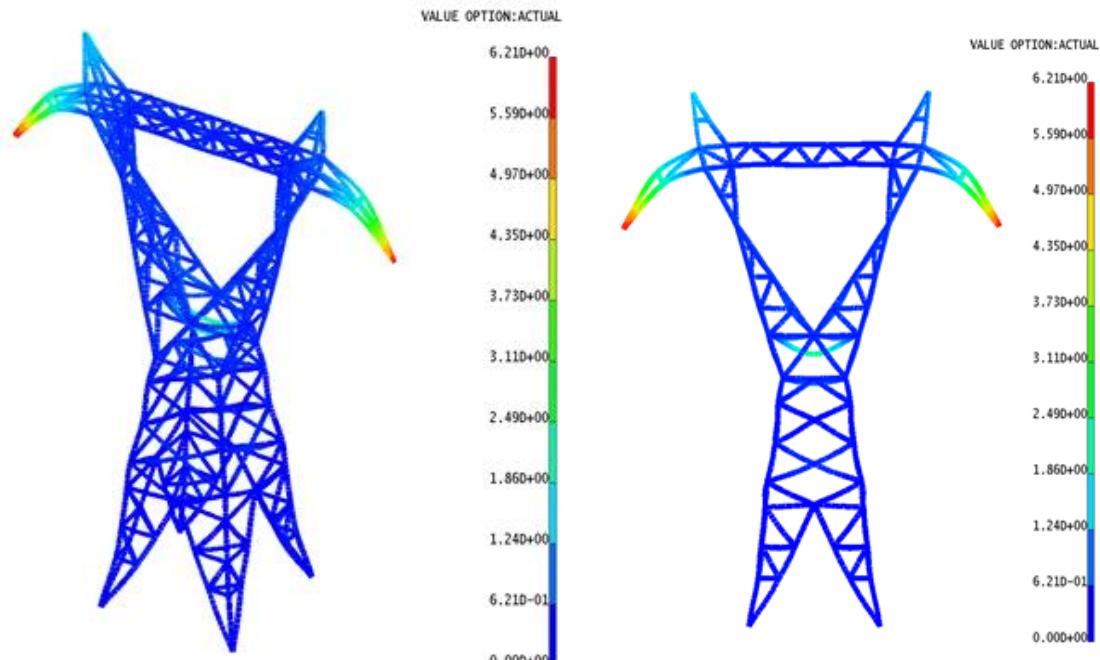
Vista lateral desplazamiento ELS-3



Vista superior desplazamiento ELS-3

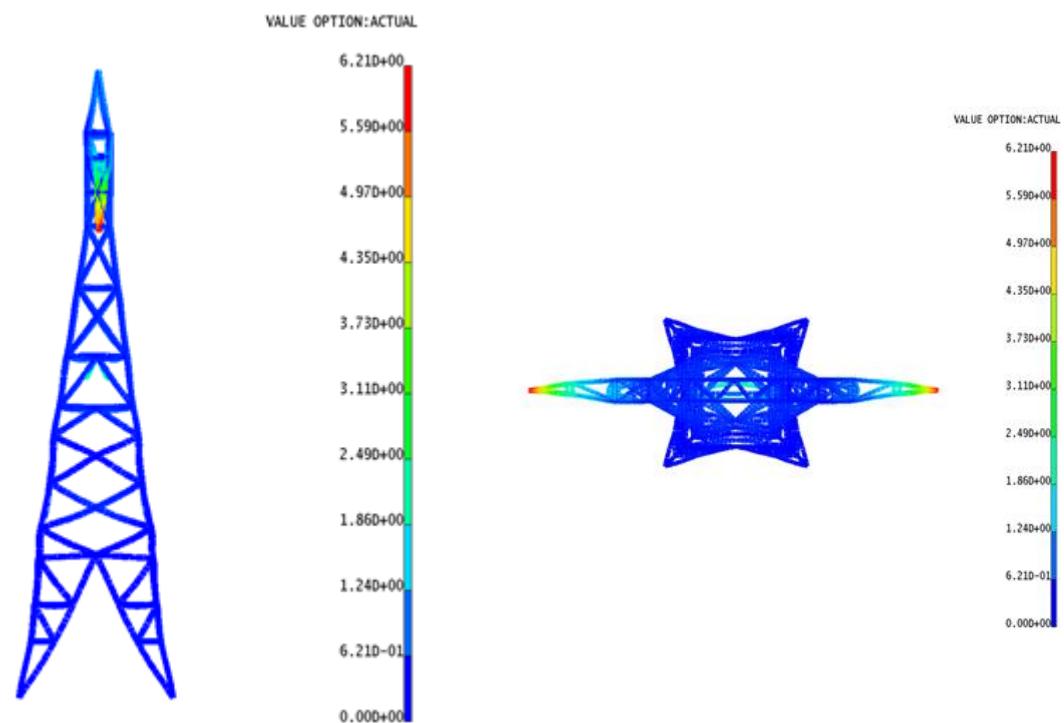
VALUE OPTION:ACTUAL  
2.720+01  
2.450+01  
2.180+01  
1.910+01  
1.630+01  
1.360+01  
1.090+01  
8.170+00  
5.440+00  
2.720+00  
0.000+00

Vistas de los desplazamientos para la hipótesis ELS-3



Vista isométrica desplazamiento ELS-4

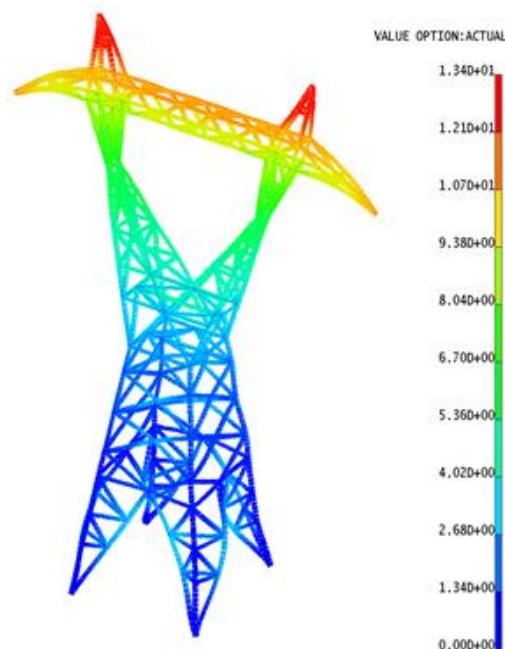
Vista frontal desplazamiento ELS-4



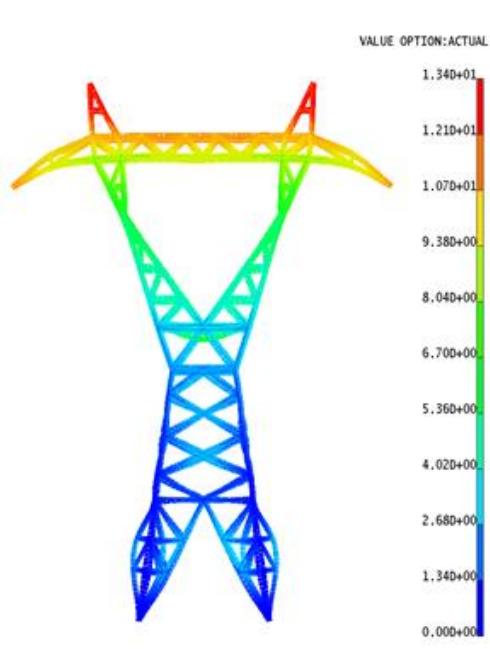
Vista lateral desplazamiento ELS-4

Vista superior desplazamiento ELS-4

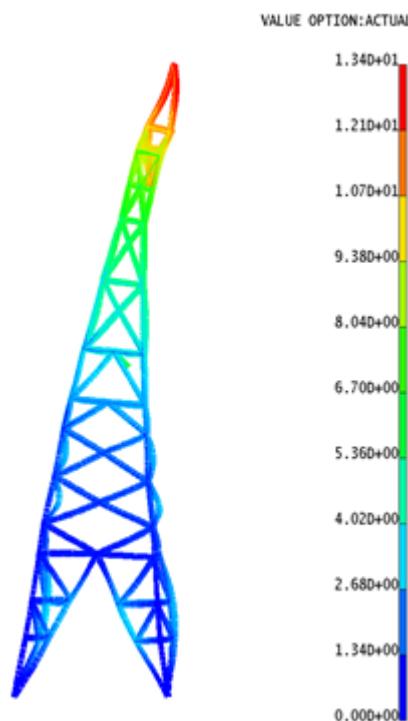
Vistas de los desplazamientos para la hipótesis ELS-4



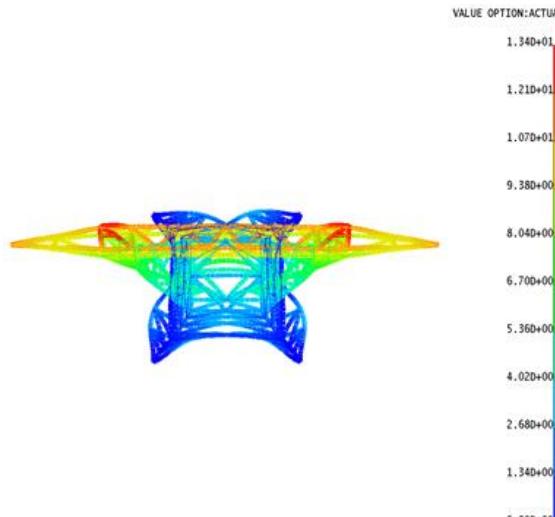
Vista isométrica desplazamiento ELS-5



Vista frontal desplazamiento ELS-5

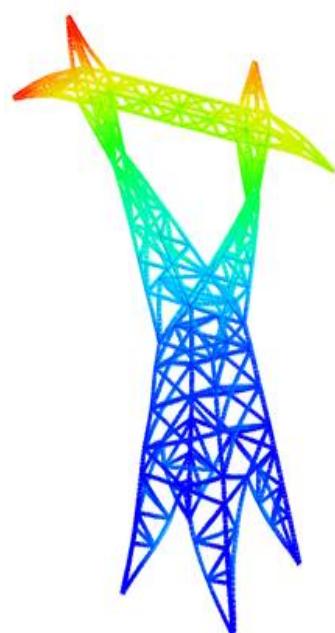


Vista lateral desplazamiento ELS-5

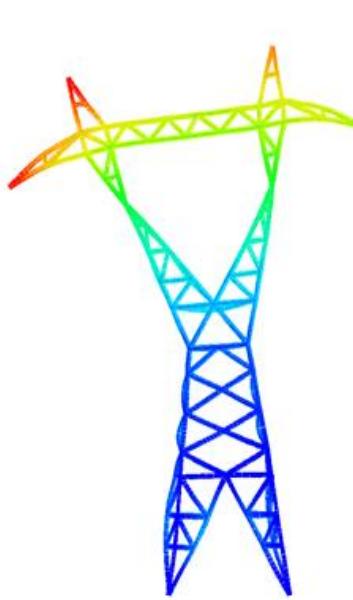


Vista superior desplazamiento ELS-5

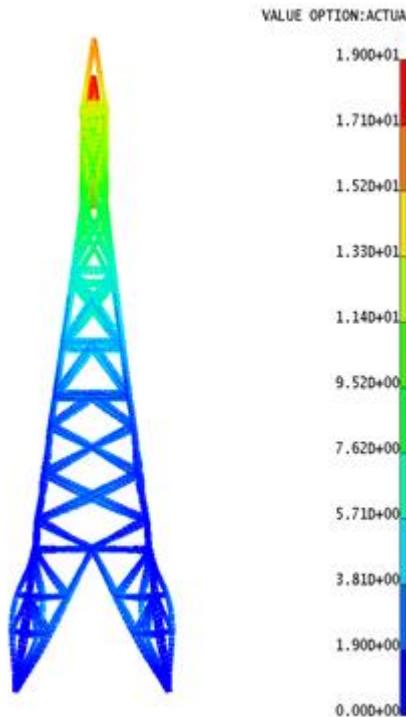
Vistas de los desplazamientos para la hipótesis ELS-5



