

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

CENTRO POLITECNICO SUPERIOR
INGENIERIA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

1/3 MEMORIA

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA ESTRUCTURA Y
ELEMENTOS DE GRUAS TORRE SIN PINÁCULO.

AUTOR: DIEGO PEREZ GARCIA
DIRECTOR: LUIS CASTEJON
DEPARTAMENTO: INGENIERIA MECANICA I.I.T.

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA ESTRUCTURA Y ELEMENTOS DE GRUAS TORRE SIN PINÁCULO.

RESUMEN

Tal y como se indica en su título, el presente proyecto consiste en la realización de un programa informático para el cálculo de una gama de grúas torre sin pináculo de características variables: Altura, longitud y carga en punta de pluma.

Para su realización se emplearán dos lenguajes de programación: Visual Basic y MatLab.

El primero de ellos se usará para el cálculo y dimensionamiento de todos los elementos necesarios para el funcionamiento de la grúa: Gancho, poleas, cable, tambor, motor... de los mecanismos de elevación, traslación y orientación.

Una vez definidos esos elementos, se utilizará MatLab para la realización del cálculo estructural de la grúa y su deformada, aplicando para ello las teorías del cálculo matricial, gracias a la gran potencia de MatLab para realizar operaciones con vectores y matrices.

También se utilizará Visual Basic para la programación del interfaz de usuario del programa.

ÍNDICE

MEMORIA

1. INTRODUCCION	10
1.1 OBJETO DEL PROYECTO	10
1.2 DESCRIPCION DEL PROYECTO	10
1.2.1 Mecanismos	10
1.2.2 Estructura	11
1.2.3 Características	11
1.2.4 Ventajas	12
2. CÁLCULO MATRICIAL	13
2.1 INTRODUCCION	13
2.2 FUNDAMENTOS DEL CÁLCULO MATRICIAL	13
2.2.1 Modelo monodimensional de barras	13
2.2.2 Método directo de rigidez	14
2.2.3 Vectores de desplazamientos y de fuerzas	15
2.2.4 Matriz de rigidez de una barra en locales	16
2.2.5 Transformación de coordenadas	18
2.2.6 Matriz de rigidez de una barra en globales	18
2.2.7 Síntesis de la matriz de la estructura	19
2.2.8 Desplazamientos y reacciones	20
2.2.9 Esfuerzos en las barras	21
2.3 RESUMEN Y CONSIDERACIONES FINALES	21
3. CONFIGURACION DE LA ESTRUCTURA	22
3.1 INTRODUCCION	22
3.2 CONFIGURACION DE LA PLUMA Y CONTRAPLUMA	22
3.2.1 Descripción de la estructura	22
3.2.2 Módulo 0	22
3.2.3 Módulo 1	25
3.2.4 Módulo 2	27
3.2.5 Módulo 3	29
3.2.6 Módulo 4	31
3.2.7 Módulo 5	33
3.2.7 Módulo 6	35
3.3 CONFIGURACION DE LA TORRE	37
3.3.1 Descripción de la estructura	37
3.3.2 Módulo 7	37
3.4 CONSIDERACIONES FINALES	39
3.4.1 Cálculo mediante Matlab	39
3.4.2 Comprobación mediante Microsoft Excel	39
4. CÁLCULO DE LAS HIPOTESIS DE CARGA	40
4.1 DEFINICION DE LAS CARGAS DE LA GRUA	40
4.1.1 Clasificación de la grúa	40
4.1.2 Tipos de cargas	40
4.2 CÁLCULO DE LAS CARGAS	41
4.2.1 Solicitaciones a considerar	41
4.2.2 Caso I: Aparato en servicio sin viento	41
4.2.3 Caso II: Aparato en servicio con viento	42
4.2.4 Caso III: Aparato sometido a solicitudes excepcionales	42
4.3 CARGAS DE LAS SOLICITACIONES PRINCIPALES	43
4.3.1 Peso propio de la grúa	43

