

AUTOMATIZACIÓN DEL DISEÑO DE TORRES

Salvador Merino Córdoba y Manuel Ojeda Aciego

Dpto.de Matemática Aplicada

Universidad de Málaga

smerino@uma.es - aciego@ctima.uma.es

Resumen

En este trabajo se presenta la formalización de un sistema de cálculo, diseño y fabricación de torres metálicas de transmisión eléctrica, cuyo desarrollo e implementación combina distintas herramientas matemáticas tales como el método de los elementos finitos, algoritmos de optimización o la resolución de grandes sistemas de ecuaciones, así como de las correspondientes técnicas de ingeniería del software.

Abstract

The formalisation of a system of calculation, design and fabrication of steel towers for electric transmission is presented. In its development and implementation several mathematical techniques such as the finite elements analysis, optimisation algorithms, or method for solving large equation systems are combined, as well as the corresponding techniques in software engineering.

1. INTRODUCCIÓN

La primera vez que se pensó en el uso de una estructura metálica para transmisión de electricidad entre las fuentes de producción y los usuarios finales fue a principios del siglo XX, cuando algunas empresas suizas intentaron aprovechar los postes metálicos que sobraban de los ferrocarriles italianos. Desde su origen, las estructuras metálicas debieron competir con los apoyos construidos en hormigón, con los que hoy en día aún coexisten.

Desde el punto de vista económico, el apoyo de hormigón tiene la ventaja de ser más barato, pero su duración en el tiempo es menor y su peso bastante mayor, lo que lo hace más difícil de colocar en zonas montañosas, p.ej. España. Por ello se ha tendido a la construcción de torres de barras de acero galvanizadas y atornilladas entre sí, que permiten ser transportadas por piezas y montadas *in situ*.

En la actualidad es por todos conocida la importancia estratégica que tiene para cada país la producción, el transporte y la distribución de la energía eléctrica. Esto justifica que las empresas de este sector estén actualmente muy interesadas en todos los procedimientos de mejora de la calidad y disminución de costes.

Para entender de forma clara en qué puntos mejoramos el diseño estructural, recorreremos aquellas fases de la construcción de una línea de transmisión en la que hemos trabajado:

Realización del proyecto para concurso : Para competir en ellos es necesario tomar el tipo de torres elegido por el cliente, parametrizarlo e introducirlo en un modelo matemático, junto con sus cargas de cables, condiciones de viento, nieve, terremotos, etc., e ir buscando aquella estructura que, cumpliendo con todos los requisitos técnicos, tenga un mínimo de peso o un menor coste en el material a usar (ambas cosas suelen ir en paralelo).

Nuestra aportación realizada en esta fase es el desarrollo de utilidades que, a partir del mínimo número de datos necesario, pueden realizar el diseño y cálculo de las estructuras y tener la suficiente versatilidad para poder modificar y recalculas los resultados de una forma rápida y precisa.

Concesión de obra : aquella empresa o grupo adjudicatario del concurso debe realizar los planos de construcción, detalles de fábrica, diseño de cada pieza, minimización del material a usar y plan de erección de las torres y fundaciones en el subsuelo. A partir de todo ello, se construye un prototipo elegido por el cliente de cada una de las diferentes torres que entran en juego y se ensaya a escala real.

Se han creado tanto unas bibliotecas de técnicas geométricas necesarias (cálculo de interferencias, distancias, diseño de sólidos en el espacio, estudio de cortes, etc.) como un sistema que, a partir de los datos obtenidos en el cálculo, define los planos de fabricación, estudia cada una de las piezas que componen las torres, clasifica estos materiales, ve cómo poder realizar un mejor aprovechamiento de los mismos (optimización) y expone todos estos resultados para facilitar en lo posible la fabricación de las estructuras.

Aprovechamiento de torres ya ensayadas : en muchos casos es posible que algunas torres ya fabricadas y almacenadas puedan ser adaptadas a una nueva línea de transmisión. En estos casos es conveniente comprobar si las mismas satisfacen las condiciones de carga y seguridad en el nuevo entorno. Con ello se ahorrarían todos los costes, tanto económicos como temporales, de diseño y fabricación.