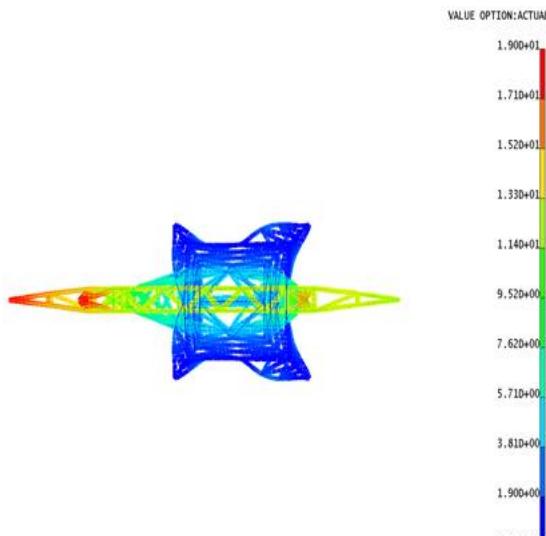
Vista isométrica desplazamiento ELS-6



Vista frontal desplazamiento ELS-6

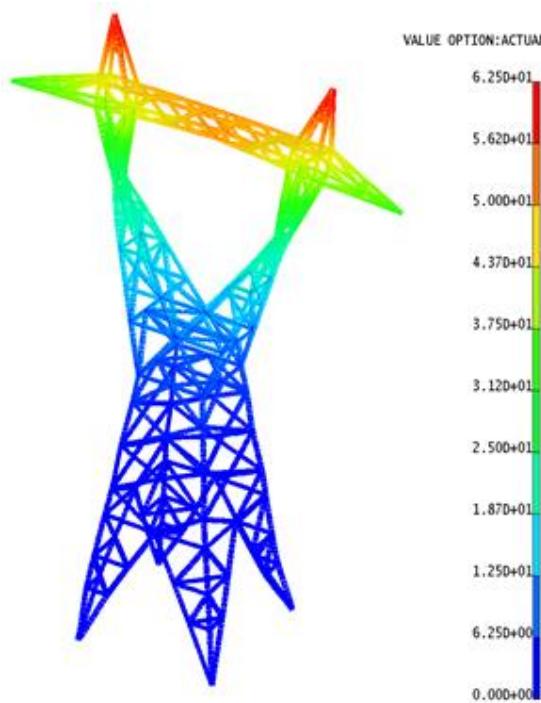


Vista lateral desplazamiento ELS-6

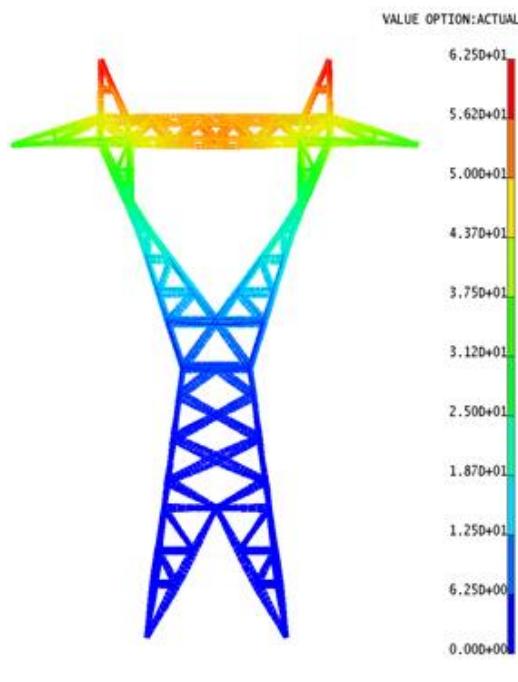


Vista superior desplazamiento ELS-6

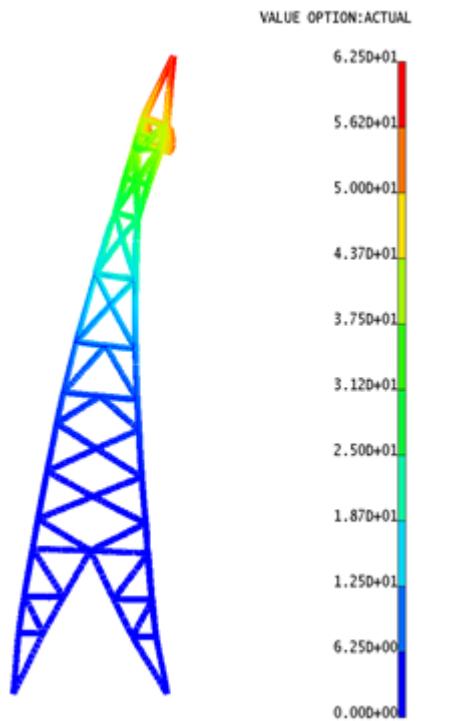
Vistas de los desplazamientos para la hipótesis ELS-6