4.3.2 Peso de la carga de servicio	43
4.3.3 Peso del lastre	43
4.4 CARGAS DEL VIENTO	44
4.4.1 Condiciones del viento	44
4.4.2 Coeficiente de forma	44
4.4.3 Coeficiente de efecto de pantalla.....	45
4.4.4 Cargas producidas por el viento de servicio.....	46
4.4.5 Cargas producidas por el viento fuera de servicio.....	47
4.5 HIPOTESIS ADOPTADAS	48
5. PROGRAMA EN MATLAB	49
5.1 INTRODUCCION.....	49
5.1.1 Matlab.....	49
5.1.2 Origen del Matlab	49
5.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA	50
5.2.1 Introducción.....	50
5.2.2 Consideraciones iniciales	50
5.2.3 Definición de una barra	50
5.2.4 Matriz de rigidez de una barra en globales.....	51
5.2.5 Definición de un módulo	51
5.2.6 Matriz de rigidez de cada módulo	51
5.2.7 Matriz de rigidez de la pluma	53
5.2.8 Valores variables de los perfiles de la pluma	54
5.2.9 Cálculo de libertades y reacciones de la pluma.....	56
5.2.10 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis I de la pluma.....	56
5.2.11 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis II de la pluma.....	57
5.2.12 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis III de la pluma	57
5.2.13 Cálculo de los desplazamientos y las reacciones de la pluma.....	58
5.2.14 Cálculo de los esfuerzos en las barras de la pluma.....	58
5.2.15 Cálculo resistente de las barras de la pluma	58
5.2.16 Matriz de rigidez de la torre	59
5.2.17 Valores de los perfiles, libertades y reacciones de la torre.....	60
5.2.18 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis I de la torre	60
5.2.19 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis II de la torre	60
5.2.20 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis III de la torre.....	60
5.2.21 Desplazamientos, reacciones y esfuerzos en las barras de la torre.....	61
5.2.23 Cálculo resistente de las barras de la torre	61
5.2.24 Dibujo de la deformada de la grúa.....	61
5.2.25 Pasos finales	62
5.3 FUNCIONES DESARROLLADAS	62
5.3.1 Árbol genealógico del programa	62
5.3.2 function [Result] = grua(a,P,Q,H,T,G,def1,def2,def3);	64
5.3.3 function [p,d,R,Lastre,PP,PCP,t,z] = pluma(a,P,Q,G);	64
5.3.4 function [ch,cm,cu] = perfiles(p);.....	65
5.3.5 function [p] = perfilesch(d,e);.....	65
5.3.6 function [p] = profilescm(d);	65
5.3.7 function [p] = profilescu(L,e);	65
5.3.8 function [K,n] = matrizglobal(a,ch,cm,cu,union);.....	65
5.3.9 function [n] = barras(a);.....	65
5.3.10 function [n] = barras_X;	65
5.3.11 function [K] = composicion3d(n,ch,cm,cu);	65