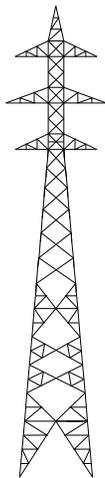
Para esta fase se han desarrollado técnicas informáticas que permiten verificar las estructuras ya existentes. Los resultados que existían en este campo eran bastante teóricos y hacían excesivo uso del tanteo y de la experiencia a la hora de elegir las piezas que pudieran poner en peligro una antigua estructura en un nuevo entorno. Haciendo ahora uso de las herramientas que aquí presentamos, se puede generar el estudio de todas y cada una de las barras de la torre y así, mediante un sencillo algoritmo de búsqueda encontrar aquellas condiciones y piezas que limitan la utilización de las estructuras.

2. CÁLCULO DE ESTRUCTURAS

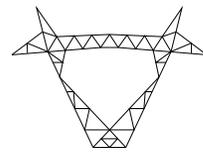
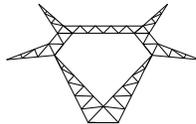
El esquema de trabajo del sistema interactivo de cálculo, diseño y fabricación de torres de transmisión eléctrica que describimos aparece en la ilustración 1.

Respecto a la modelización y el cálculo de estructuras, nos encontramos con que existen cuatro modelos diferentes de torres:

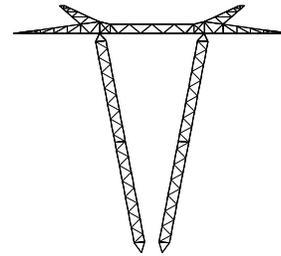
- 1. Torres Piramidales (en el gráfico aparece la torre completa)
 - 2. Torres de Ventana o Delta (vemos solo la cabeza, el cuerpo es similar a la piramidal)
 - 3. Torres Cara de Gato (como en la delta, solo hemos presentado la cabeza)
 - 4. Torres Atirantadas (gráfico de torre completa)
-



Torre Piramidal

Cabeza de torre de Ventana
o Delta

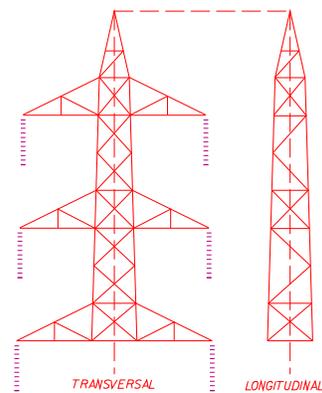
Cabeza de torre Cara de Gato



Torre Atirantada

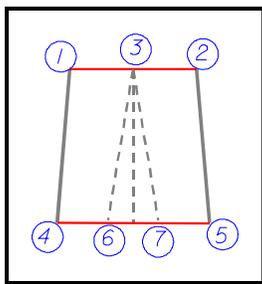
Por lo que respecta a la cantidad de información necesaria para representar cada una de estas torres, se han distinguido aquellos datos comunes a todas, al conjunto formado por las tres primeras o las características particulares. Puesto que las torres están formadas por cuatro caras iguales dos a dos, solo hemos de solicitar la información de dos caras distintas. A estas caras las llamaremos *Transversal* (perpendicular a la propia línea de transporte de electricidad) y *Longitudinal* (paralela a esta línea)

A título de ejemplo presentamos a continuación los diferentes tipos de paneles junto con su correspondiente descripción, así como la estructura de datos utilizada en su implementación. De manera semejante se tratan las restantes subestructuras que componen las torres (recuadros, secundarios, crucetas, etc.)



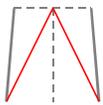
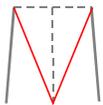
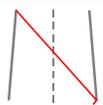
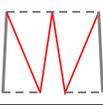
Nomenclatura de las caras

TIPOS DE PANELES

Numeración de
nudos

Para describir los distintos tipos de paneles numeramos los vértices y puntos principales del 1 al 7 como se indica en la figura de la izquierda: obsérvese que los vértices 1,2,4 y 5 conforman los cuatro vértices de un trapecio. El punto 3 está en el centro de la base superior, los puntos 6 y 7 de la base inferior son distintos solo si el panel inferior a aplicar corresponde a una pata común.