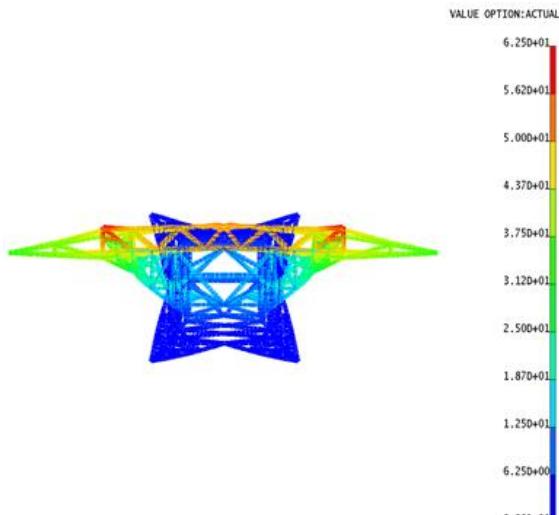
Vista isométrica desplazamiento ELS-7



Vista frontal desplazamiento ELS-7

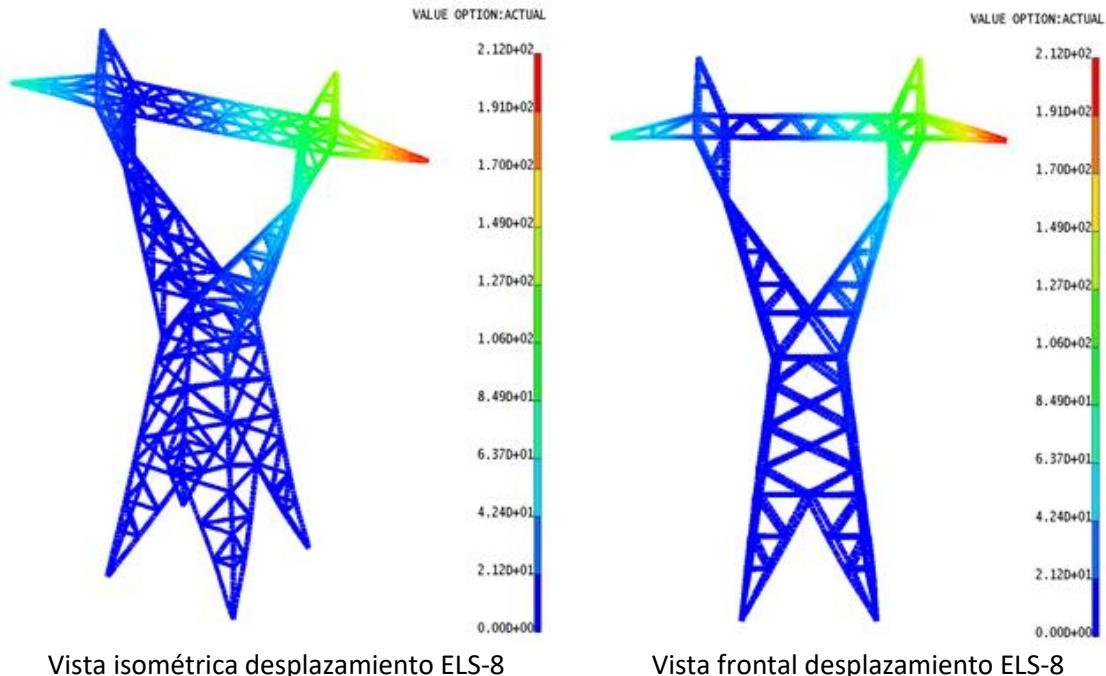


Vista lateral desplazamiento ELS-7



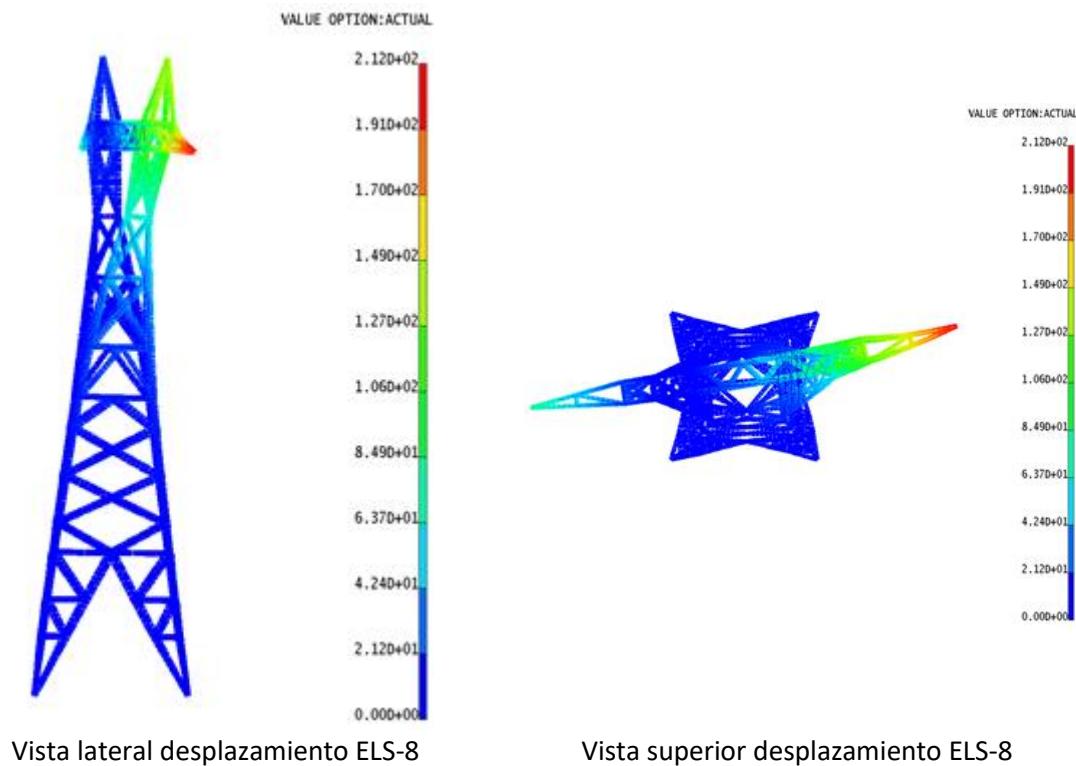
Vista superior desplazamiento ELS-7

Vistas de los desplazamientos para la hipótesis ELS-7



Vista isométrica desplazamiento ELS-8

Vista frontal desplazamiento ELS-8



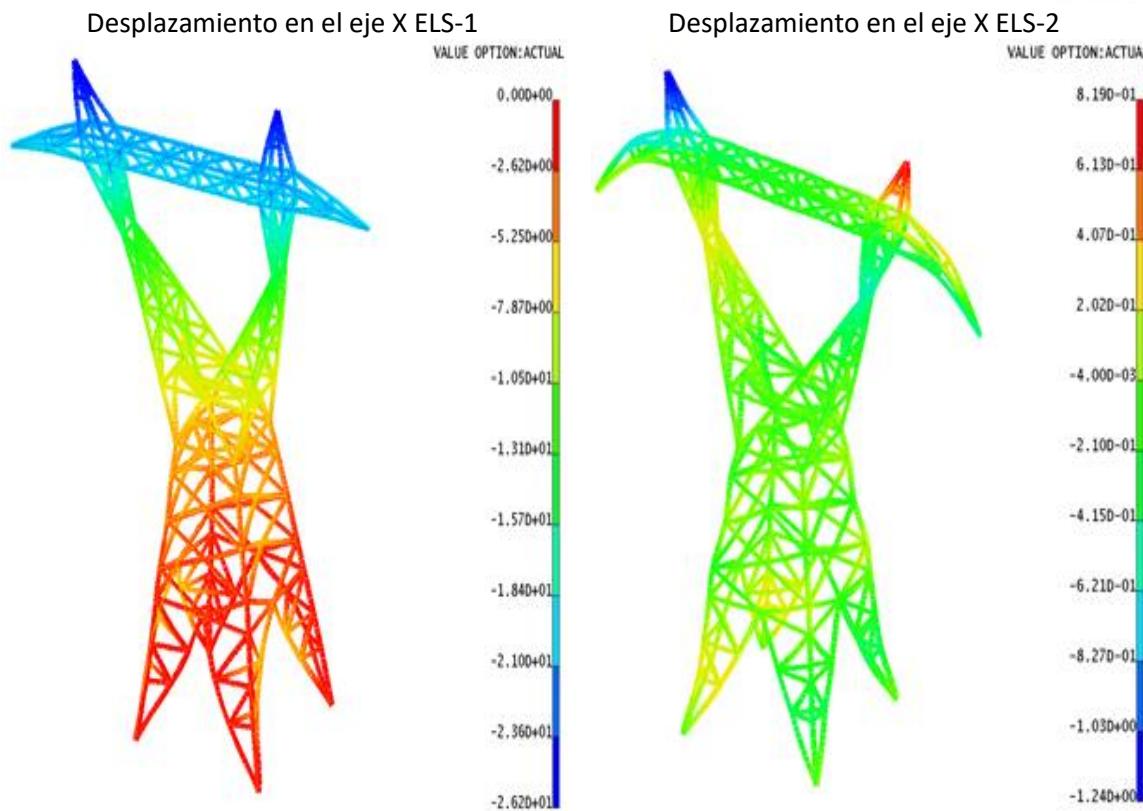
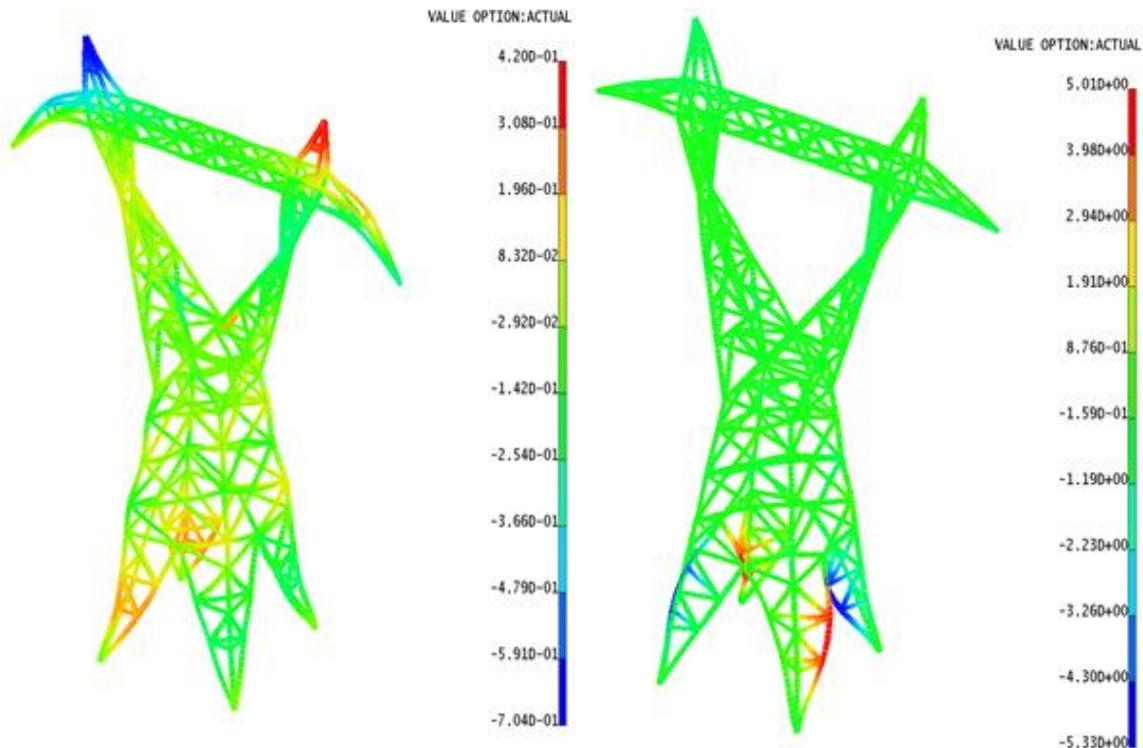
Vistas de los desplazamientos para la hipótesis ELS-8

Figura 76. Resultados desde diferentes ángulos de los desplazamientos de la torre

En las siguientes figuras, se presentan los desplazamientos que se producen en la torre de alta

tensión en sus tres ejes, para observar cómo se desplaza individualmente a lo largo de cada eje de proyección.

#### DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE X



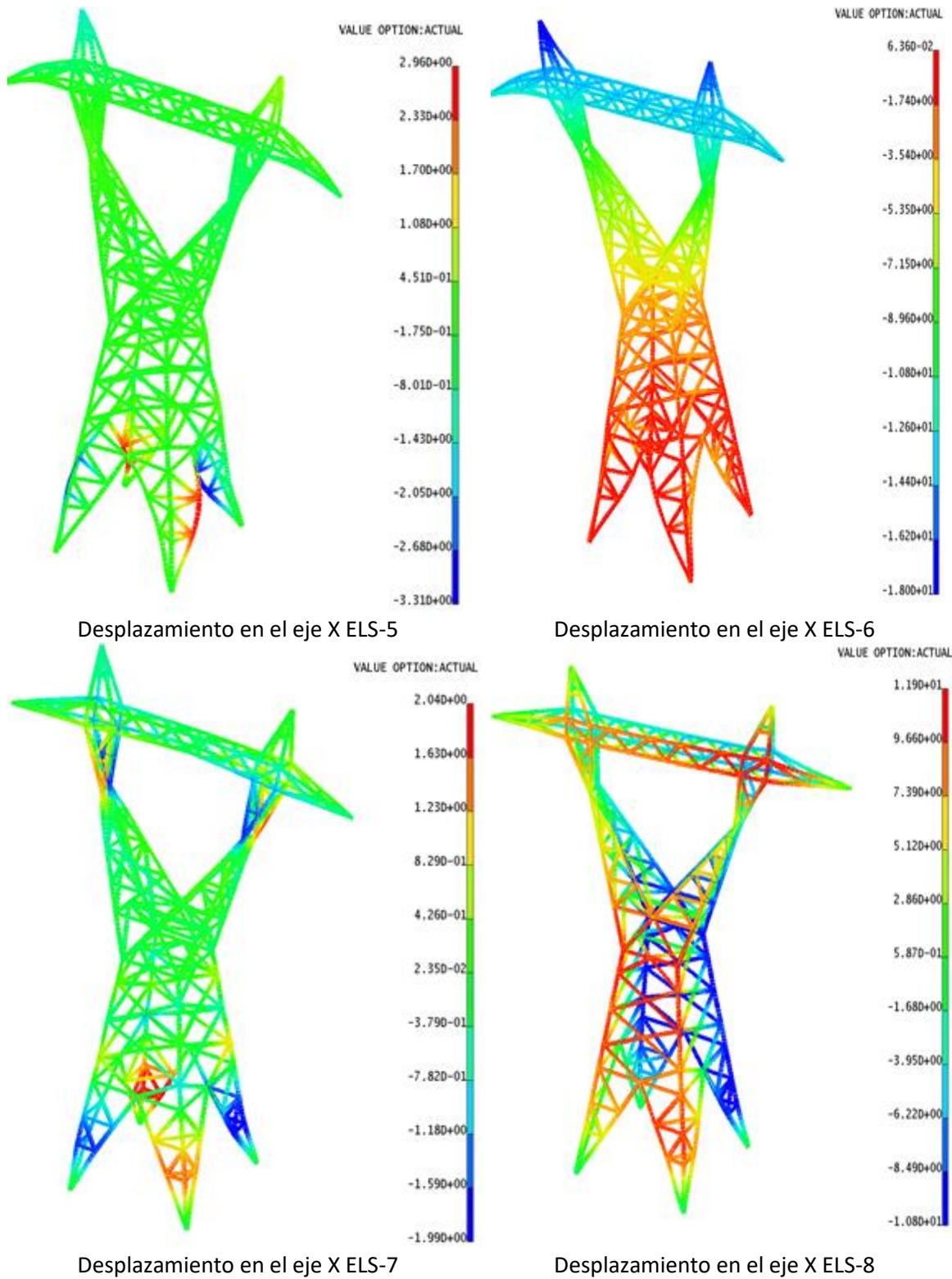
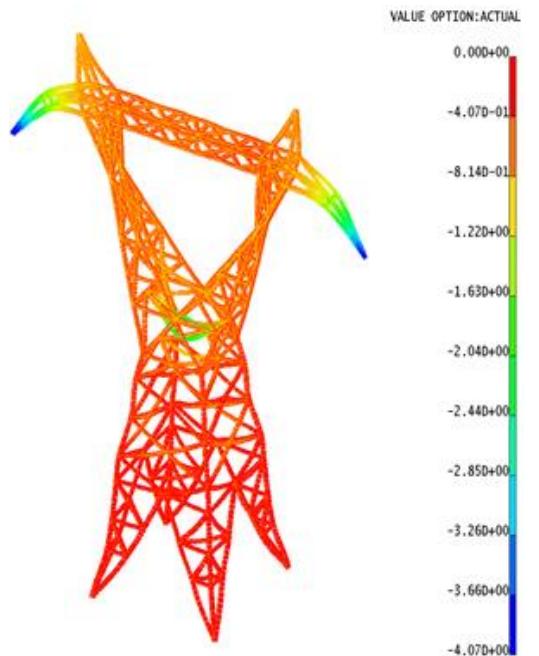
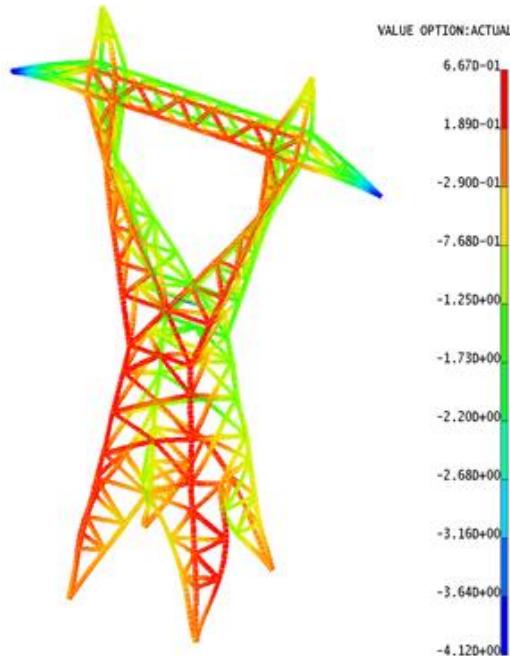