5.3.12 function [K] = matrizg3d(n,ch,cm,cu);.....	65
5.3.13 function [K] = matrizl3d(n,ch,cm,cu);	65
5.3.14 function [R0] = cambio3d(n);.....	65
5.3.15 function [K] = componer3d(K,k,a,b);.....	65
5.3.16 function [K] = unionK(K1,K2,union);	65
5.3.17 function [n] = unionN(n1,n2);	65
5.3.18 function [v,d,R,r,l] = hipoI(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,G,z);.....	65
5.3.19 function [PV,Lastre,PP,PCP] = cargaselementos(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,z,G) 65	65
5.3.20 function [S] = esfuerzos(n,d,ch,cm,cu);	65
5.3.21 function [v] = vonmisses(n,S,ch,cm,cu,z);	65
5.3.22 function [w] = pandeo(L);	65
5.3.23 function [v,d,R] = hipoII(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,G,r,l,z);	65
5.3.24 function [Pviento] = cargasviento(K,n,a,ch,cm,cu,p,v);.....	65
5.3.25 function [Pviento] = viento_X(n,ch,cm,cu,p,v,Pviento);	65
5.3.26 function [v,d,Lastre,PP,PCP,R] = hipoIII(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,r,l,z);	65
5.3.27 function [p,d,PT,a] = torre(H,R,t,G);.....	65
5.3.28 function [v,d] = hipotorreI(K,n,a,ch,cm,cu,P,G);.....	65
5.3.29 function [PV,PT] = cargastorre(K,n,ch,cm,cu,P,G);	65
5.3.30 function [v,d] = hipotorreII(K,n,a,ch,cm,cu,P,G);.....	65
5.3.31 function [v,d,PT] = hipotorreIII(K,n,a,ch,cm,cu,P);	65
5.3.32 function [Result] = modificar(p,p2,d,d2,R,Lastre,PP,PCP,PT);	65
5.3.33 function [h] = deformada(a,a2,d,d2,z,color);	65
5.3.34 function [h] = deformada_X(t,pX,pY,X,Y,Z,color);.....	65
6. CÁLCULO DE LOS MECANISMOS.....	65
6.1 INTRODUCCION.....	65
6.1.1 Generalidades	65
6.1.2 Clasificación	65
6.2 MECANISMO DE ELEVACION	65
6.2.1 Gancho.....	65
6.2.2 Aparejo	65
6.2.3 Cable.....	65
6.2.4 Poleas.....	65
6.2.5 Tambor	65
6.2.6 Motor	65
6.2.7 Freno	65
6.2.8 Reductor	65
6.2.9 Acoplamiento	65
6.3 MECANISMO DE TRASLACION	65
6.3.1 Motor	65
6.3.2 Freno	65
6.3.4 Acoplamiento	65
6.4 MECANISMO DE ORIENTACION	65
6.4.1 Corona de orientación.....	65
6.4.2 Motor	65
6.4.3 Freno	65
6.4.4 Acoplamiento	65
7. PROGRAMA EN VISUAL BASIC.....	65
7.1 INTRODUCCION.....	65
7.1.1 Visual Basic	65
7.1.2 Introducción al Visual Basic.....	65

7.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA	65
7.2.1 Introducción.....	65
7.2.2 Cálculos realizados	65
7.2.2 Formulario 8 - Llamada a Matlab.....	65
7.2.3 Formulario 9 - Generar el código para el dibujo de la deformada	65
7.2.4 Formulario 11 - Generar un documento de Word al final del cálculo.....	65
7.2.5 Documentación adjunta al programa.....	65
7.3 PROCEDIMIENTOS FINALES	65
7.3.1 Programa de instalación.....	65
7.3.2 Reproducción automática	65
8. EJEMPLO DE CALCULO	65
8.1 GENERALIDADES	65
8.1.1 Introducción.....	65
8.1.2 Clasificación de aparatos y mecanismos	65
8.2 MECANISMO DE ELEVACION	65
8.2.1 Gancho.....	65
8.2.2 Aparejo	65
8.2.3 Cable.....	65
8.2.4 Poleas.....	65
8.2.5 Tambor	65
8.2.6 Motor	65
8.2.7 Freno	65
8.2.8 Reductor	65
8.2.9 Acoplamiento	65
8.3 MECANISMO DE TRASLACION	65
8.3.1 Motor	65
8.3.2 Freno	65
8.3.3 Acoplamiento	65
8.4 CALCULO DE LA ESTRUCTURA DE LA GRUA	65
8.5 MECANISMO DE ORIENTACION	65
8.5.1 Corona de orientación.....	65
8.5.2 Motor	65
8.3.2 Freno	65
8.3.3 Acoplamiento	65
8.6 RESULTADOS DEL PROGRAMA DE VISUAL BASIC	65