Veamos cada uno de los distintos tipos de paneles:

Tipo Panel	Gráfico	Nº de Barras	Descripción
1		2	Barra 1: Entre 1 y 5 Barra 2: Entre 2 y 4
2		2	Barra 1: Entre 3 y 5 Barra 2: Entre 3 y 4
3		2	Barra 1: Entre 1 y 6 Barra 2: Entre 2 y 6
4		1	Entre 1 y 5 para paneles de lugar par Entre 2 y 4 para paneles de lugar impar
5		4	Barra 1: Entre 1 y 6 Barra 2: Entre 6 y 3 Barra 3: Entre 3 y 7 Barra 4: Entre 7 y 2

Type Panel

Tramo as integer
 Tipo as integer
 AlturaSuperior as double
 AnchoSuperior as double
 AlturaInferior as double
 AnchoInferior as double
 Relleno as integer
 End type

El tipo de dato “Panel” se define mediante la estructura que podemos observar en el recuadro de la izquierda. A partir de las especificaciones técnicas de cada tipo de torre se obtiene un modelo computacional sobre el que se aplica el método de los elementos finitos para crear la matriz de rigidez de la torre.

El principal problema matemático que se plantea en este contexto es la resolución del gigantesco sistema de ecuaciones resultante; para tal fin se ha tratado previamente el problema de la numeración de los nudos para la minimización de ancho de banda.

El heurístico para numerar los nudos consiste en aplicar la ordenación: derecha-izquierda, atrás-adelante, arriba-abajo (aunque no necesariamente es el más adecuado en otro tipo de estructuras como pórticos, puentes, edificios, etc.). El pseudocódigo del algoritmo de cálculo de barras sería el siguiente:

```

TopologiaEstructura (Nudos() as nudo, Barras() as barra)
SeccionesIniciales (Barras() as barra)
VientoInicial=0 : VientoFinal = CalculoViento (Barras() as barra)
While (ABS(VientoInicial-VientoFinal)>5%)
  CalculoDesplazamientos (Nudos() as nudo, Barras() as barra, Cargas() as carga,
  Desplazamientos() as desplazamiento)
  CalculoFuerzas (Barras() as Barra, Desplazamientos() as Desplazamiento,
  Fuerzas() as fuerza)
  CalculoReacciones (Nudos() as nudo, Barras() as barra, Cargas() as carga,
  Desplazamientos() as desplazamiento, Reacciones() as reaccion)
  CalculoBarras (Barras() as barra, Fuerzas() as fuerza)
  VientoInicial = VientoFinal : VientoFinal = CalculoViento (Barras() as barra)

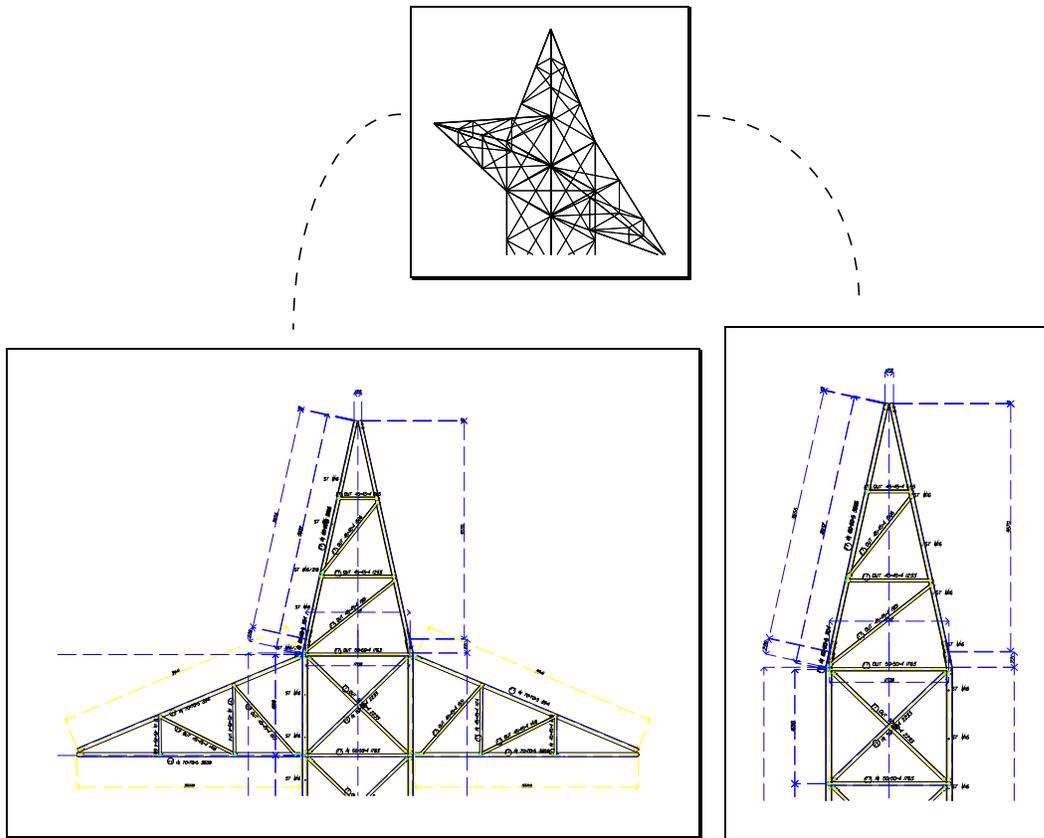
```