Figura 77. Desplazamientos tomados sobre el eje X (ELS)

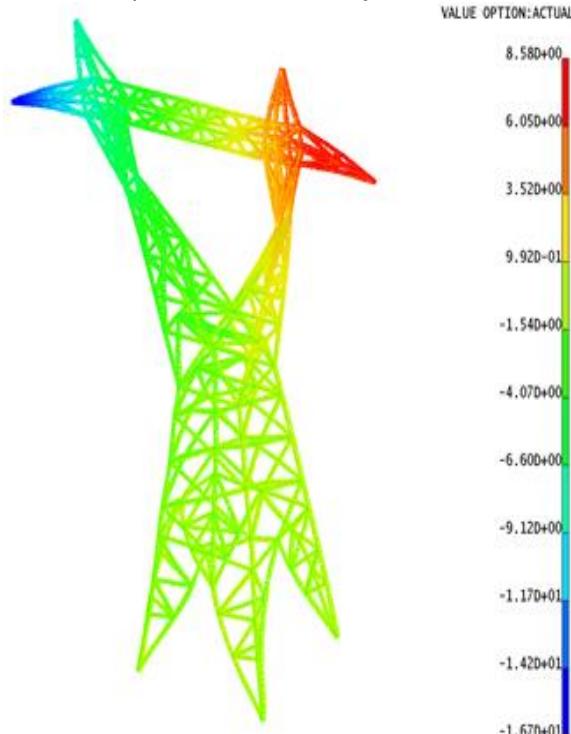
## DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Y



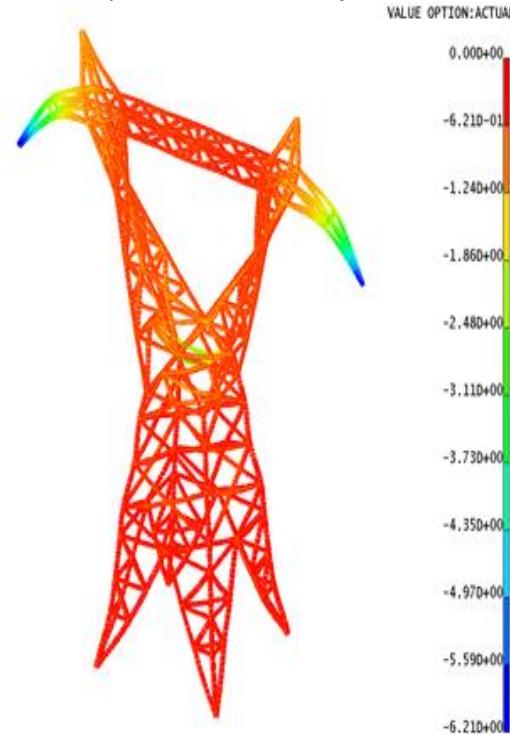
Desplazamiento en el eje Y ELS-1



Desplazamiento en el eje Y ELS-2



Desplazamiento en el eje Y ELS-3



Desplazamiento en el eje Y ELS-4

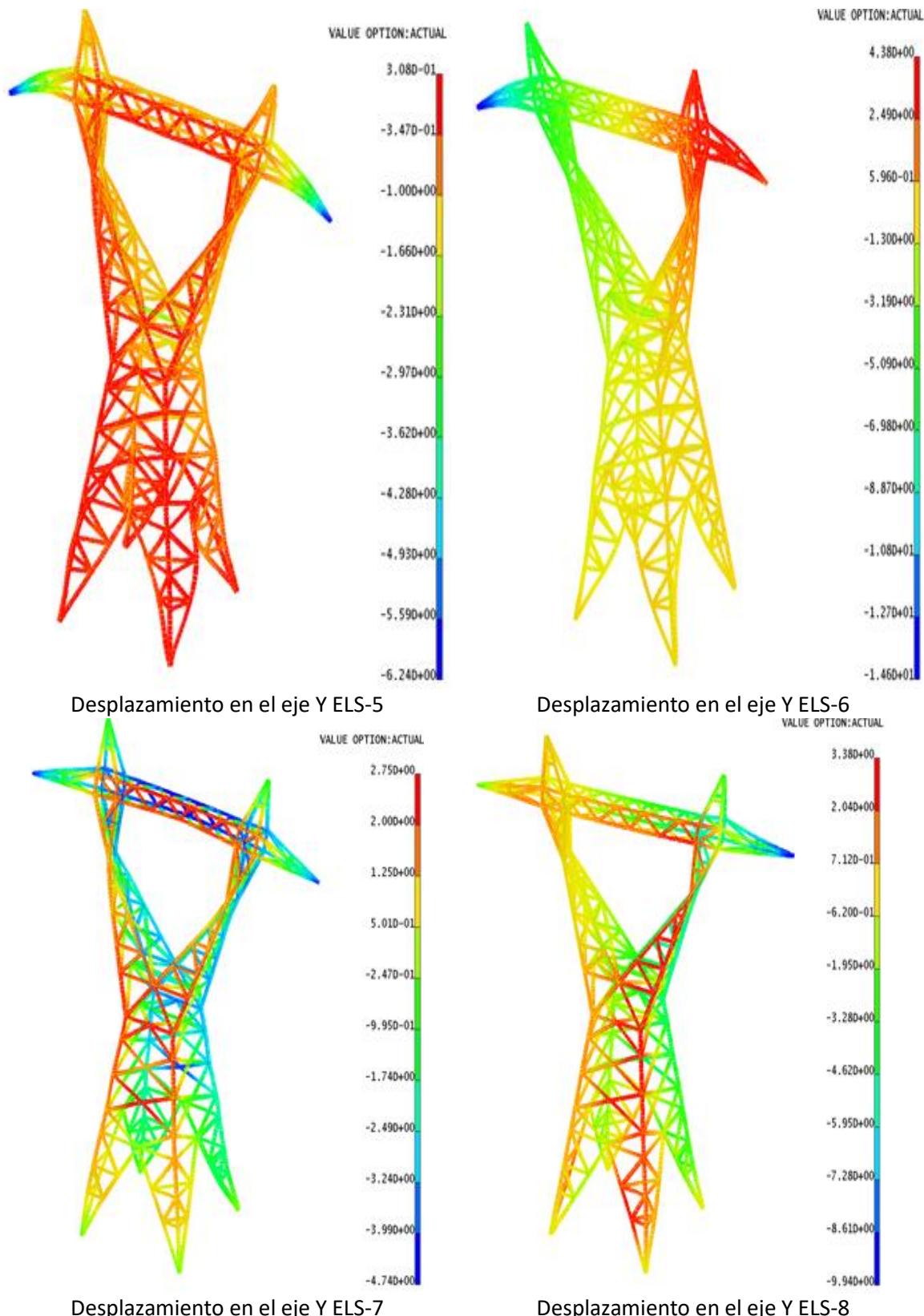
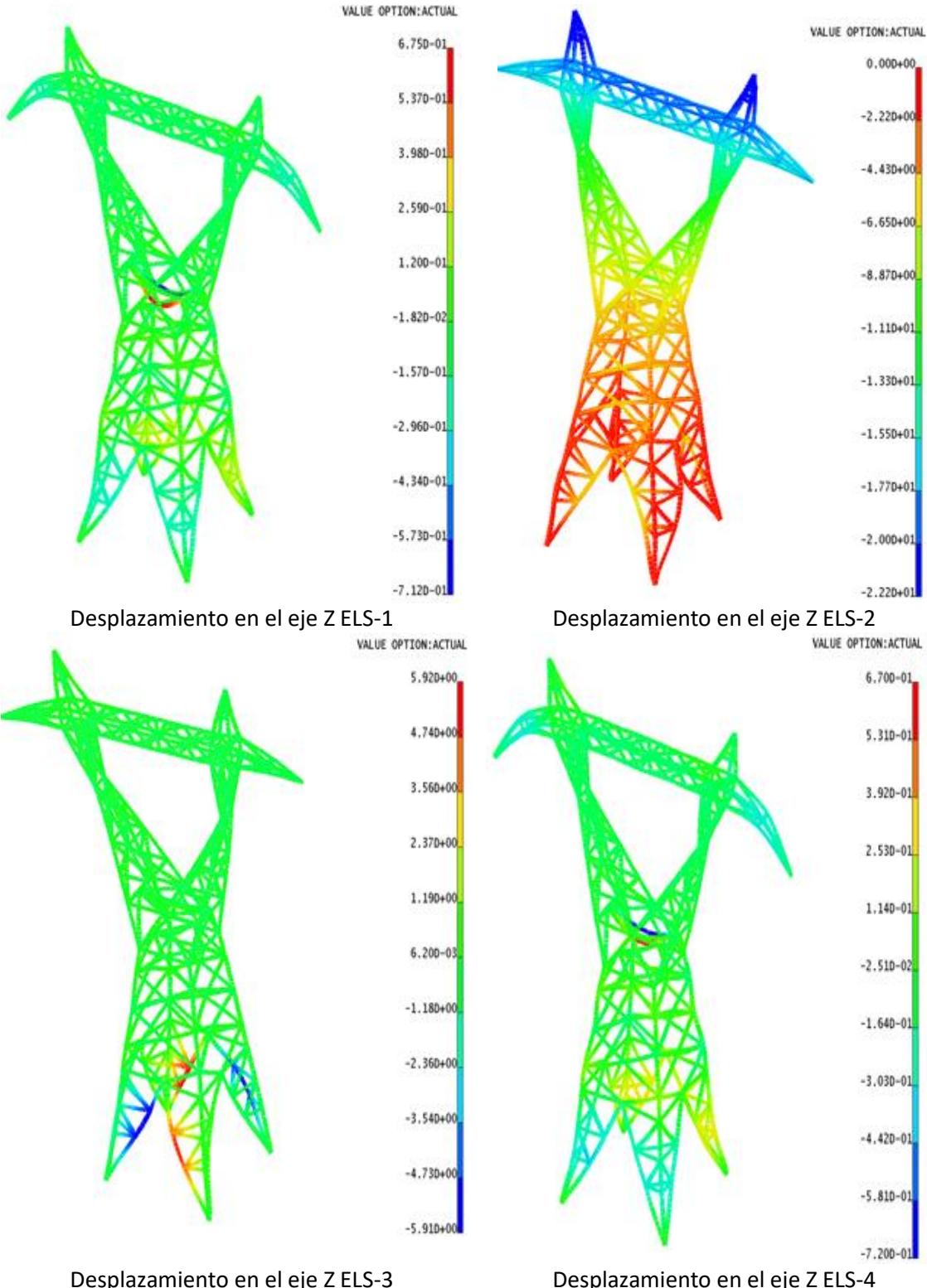