PLIEGO DE CONDICIONES

1. CONDICIONES GENERALES	65
1.1 INTRODUCCION.....	65
1.2 CONDICIONES DE DESARROLLO	65
1.3 PROPIEDAD INTELECTUAL	65
2. CONDICIONES DE MATERIALES Y EQUIPOS.....	65
2.1 RECURSOS HARDWARE	65
2.2 RECURSOS SOFTWARE	65
3. CONDICIONES DE MONTAJE Y EJECUCION	65
3.1 REQUERIMIENTOS MINIMOS	65
3.2 INSTALACION	65
4. CONDICIONES ECONOMICAS.....	65

PRESUPUESTO

1. MEDICIONES	65
1.1 EQUIPOS - CANTIDAD	65
1.2 PROGRAMACION	65
1.2.1 Programación en Matlab.....	65
1.2.2 Programación en Visual Basic.....	65
2. Cuadros de precios	65
2.1 Equipos - Precios	65
2.2 Programación.....	65
2.2.1 Programación en Matlab.....	65
2.2.2 Programación en Visual Basic.....	65
3. Presupuestos	65
3.1 Equipos	65
3.2 Programación.....	65
3.3 PRESUPUESTO TOTAL	65

NORMATIVA

NORMATIVA.....	65
----------------	----

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA	65
--------------------	----

MEMORIA

1. INTRODUCCION

1.1 OBJETO DEL PROYECTO

Tal y como se indica en el título del proyecto, se ha trabajado en la realización de un programa para el cálculo una gama de grúas torre sin pináculo mediante cálculo matricial en 3D y para la elección de sus accionamientos principales. Como límites, se han tomado una carga de hasta 3 toneladas, un alcance de hasta 70 metros y una altura de torre de hasta 40 metros.

Para la realización de este proyecto se han empleado dos programas de cálculo y programación: Matlab y Microsoft Visual Basic.

El primero de ellos se ha usado para la realización del cálculo estructural de la grúa y su deformada gracias a la gran potencia de Matlab con operaciones de matrices y vectores, mientras que con el segundo se ha realizado el cálculo de los accionamientos y el interfaz de usuario.

Otros programas usados han sido:

- Solid Edge: para la realización de los dibujos en 3D, los planos de la grúa y la medición de los ángulos (este proceso se describirá más adelante).
- Microsoft Excel: para la comprobación de cálculos en los primeros avances del programa.
- Microsoft PowerPoint: para realizar las diapositivas de la presentación.
- Adobe Photoshop 7.0: para retocar las fotos e imágenes y escribir texto.
- Smart Draw: para la realización del árbol genealógico del programa.
- Install Maker Pro: para la creación del programa de instalación.

Todos los programas usados son conocidos y ampliamente utilizados en casi todos los ámbitos industriales, científicos y empresariales por su gran potencia y versatilidad y su fácil manejo. El programa elaborado ha sido desarrollado con la finalidad de permitir calcular múltiples grúas, las cuales tienen en común una misma morfología y elementos.

1.2 DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.2.1 Mecanismos

Los grupos de mecanismos de los que consta este tipo de grúa son los siguientes:

- Mecanismo de elevación
- Mecanismo de orientación
- Mecanismo de traslación

Los componentes de cada uno de los grupos y su cálculo se verán más adelante.

1.2.2 Estructura

La estructura de la grúa esta formada por tres partes bien diferenciadas:

- Pluma
- Contrapluma
- Torre

Cada una de las tres partes están constituidas por diversos módulos, cuya morfología esta descrita en su capítulo correspondiente. Estos módulos están constituidos por tres tipos de barras:

- Cilindro hueco
- Cilindro macizo
- Cuadrado hueco

Las dimensiones de estas barras será el resultado que obtendremos mediante el programa realizado en Matlab y estarán conformadas de acero A-70. Se ha elegido este acero por presentar las características de resistencia y soldabilidad necesarias. El límite elástico de este acero, garantizado por el proveedor, es de 7.000 kg/cm^2 .