Wend

CalculoBarras (Barras() as barra, Fuerzas() as fuerza)

3. PLANOS DE FABRICACIÓN

Obsérvese que la estructura está formada por figuras tronco-piramidales superpuestas, cuyas caras planas tienen diferentes pendientes respecto al plano del suelo. Para pasar esta estructura a un plano, se debe ir desarrollando el estudio desde arriba hasta abajo de la torre como si anduviésemos por sus fachadas.



En este estadio, el procedimiento clásico de diseño de planos se apoya en la habilidad de los delineantes para el posicionamiento de las barras en el dibujo de fabricación y la determinación de los gramiles para colocar los tornillos de unión. Por ello nos planteamos una sistematización de este procedimiento que estudiase todos los casos posibles y eligiese la solución más favorable.

En particular, el problema que resolvemos en este punto es el cálculo de la posición de los gramiles sobre las barras exteriores (o montantes) de la torre.

Generamos para ello, en cada unión de diagonales a montante, el siguiente árbol lógico:

Tornillo 1		
Gramil 1 mínimo Provoca que el diagonal interno vaya cortado para no solapar la curva del montante	Tornillo 2 Alto	Tornillo 3 Alto
	Gramil diagonal mínimo	Gramil diagonal mínimo
	Gramil diagonal medio	Gramil diagonal medio
	Gramil diagonal máximo	Gramil diagonal máximo
	Tornillo 2 Bajo	En el 2º gramil del montante hay sitio para 2 tornillos
Gramil 1 normal El diagonal interno se aleja tanto como fuere necesario para no necesitar corte	Gramil diagonal mínimo (con corte del otro diagonal o sin él)	Tornillo 3 Bajo
	Gramil diagonal medio (con corte del otro diagonal o sin él)	Gramil diagonal mínimo
	Gramil diagonal máximo (con corte del otro diagonal o sin él)	Gramil diagonal medio
		Gramil diagonal máximo
		En el 2º gramil del montante hay sitio para 2 tornillos

Si siguen quedando tornillos sin colocar sobre el montante, duplicamos posiciones en 2 y 3. Al ser algunas de estas condiciones excluyentes entre sí (p.ej. si no cabe el segundo tornillo alto en el gramil máximo, no miraremos si el tercero lo hace) tenemos una cantidad total de posibilidades distintas de 196. De ellas se escoge el conjunto de las que más tornillos introducen dentro del montante y, de este conjunto, la menos penalizada (la que requiere menos operaciones externas a las propias máquinas de control numérico). La razón de escoger soluciones que tengan el mayor número de tornillos sobre el montante es la minimización del número de piezas de la estructura (menos chapas). De lo anterior se deduce que el número de cálculos necesario estudiar en el peor caso es de 196 x Paneles x Caras.