Figura 78. Desplazamientos tomados sobre el eje Y (ELS)

## DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Z



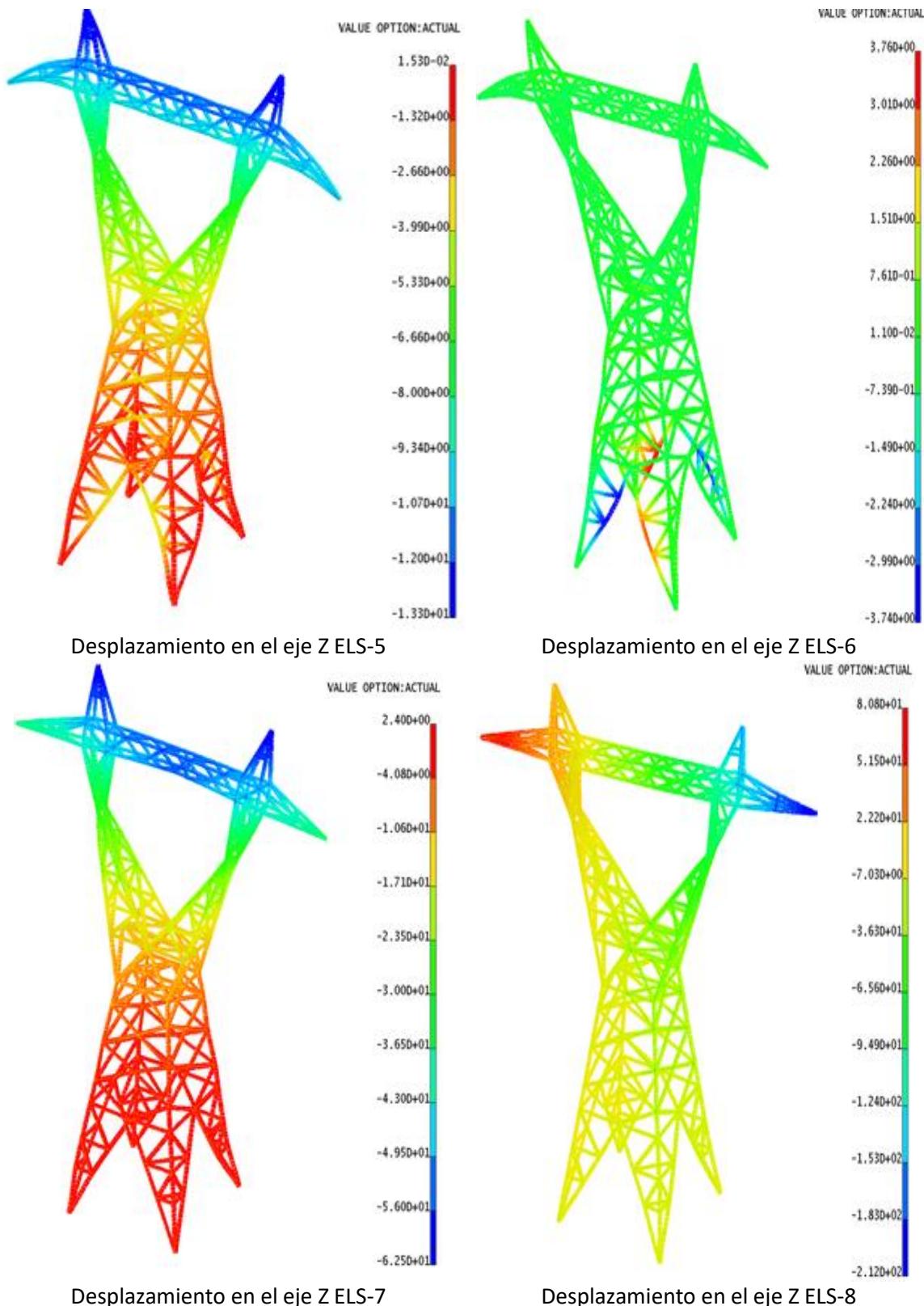
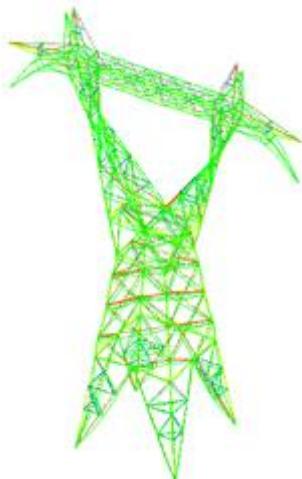


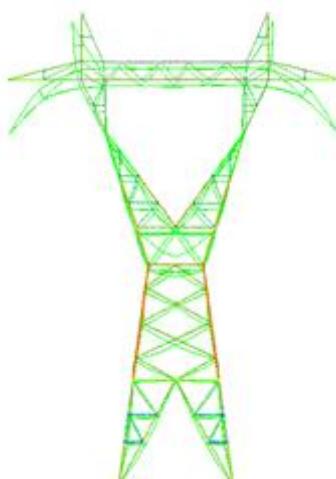
Figura 79. Desplazamientos tomados sobre el eje Z (ELS)

## ANEXO 4: RESULTADOS DE LAS DEFORMADAS PARA EL SEGUNDO ANÁLISIS

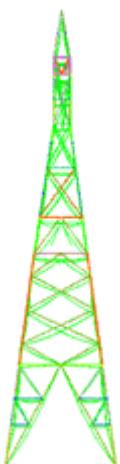
En el siguiente anexo se muestran las imágenes desde todas las perspectivas para que de esta forma se puedan apreciar de una mejor manera las deformadas que se producen en la torre de alta tensión, para cada uno de las ocho hipótesis propuestas en el documento. Dichas deformadas se han amplificado para facilitar su visualización.



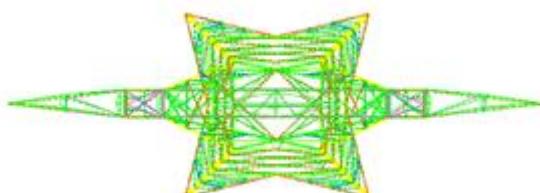
Vista isométrica deformada ELS-1



Vista frontal deformada ELS-1

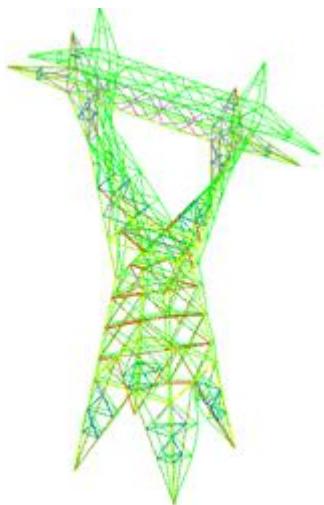


Vista lateral deformada ELS-1

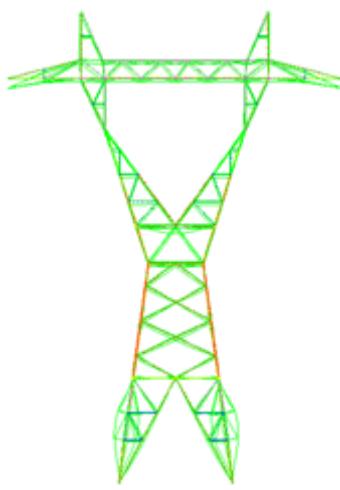


Vista superior deformada ELS-1

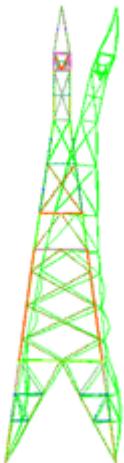
Vistas de la deformada para la hipótesis ELS-1



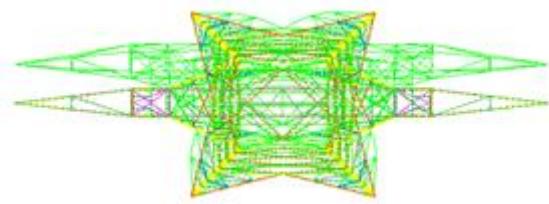
Vista isométrica deformada ELS-2



Vista frontal deformada ELS-2

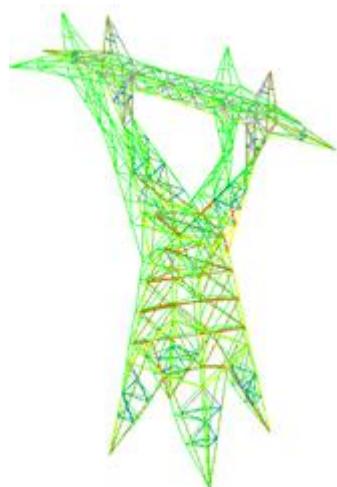


Vista lateral deformada ELS-2

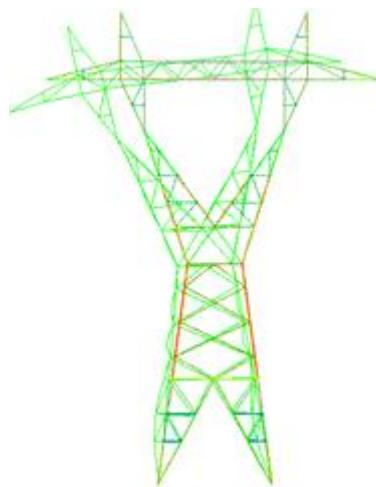


Vista superior deformada ELS-2

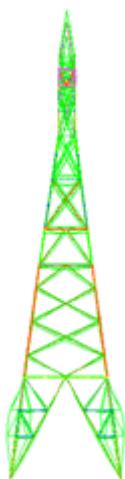
Vistas de la deformada para la hipótesis ELS-2