1.2.3 Características

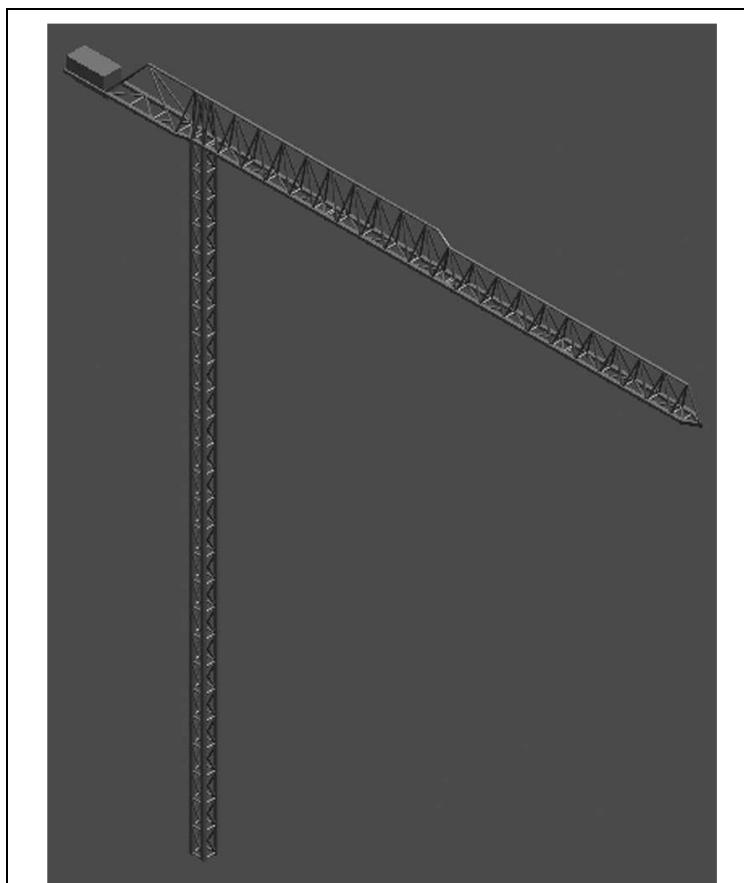


Figura 1.1: Dibujo 3D de una grúa torre sin pináculo

Las grúas torre son empleadas principalmente en obras de construcción civil y en operaciones de elevación y transporte “in situ”, donde se precise un aparato por un período de tiempo de unos meses y la carga a elevar no sea excesivamente grande.

Las grúas torre sin pináculo se caracterizan por la ausencia de tirantes y cúspide, lo que conlleva la eliminación de todas las complicaciones derivadas de su montaje. Además, la ausencia de tirantes se traduce en que la parte giratoria no se encontrará sometida a cargas alternativas. Como consecuencia, se mejorará el comportamiento de la estructura a fatiga.

1.2.4 Ventajas

Entre las principales ventajas de las grúas torre sin pináculo se pueden citar:

- Un montaje rápido, sencillo y seguro de unos módulos bastante ligeros.
- Los componentes estructurales pueden ser montados directamente desde un camión grúa.
- Los diferentes tramos de la pluma se pueden empalmar sencillamente.
- Es casi la única elección posible para utilizar en espacios reducidos, al no ser necesario el preensamblaje total de la pluma en el suelo.
- En algunos casos es el único tipo de grúa que puede resolver el problema allá donde los modelos convencionales con la altura extra que proporciona la cúspide de la grúa no son los más adecuados.

A pesar de lo que se podría llegar a pensar, este tipo de grúas no tienen ni un coste económico mayor que las grúas clásicas tradicionales, ni un mantenimiento mucho más elevado.

2. CÁLCULO MATRICIAL

2.1 INTRODUCCION

Las estructuras de la grúa torre a dimensionar son la pluma, la contrapluma y la torre. Cada una de estas partes estructurales está definida por una celosía.