Todos los pasos necesarios para la creación de los planos de fabricación quedan recogidos en el siguiente algoritmo:

CalculoDesplazamiento(Desplazamiento) EntradaFactoresSeguridad (Seguridad() as Seguridades) DiseñoGramiles (Barra() as Barras) DiseñoMontantes (Barra() as Barras, Chapa() as Chapas, Archivo) DiseñoRecuadros (Barra() as Barras, Chapa() as Chapas, Archivo) DiseñoDiagonales (Barra() as Barras, Chapa() as Chapas, Archivo) DiseñoSecundarios (Barra() as Barras, Chapa() as Chapas, Archivo) DiseñoInternos (Barra() as Barras, Chapa() as Chapas, Archivo) DiseñoCruceas (Barra() as Barras, Chapa() as Chapas, Archivo) CompresiónDatos (Barra() as Barras, Chapa() as Chapas, Archivo) InterferenciasEspaciales (Barra() as Barras, Archivo) CreaciónPeldaños (Barra() as Barras, Archivo) ClasificaciónMaterial (Archivo) DiseñoPlanos (Archivo) ContabilizaciónTornillos (Archivo)
--

4. CÁLCULO INVERSO

En el campo de las torres ocurre frecuentemente que, transcurrido el tiempo, es necesario actualizar el tipo de conductor usado (puede haberse quedado anticuado el que tenía, no fabricarse ya ese modelo o desear la instalación de un cable con alma de fibra óptica para

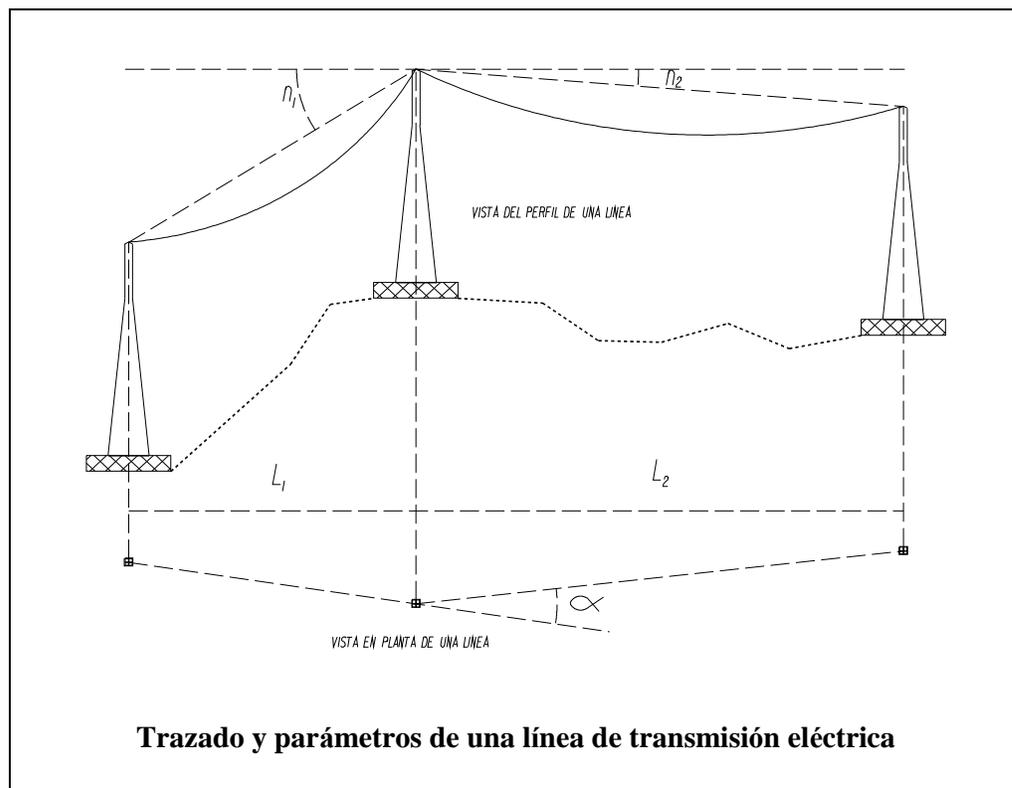
comunicaciones) o modificar levemente el trazado de la línea (por razones de nuevas expropiaciones, crecimiento de las poblaciones, etc.)