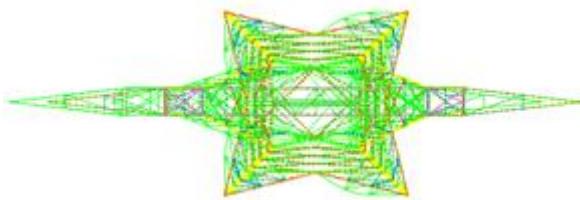
Vista isométrica deformada ELS-3



Vista frontal deformada ELS-3

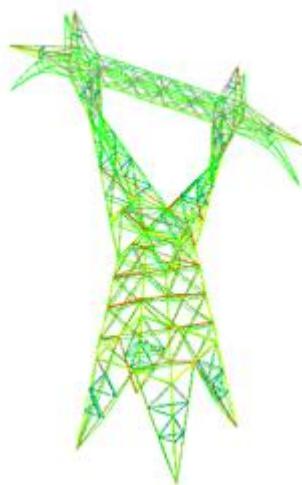


Vista lateral deformada ELS-3

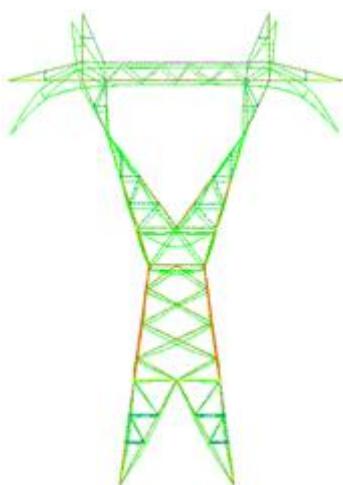


Vista superior deformada ELS-3

Vistas de la deformada para la hipótesis ELS-3



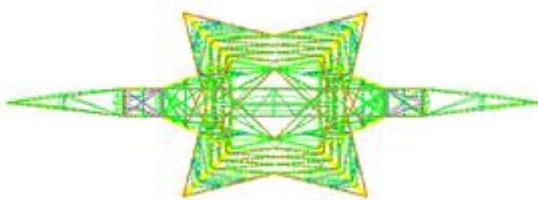
Vista isométrica deformada ELS-4



Vista frontal deformada ELS-4

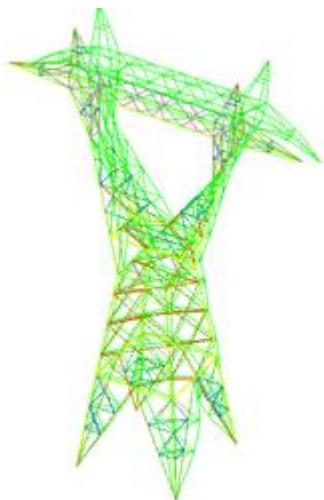


Vista lateral deformada ELS-4

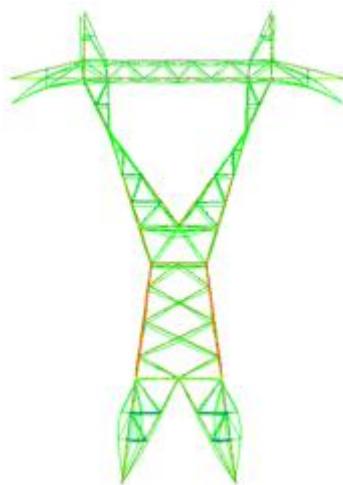


Vista superior deformada ELS-4

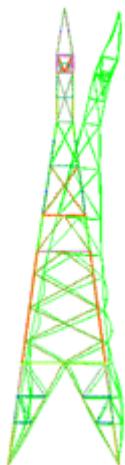
Vistas de la deformada para la hipótesis ELS-4



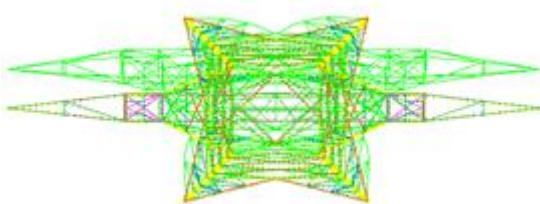
Vista isométrica deformada ELS-5



Vista frontal deformada ELS-5

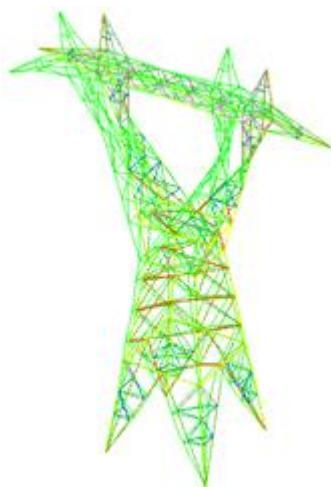


Vista lateral deformada ELS-5

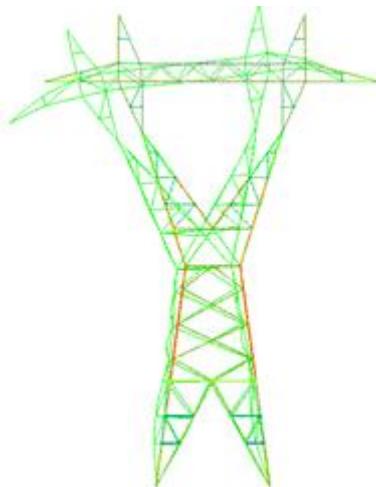


Vista superior deformada ELS-5

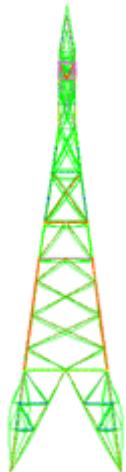
Vistas de la deformada para la hipótesis ELS-5



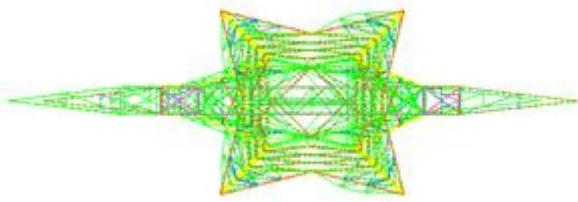
Vista isométrica deformada ELS-6



Vista frontal deformada ELS-6

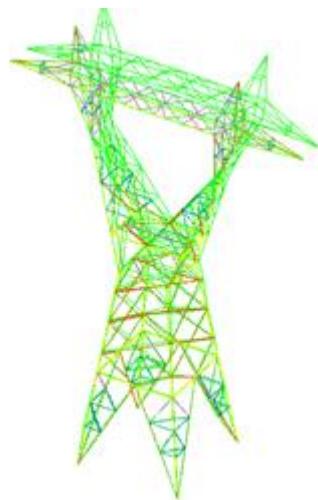


Vista lateral deformada ELS-6

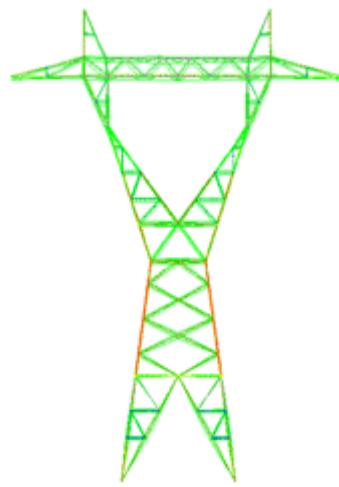


Vista superior deformada ELS-6

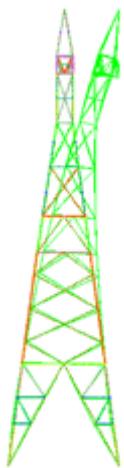
Vistas de la deformada para la hipótesis ELS-6



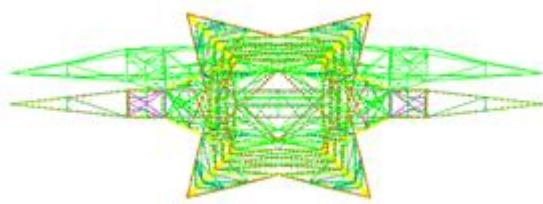
Vista isométrica deformada ELS-7



Vista frontal deformada ELS-7

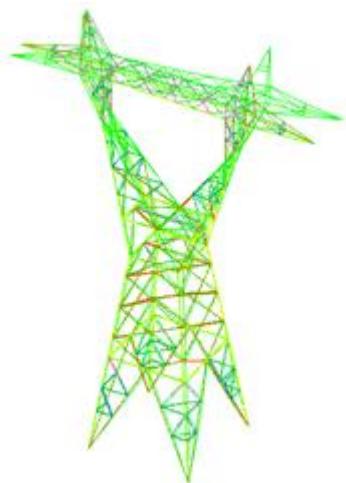


Vista lateral deformada ELS-7

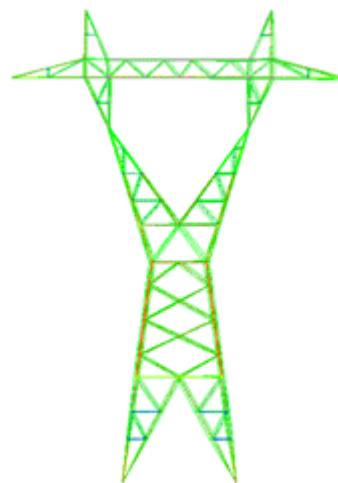


Vista superior deformada ELS-7

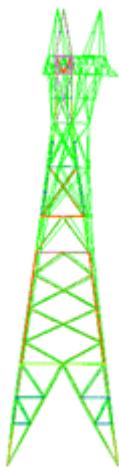
Vistas de la deformada para la hipótesis ELS-7



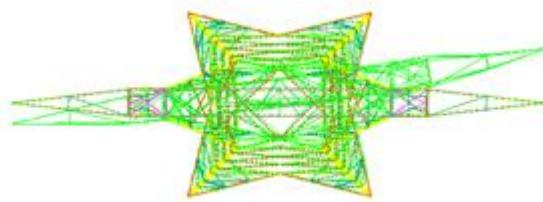
Vista isométrica deformada ELS-8



Vista frontal deformada ELS-8



Vista lateral deformada ELS-8



Vista superior deformada ELS-8

Vistas de la deformada para la hipótesis ELS-8

*Figura 80.Resultados desde diferentes ángulos de las deformadas de la torre*

Se puede apreciar que la hipótesis que más sufre es la hipótesis ocho, ya que, en esa hipótesis la torre tiende a retorcerse debido a la rotura accidental de uno de los cables de fase, por lo que cumpliendo esa hipótesis más desfavorable los análisis expuestos en este documento tendrán que cumplir con las especificaciones marcadas.