Una celosía está formada por una combinación organizada de barras que, conectadas entre sí, proveen un cierto grado de rigidez, con la finalidad de satisfacer unas funciones determinadas. En este caso soportar una serie de acciones dentro de la base de unos estados límites últimos y de unos criterios de resistencia.

En este apartado del proyecto explicaremos los fundamentos básicos del sistema de cálculo que utilizaremos para calcular las barras necesarias, y así, que las celosías de la estructura de la torre soporten esos estados límites últimos y criterios de resistencia.

2.2 FUNDAMENTOS DEL CÁLCULO MATRICIAL

2.2.1 Modelo monodimensional de barras

El modelo de cálculo que se va a emplear es el modelo monodimensional de barras. Éste es un modelo muy utilizado en el cálculo de estructuras, dada su relativa sencillez. De hecho, constituye la fase central del diseño de muchas de ellas (puentes, naves industriales, elementos de máquinas, torres de refrigeración, grúas, etc.).

Se denomina barra al sólido en el cuál una de sus dimensiones características (la longitud) es mucho mayor que las otras dos (anchura y altura). Para el desarrollo del proceso de cálculo se considerarán sólo barras rectas de sección constante.

Los fundamentos del modelo monodimensional de barras son el establecimiento de unas hipótesis simplificativas suficientemente contrastadas sobre las tensiones y los desplazamientos que permitan:

- Obtener soluciones explícitas para el campo tensional.
- Establecer un campo de ecuaciones diferenciales fácilmente integrables.

Las hipótesis a adoptar son las clásicas de la Teoría de la Elasticidad lineal:

- Admitir que las secciones planas permanecen planas e indeformadas en su plano.
- Pequeños desplazamientos: Esto permite aplicar el equilibrio sobre la deformada, con lo que las ecuaciones de equilibrio se simplifican en ecuaciones lineales.
- Pequeñas deformaciones: Esto implica que se pueden despreciar los términos de orden superior al lineal en las ecuaciones de compatibilidad, convirtiendo las ecuaciones de compatibilidad en ecuaciones lineales.
- Sólido rígido ideal: Supone que los materiales usados son homogéneos, isótropos y de comportamiento elástico y lineal. Esto va a proporcionar una ley de comportamiento lineal único, que relaciona las deformaciones con las tensiones y los esfuerzos.

El establecimiento de estas hipótesis de cálculo permite aplicar el Principio de Superposición. Tal principio sostiene que la respuesta de la estructura ante la actuación simultánea de varias acciones, es igual a la suma de las respuestas ante la actuación de cada acción por separado. Este principio integra uno de los pilares fundamentales sobre el que se apoya el cálculo matricial.

2.2.2 Método directo de rigidez

Debido al elevado número de barras de que consta cada celosía, se emplea un cálculo matricial basado en el Método Directo de Rigidez. Se trata de un procedimiento fácilmente sistematizable, donde el número de operaciones o ecuaciones a resolver no supone un factor determinante, dado que se resuelven mediante ordenador.

Es aquí donde interviene el programa Matlab. Una de las capacidades más atractivas de este programa es la de efectuar, entre otras funciones, cálculos numéricos con vectores y matrices. El cálculo matricial, a través de los programas de ordenador, se ha convertido en la actualidad en una de las herramientas más importantes para todo aquél que calcule estructuras.

Dentro de las aplicaciones prácticas del Álgebra matricial existen distintos métodos, de entre los cuales se utilizará el método directo de rigidez para el cálculo de las distintas estructuras que componen la grúa. Éste es un procedimiento sistemático del método de los desplazamientos.