Evidentemente no tendríamos ningún problema en resolver esta situación realizando un nuevo proyecto y calculando y fabricando nuevas torres. Pero habitualmente estos cambios en la línea pueden venir acompañados de :

- Brevedad de tiempo para realizar el cambio del tendido
- Existencia de torres iguales en el almacén
- Mayor ahorro económico si utilizamos la torre que ya hay

Por tanto se nos plantea una situación nueva: ¿cómo sabemos qué tipos de modificaciones pueden resistir las torres y cuáles serían sus límites? No se trata pues del chequeo de una estructura donde se cambian las cargas, sino entre qué límites pueden trabajar sin precisar de nuevos materiales.

Observemos en el siguiente gráfico las características en el trazado de una línea:



Definimos para cada torre las siguientes variables:

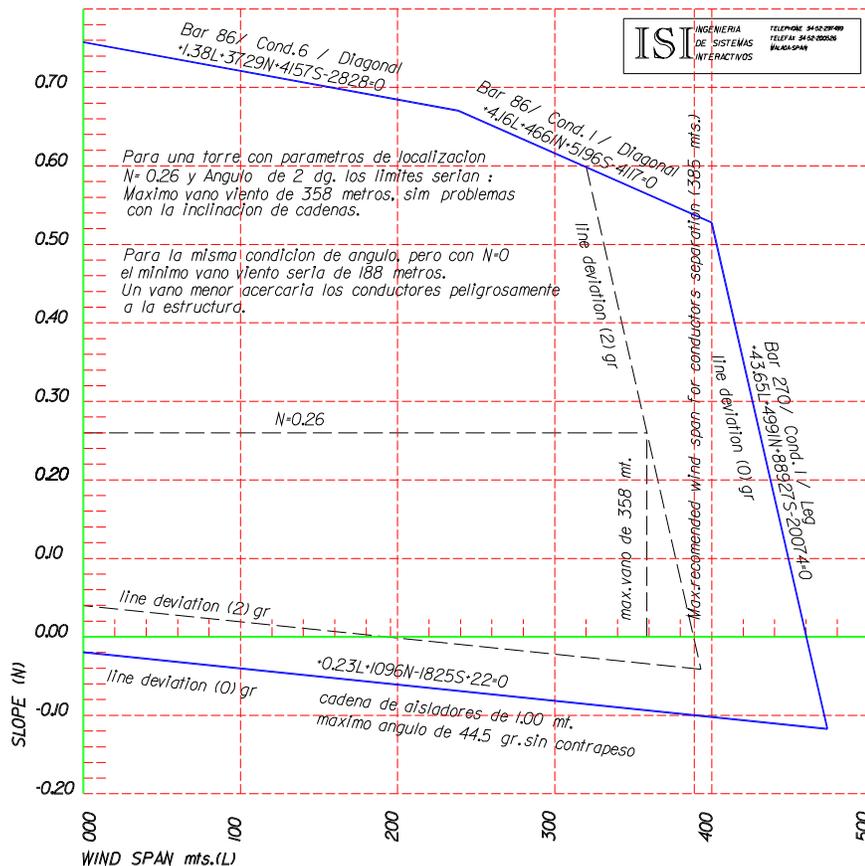
- $L = \frac{L_1 + L_2}{2}$, llamada *Vano Viento*. Es la media aritmética de los vanos laterales de la torre.
- $N = \text{tg}(n_1) + \text{tg}(n_2)$, es la suma de las tangentes de la desviación vertical de la línea, debida a las irregularidades de nivel del terreno

- $S = 2 \operatorname{sen}\left(\frac{a}{2}\right)$, define la desviación horizontal de la línea y se debe al hecho de no poder situar las torres en línea recta (visto en planta) por la existencia de algún obstáculo.

El cálculo inverso permite representar de manera uniforme todas las piezas de una estructura y establecer los límites de resistencia de la misma. Para ello se ha demostrado que todos los esfuerzos externos transmitidos a un apoyo, para un conductor, zona y condiciones de tendido determinadas, son funciones lineales de las magnitudes que hemos designado por L, N y S.

REPRESENTACIÓN MEDIANTE DIAGRAMAS DE UTILIZACIÓN

Tras clasificar adecuadamente los datos obtenemos un diagrama del siguiente tipo, donde podemos apreciar cómo las gráficas de las ecuaciones de las barras (en negrita) marcan los límites de colocación de la torre (realmente los diagramas deben ser tridimensionales, ya que sus ecuaciones representan planos, pero se representan las curvas de nivel para $S=0$, o cualquier otro valor de S preestablecido):



5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un esbozo de la sistematización y formalización de un sistema de cálculo, diseño y fabricación de torres metálicas de transmisión eléctrica, en cuyo

desarrollo e implementación se han combinado distintas herramientas matemáticas y técnicas de ingeniería del software.