## ANEXO 5: CÁLCULOS DE LAS FUERZAS A APLICAR EN LA SIMULACIÓN.

En este anexo se muestran las imágenes de la tabla Excel realizada para el cálculo de todas las fuerzas que se han metido al programa para realizar la simulación de la torre de alta tensión. [13]

### 1. CÁLCULO DE LA SOBRECARGA DE HIELO EN LOS CONDUCTORES

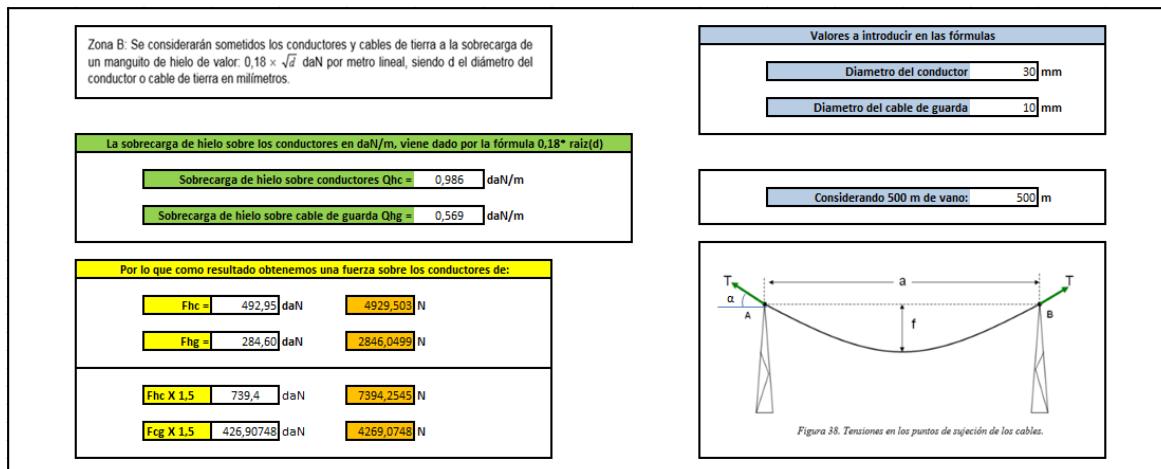


Figura 81. Cálculo de sobrecarga de hielo en los conductores de la torre

### 2. CÁLCULO DE LAS CARGAS DE VIENTO SOBRE LA ESTRUCTURA

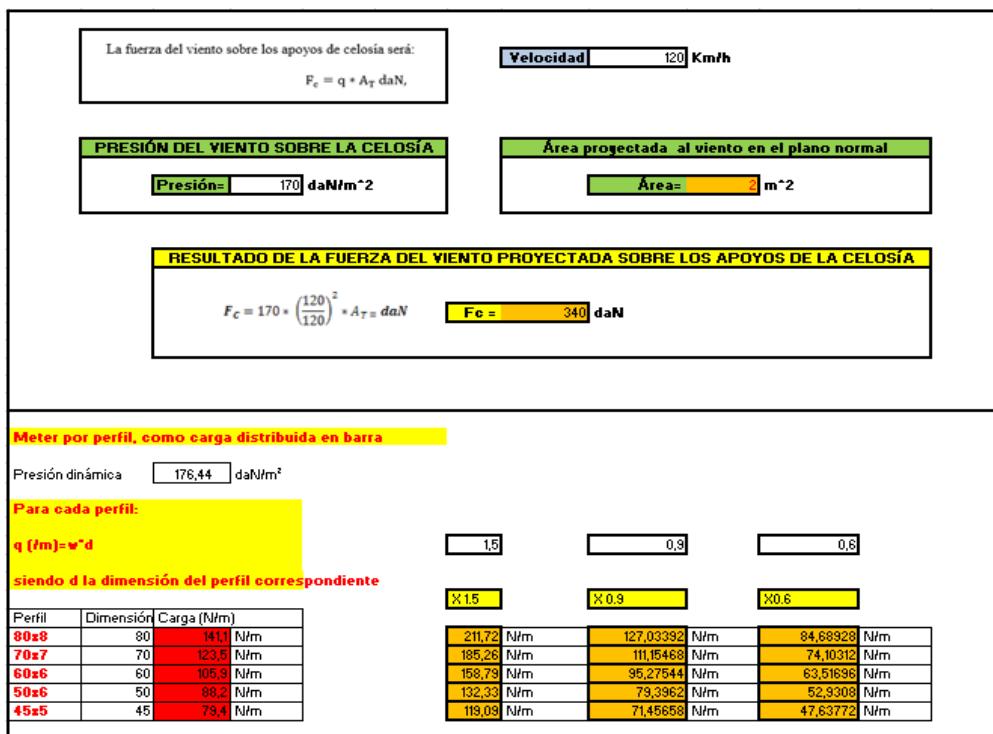


Figura 82. Cálculo del viento frontal sobre la estructura de la torre



### 3. CÁLCULO DE LOS MANGUITOS DE HIELO EN LOS CONDUCTORES

<p><b>4.1.2.4.2 Determinación de los manguitos de hielo.</b></p> <p>Los manguitos de hielo aumentan la fuerza del viento debido al incremento de la superficie expuesta. Por ello, es importante determinar el radio total, utilizando el peso volumétrico de 750 daN/m<sup>3</sup> facilitado por la normativa.</p> <p><b>Manguito de hielo sobre los conductores</b></p> <p><b>F<sub>he</sub></b> = 492,95 daN</p> <p><b>F<sub>hg</sub></b> = 284,60 daN</p> <p><b>Por lo que como resultado se obtiene un manguito de hielo del conductor de:</b></p> <p><b>M<sub>hc</sub></b> = 0,657 m<sup>3</sup></p> <p><b>Por lo que como resultado se obtiene un manguito de hielo del cable de guarda de:</b></p> <p><b>M<sub>hg</sub></b> = 0,379 m<sup>3</sup></p>	<p><b>Peso volumétrico</b> 750 daN/m<sup>3</sup></p> <p><b>Radio conductor</b> 15 mm</p> <p><b>Radio cable guarda</b> 5 mm</p> <p><b>Cálculo del radio del manguito de hielo + conductor</b></p> <p><b>R<sub>mc</sub></b> = 25,37 mm</p> <p><b>Cálculo del radio del manguito de hielo + cable de guarda</b></p> <p><b>R<sub>mc</sub></b> = 16,33 mm</p>
--	--

Figura 83. Cálculo de los manguitos de hielo sobre los conductores de la torre

### 4. CÁLCULO DE LAS CARGAS DE VIENTO SOBRE LOS CONDUCTORES CON SOBRECARGA DE HIELO

<p><math>F_c = q \times d \times \frac{a_1 + a_2}{2} \text{ daN}</math></p> <p>Siendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>d Diámetro del conductor en metros.</li> <li>a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> longitudes de los vanos adyacentes en metros. La semisuma de a<sub>1</sub> y a<sub>2</sub>, es el vano de viento o olovarno.</li> <li>q presión del viento.</li> </ul> <p>= 60 × <math>\left(\frac{V_v}{120}\right)^2</math> daN/m<sup>2</sup> para conductores de d ≤ 16 mm</p> <p>= 50 × <math>\left(\frac{V_v}{120}\right)^2</math> daN/m<sup>2</sup> para conductores de d &gt; 16 mm</p>	<p><b>Valores a introducir en la fórmula</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Principal</td> <td><b>Valor de d</b> 0,051 m</td> </tr> <tr> <td>Guarda</td> <td><b>Valor de d</b> 0,033 m</td> </tr> <tr> <td></td> <td><b>Velocidad</b> 120 km/h</td> </tr> <tr> <td></td> <td><b>Velocidad</b> 33,33 m/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td><b>Presión dinámica</b> N/m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td><math>\frac{a_1 + a_2}{2}</math></td> <td><b>Vano de:</b> 500 m</td> </tr> </table>	Principal	<b>Valor de d</b> 0,051 m	Guarda	<b>Valor de d</b> 0,033 m		<b>Velocidad</b> 120 km/h		<b>Velocidad</b> 33,33 m/s		<b>Presión dinámica</b> N/m <sup>2</sup>	$\frac{a_1 + a_2}{2}$	<b>Vano de:</b> 500 m
Principal	<b>Valor de d</b> 0,051 m												
Guarda	<b>Valor de d</b> 0,033 m												
	<b>Velocidad</b> 120 km/h												
	<b>Velocidad</b> 33,33 m/s												
	<b>Presión dinámica</b> N/m <sup>2</sup>												
$\frac{a_1 + a_2}{2}$	<b>Vano de:</b> 500 m												
<p><b>Valor de la presión del viento en daN/m dependiendo el diámetro del conductor</b></p> <table border="1"> <tr> <td><math>q = 60 \times \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \text{ daN/m}</math> para conductores de d ≤ 16 mm.</td> <td><math>q \rightarrow d &lt; 16 \text{ mm} = 60 \text{ daN/m}</math></td> </tr> <tr> <td><math>q = 50 \times \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \text{ daN/m}</math> para conductores de d &gt; 16 mm.</td> <td><math>q \rightarrow d &gt; 16 \text{ mm} = 50 \text{ daN/m}</math></td> </tr> </table>		$q = 60 \times \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \text{ daN/m}$ para conductores de d ≤ 16 mm.	$q \rightarrow d < 16 \text{ mm} = 60 \text{ daN/m}$	$q = 50 \times \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \text{ daN/m}$ para conductores de d > 16 mm.	$q \rightarrow d > 16 \text{ mm} = 50 \text{ daN/m}$								
$q = 60 \times \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \text{ daN/m}$ para conductores de d ≤ 16 mm.	$q \rightarrow d < 16 \text{ mm} = 60 \text{ daN/m}$												
$q = 50 \times \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \text{ daN/m}$ para conductores de d > 16 mm.	$q \rightarrow d > 16 \text{ mm} = 50 \text{ daN/m}$												
<p><b>Resultado de la fuerza del viento en los conductores</b></p> <table border="1"> <tr> <td><b>F<sub>cp</sub></b> = 1268,3 N</td> <td>Para conductores principales</td> <td><b>FC X 0,9</b> 1141,46432</td> <td><b>FC X 0,6</b> 760,976616 N</td> </tr> <tr> <td><b>F<sub>cg</sub></b> = 816,4 N</td> <td>Para conductores de guarda</td> <td>734,727023</td> <td>489,818015 N</td> </tr> </table>		<b>F<sub>cp</sub></b> = 1268,3 N	Para conductores principales	<b>FC X 0,9</b> 1141,46432	<b>FC X 0,6</b> 760,976616 N	<b>F<sub>cg</sub></b> = 816,4 N	Para conductores de guarda	734,727023	489,818015 N				
<b>F<sub>cp</sub></b> = 1268,3 N	Para conductores principales	<b>FC X 0,9</b> 1141,46432	<b>FC X 0,6</b> 760,976616 N										
<b>F<sub>cg</sub></b> = 816,4 N	Para conductores de guarda	734,727023	489,818015 N										

Figura 84. Cálculo del viento lateral con sobrecarga de hielo en los conductores de la torre