El proceso que configura el método directo de rigidez contempla las siguientes fases:

1. Fase de discretización: Consiste en la división del dominio de trabajo sometido a estudio en partes más sencillas, denominadas elementos. En el presente caso, el dominio es cada una de las subestructuras (pluma y torre) que, en su conjunto, constituyen la estructura global que es la grúa. Esas subestructuras continuas (o de nudos rígidos) están compuestas por un conjunto de barras distribuidas en forma de celosía. Por lo tanto, el elemento resultante de efectuar la discretización es la barra.
2. Definición: Se definen las ecuaciones que conforman el problema para cada uno de los elementos. Aplicado a este caso, consiste en determinar la matriz de rigidez de cada barra.
3. Ensamblaje: Unión de todas las ecuaciones de los elementos para obtener las ecuaciones del conjunto. Es decir, el proceso de síntesis o montaje de la matriz de rigidez de la estructura, acoplando las matrices de rigidez de cada uno de los elementos barra.
4. Resolución: Permite obtener la solución al problema planteado. En este caso, se trata propiamente del cálculo, en un primer momento, de los desplazamientos, seguidamente de las reacciones y por último el cálculo de los esfuerzos.

En el caso concreto que nos ocupa cada celosía está formada por una estructura espacial unida mediante nudos rígidos, los cuales tienen 6 grados de libertad: 3 traslaciones (una por cada eje) y 3 giros (uno por cada eje). Definiremos los siguientes sistemas de coordenadas cartesianas:

- Un sistema global: Es un sistema de referencia fijo válido para toda la grúa. Es el habitualmente empleado para definir la posición de los nudos, sus desplazamientos, las acciones que actúan sobre los mismos... Siempre que intervenga más de una barra, es necesario utilizar un sistema de ejes globales para unificar las coordenadas.
- Un sistema local: Está definido para cada elemento. En él se plantearán las ecuaciones generales de cada barra, independientemente de su orientación.

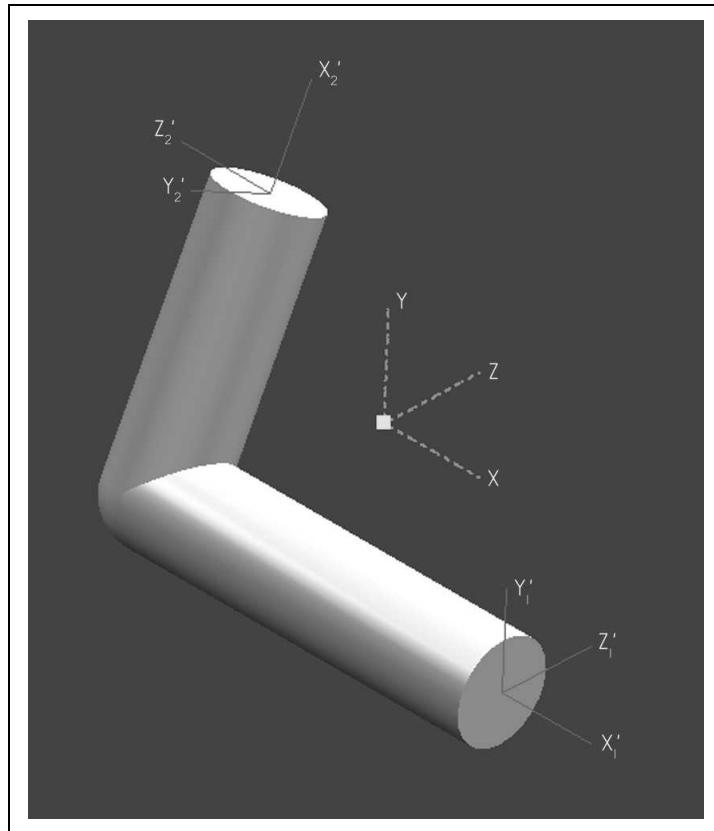


Figura 2.1: Ejes globales (verde) y locales (violeta)

Para el sistema local de coordenadas definido en cada barra, se toma el origen en el centro de la sección de la barra, con el eje x' coincidente con el eje de la barra, el eje y' con dirección vertical, mientras que el eje z' forma junto con el eje x' un plano horizontal. Estos ejes locales pueden coincidir con los ejes globales o no, tal y como se muestra en la figura anterior.