Los resultados aquí expuestos se han implementado y el programa resultante ha sido aplicado con éxito en el desarrollo de decenas de proyectos, posteriormente comprobados a escala real en estaciones de ensayos homologadas.

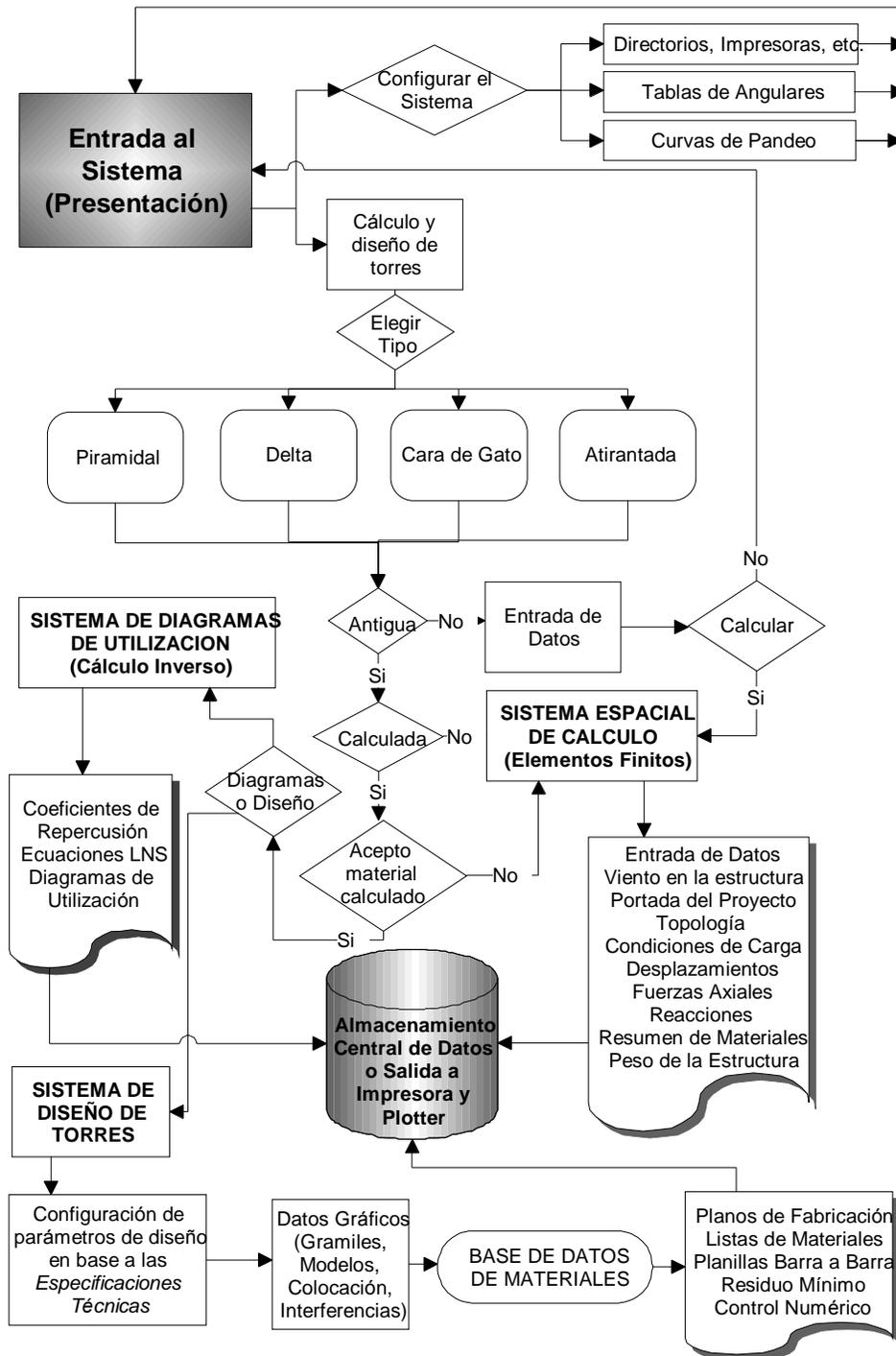


Ilustración 1: Sistema de Cálculo de Torres

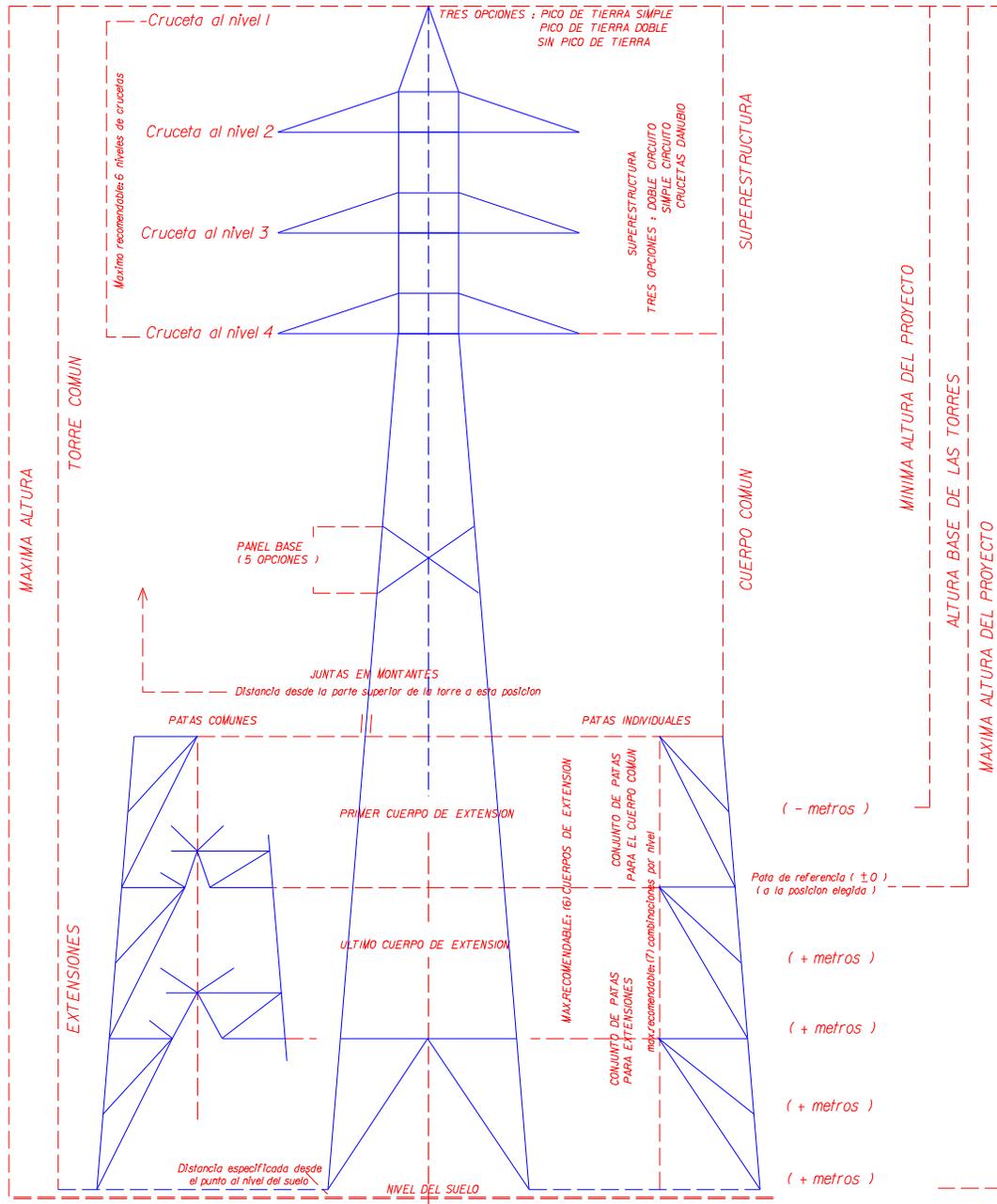


Ilustración 2: Nomenclatura de Torres