## 5. CÁLCULO DE LAS CARGAS DE VIENTO SOBRE LOS CONDUCTORES

<p>Siendo:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• <math>d</math> Diámetro del conductor en metros.</li><li>• <math>a_1, a_2</math> longitudes de los vanos adyacentes en metros. La semisuma de <math>a_1</math> y <math>a_2</math>, es el vano de viento o eolovano.</li><li>• <math>q</math> presión del viento.</li></ul> $F_c = q \times d \times \frac{a_1 + a_2}{2} \text{ daN}$ $= 60 \times \left(\frac{V_{c_0}}{120}\right)^2 \text{ daN/m}^2 \text{ para conductores de } d \leq 16 \text{ mm}$ $= 50 \times \left(\frac{V_{c_0}}{120}\right)^2 \text{ daN/m}^2 \text{ para conductores de } d > 16 \text{ mm}$	<p><b>Valores a introducir en la fórmula</b></p> <table border="1"><tr><td>Principal</td><td>Valor de <math>d</math></td><td>0,03 m</td></tr><tr><td>Guarda</td><td>Valor de <math>d</math></td><td>0,01 m</td></tr><tr><td></td><td>Velocidad</td><td>120 km/h</td></tr><tr><td></td><td>Velocidad</td><td>33,33 m/s</td></tr><tr><td></td><td>Presión dinámica</td><td>N/m<sup>-2</sup></td></tr><tr><td><math>\frac{a_1 + a_2}{2}</math></td><td>Vano de:</td><td>500 m</td></tr></table>	Principal	Valor de $d$	0,03 m	Guarda	Valor de $d$	0,01 m		Velocidad	120 km/h		Velocidad	33,33 m/s		Presión dinámica	N/m <sup>-2</sup>	$\frac{a_1 + a_2}{2}$	Vano de:	500 m
Principal	Valor de $d$	0,03 m																	
Guarda	Valor de $d$	0,01 m																	
	Velocidad	120 km/h																	
	Velocidad	33,33 m/s																	
	Presión dinámica	N/m <sup>-2</sup>																	
$\frac{a_1 + a_2}{2}$	Vano de:	500 m																	
<p><b>Valor de la presión del viento en daN/m dependiendo el diámetro del conductor</b></p> <table border="1"><tr><td><math>q = 60 \times \left(\frac{V_{c_0}}{120}\right)^2 \text{ daN/m}^2</math> para conductores de <math>d \leq 16 \text{ mm}</math>.</td><td><math>q \rightarrow d &lt; 16 \text{ mm} = 60 \text{ daN/m}</math></td></tr><tr><td><math>q = 50 \times \left(\frac{V_{c_0}}{120}\right)^2 \text{ daN/m}^2</math> para conductores de <math>d &gt; 16 \text{ mm}</math>.</td><td><math>q \rightarrow d &gt; 16 \text{ mm} = 50 \text{ daN/m}</math></td></tr></table>	$q = 60 \times \left(\frac{V_{c_0}}{120}\right)^2 \text{ daN/m}^2$ para conductores de $d \leq 16 \text{ mm}$ .	$q \rightarrow d < 16 \text{ mm} = 60 \text{ daN/m}$	$q = 50 \times \left(\frac{V_{c_0}}{120}\right)^2 \text{ daN/m}^2$ para conductores de $d > 16 \text{ mm}$ .	$q \rightarrow d > 16 \text{ mm} = 50 \text{ daN/m}$															
$q = 60 \times \left(\frac{V_{c_0}}{120}\right)^2 \text{ daN/m}^2$ para conductores de $d \leq 16 \text{ mm}$ .	$q \rightarrow d < 16 \text{ mm} = 60 \text{ daN/m}$																		
$q = 50 \times \left(\frac{V_{c_0}}{120}\right)^2 \text{ daN/m}^2$ para conductores de $d > 16 \text{ mm}$ .	$q \rightarrow d > 16 \text{ mm} = 50 \text{ daN/m}$																		
<p><b>Resultado de la fuerza del viento en los conductores</b></p> <table border="1"><tr><td><math>F_{cp} = 750 \text{ N}</math></td><td>Para conductores principales</td></tr><tr><td><math>F_{cg} = 300 \text{ N}</math></td><td>Para conductores de guarda</td></tr></table>	$F_{cp} = 750 \text{ N}$	Para conductores principales	$F_{cg} = 300 \text{ N}$	Para conductores de guarda	<table border="1"><tr><td>FC X 1,5</td><td>FC X 0,9</td><td>FC X 0,6</td></tr><tr><td>1125</td><td>675</td><td>450 N</td></tr><tr><td>450</td><td>270</td><td>180 N</td></tr></table>	FC X 1,5	FC X 0,9	FC X 0,6	1125	675	450 N	450	270	180 N					
$F_{cp} = 750 \text{ N}$	Para conductores principales																		
$F_{cg} = 300 \text{ N}$	Para conductores de guarda																		
FC X 1,5	FC X 0,9	FC X 0,6																	
1125	675	450 N																	
450	270	180 N																	

Figura 85. Cálculo del viento lateral sobre los conductores de la torre sin sobrecarga de hielo

## ANEXO 6: CÁLCULO DEL CABLEADO TIPO CATENARIA.

Los cálculos presentados en este apartado, se basan en los desarrollos presentados en [16]. Un cable sometido a una carga distribuida a lo largo de toda su longitud, presenta como configuración de equilibrio una curva denominada catenaria, cuya ecuación viene definida por:

$$y - y_0 = \frac{K}{p} * Ch * \left[ \frac{p}{K} * (x - x_0) \right] \quad (1)$$

Donde  $p$  es el valor de la carga distribuida,  $y$   $K$ ,  $x_0$  e  $y_0$ , son los parámetros que deben ajustarse según la geometría del cable.

Para un cable anclado en ambos extremos al mismo nivel, se tendría la configuración de la figura siguiente:

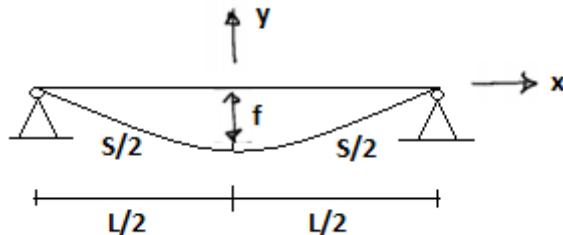


Figura 86. Esquema del cable de una torre de tipo catenaria

Imponiendo las condiciones a la ecuación (1), resulta:

$$X = -\frac{L}{2} \rightarrow y = 0 \rightarrow -y_0 = \frac{K}{p} * Ch * \left[ \frac{p}{K} * \left( -\frac{L}{2} - X_0 \right) \right]; \quad (2a)$$

$$X = \frac{L}{2} \rightarrow y = 0 \rightarrow -y_0 = \frac{K}{p} * Ch * \left[ \frac{p}{K} * \left( \frac{L}{2} - X_0 \right) \right]; \quad (2b)$$

$$X = 0 \rightarrow y = -f \rightarrow -f - y_0 = \frac{K}{p} * Ch * \left[ \frac{p}{K} * (-X_0) \right]; \quad (2c)$$

De las dos primeras ecuaciones, se tiene que:

$$Ch * \left[ \frac{p}{K} * \left( -\frac{L}{2} - X_0 \right) \right] = Ch * \left[ \frac{p}{K} * \left( \frac{L}{2} - X_0 \right) \right]$$

Como el  $Ch$  es una función por:

$$Ch * \left[ \frac{p}{K} * \left( -\frac{L}{2} - X_0 \right) \right] = Ch * \left[ \frac{p}{K} * \left( \frac{L}{2} + X_0 \right) \right]$$

Y por lo tanto:

$$Ch * \left[ \frac{p}{K} * \left( \frac{L}{2} + X_0 \right) \right] = Ch * \left[ \frac{p}{K} * \left( \frac{L}{2} - X_0 \right) \right]$$



Ese decir:

$$\frac{L}{2} + X_0 = \frac{L}{2} - X_0$$

De donde:

$$X_0 = 0$$

Y la ecuación (2c) queda como:

$$-f - y_0 = \frac{K}{p}; \quad (3)$$

También se puede llegar al mismo resultado considerando la pendiente de la curva:

$$y' = Sh * [\frac{p}{K} * (x - x_0)]$$

De forma que debe cumplirse la ecuación:

$$X = 0 \rightarrow y' = 0 \rightarrow 0 = Sh * [\frac{p}{K} * (-x_0)]$$

Y por tanto:

$$X_0 = 0$$

Se precisa una ecuación adicional para resolver el problema.

Se impone la restricción correspondiente a la longitud del cable:

$$S = \int_{-L/2}^{L/2} ds = \int_{-L/2}^{L/2} \sqrt{(ds)^2 + (dy)^2} = \int_{-L/2}^{L/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

Por tanto:

$$\begin{aligned} S &= \int_{-L/2}^{L/2} \sqrt{1 + (y')^2} dx = \int_{-L/2}^{L/2} \sqrt{1 + Sh^2 * \left(\frac{p}{K} * x\right)} dx = \\ &= \int_{-L/2}^{L/2} Ch * \left(\frac{p}{K} * x\right) dx = \frac{K}{p} * Sh * \left(\frac{p}{K} * x\right) \Big|_{-L/2}^{L/2} = \\ &= \frac{K}{p} * \left[Sh * \left(\frac{p}{K} * \frac{L}{2}\right) - Sh * \left(-\frac{p}{K} * \frac{L}{2}\right)\right] = 2 * \frac{K}{p} * Sh * \left(\frac{p}{K} * \frac{L}{2}\right) \end{aligned}$$

Se tiene finalmente:

$$2 * \frac{K}{p} * Sh * \left(\frac{p}{K} * \frac{L}{2}\right) = S$$



Y reordenando:

$$f * \left(\frac{p}{K}\right) = Sh * \left(\frac{p}{K} * \frac{L}{2}\right) - \frac{p}{K} * \frac{S}{2} = 0 ;(4)$$

Se trata de una ecuación trascendente, sin solución analítica por lo que debe resolverse mediante métodos numéricos (Newton- Raphson).

De la ecuación (4), se obtiene el valor de  $\frac{p}{K}$ , de las ecuaciones (2a) ó (2b), se obtiene entonces el valor de  $y_0$ ; finalmente de la ecuación (3) se obtiene el valor de f.

Por lo que respecta a la tracción en el cable, la ecuación correspondiente es:

$$N \frac{dx}{ds} = N *= K$$

Siendo  $\theta_x$  el valor de la componente horizontal de la tangente a la curva del cable en cada punto (el coseno del ángulo que forma la tangente en cada punto con la horizontal). Por tanto:

$$N * \cos \theta = K$$

Es decir, la proyección horizontal de la tracción en el cable es igual en todos los puntos (constante), y equivale al parámetro K de la ecuación de la curva de equilibrio del cable. Por tanto:

$$N = \frac{K}{\cos \theta}$$

Alcanzando el valor máximo en los extremos, y el mínimo en el vértice del cable ( $\cos \theta = 1$ ). El ángulo en cada punto se calcula como:

$$\theta = \arctg [Sh * (\frac{p}{K} * x)]$$