2.2.3 Vectores de desplazamientos y de fuerzas

Los nudos de la estructura experimentan desplazamientos y están sometidos a fuerzas externas. Del mismo modo, los extremos de cualquier barra de la estructura experimentan desplazamientos y están sometidos a fuerzas internas o solicitudes.

Estos desplazamientos de los nudos y de los extremos de las barras y todas las fuerzas externas e internas se representan por matrices columna, que constituyen los vectores de desplazamientos y de fuerzas.

Un nudo rígido puede experimentar un desplazamiento longitudinal δ y un desplazamiento angular o giro θ . Los desplazamientos positivos de las componentes del desplazamiento coinciden con el sentido positivo de los ejes. El sentido positivo del giro es el sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del eje. Los desplazamientos del extremo de una barra se representan mediante:

$$[d_A]_G = \begin{bmatrix} \Delta \\ \delta_Y \\ \delta_Z \\ \varphi \\ \theta_Y \\ \theta_Z \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

El sentido positivo de las fuerzas que actúan sobre el extremo de barra corresponde a la dirección de los ejes globales. El sentido positivo del momento corresponde al sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del eje. Las fuerzas externas que actúan sobre un nudo se representan mediante:

$$[P_A]_G = \begin{bmatrix} N \\ T_Y \\ T_Z \\ M_T \\ M_Y \\ M_Z \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

2.2.4 Matriz de rigidez de una barra en locales

Una barra espacial de nudos rígidos posee 12 grados de libertad (posibilidades de movimiento), 6 por cada nudo (3 translaciones y 3 giros en cada uno de ellos). Considerando una barra de sección constante cuyos extremos experimentan desplazamientos, estos desplazamientos originan en los extremos de la barra las solicitudes descritas anteriormente.

Según la ley de Hooke y el principio de superposición, entre los desplazamientos y las solicitudes se puede establecer la siguiente relación:

$$\begin{aligned} S_1 &= k_{1-1}\delta_1 + k_{1-2}\delta_2 + \cdots + k_{1-12}\delta_{12} \\ S_2 &= k_{2-1}\delta_1 + k_{2-2}\delta_2 + \cdots + k_{2-12}\delta_{12} \\ &\vdots & \vdots \\ S_{12} &= k_{12-1}\delta_1 + k_{12-2}\delta_2 + \cdots + k_{12-12}\delta_{12} \end{aligned} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

El coeficiente de proporcionalidad k_{i-j} , o coeficiente de rigidez de la barra, representa la solicitud S_i originada por un desplazamiento δ_j unitario. Estas expresiones pueden escribirse en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_{12} \end{bmatrix}_L = \begin{bmatrix} k_{1-1} & k_{1-2} & \cdots & k_{1-12} \\ k_{2-1} & k_{2-2} & \cdots & k_{2-12} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{12-1} & k_{12-2} & \cdots & k_{12-12} \end{bmatrix}_L \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_{12} \end{bmatrix}_L$$

Ecuación (2.4)

O, para simplificar:

$$[S]_L = [K]_L \cdot [d]_L$$

Ecuación (2.5)

Para determinar los 144 (12·12) elementos de la matriz K se provocan aisladamente desplazamientos unitarios dirigidos según δ_1 , δ_2 , etc... y se compone la matriz de rigidez de la barra en coordenadas locales:

$$\begin{bmatrix} \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E \cdot I_z}{L^3} & 0 & 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I_z}{L^2} & 0 & -\frac{12 \cdot E \cdot I_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12 \cdot E \cdot I_y}{L^3} & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L^2} & 0 & 0 & -\frac{12 \cdot E \cdot I_y}{L^3} & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{G \cdot I_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{G \cdot I_t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L^2} & 0 & \frac{4 \cdot E \cdot I_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L^2} & 0 & \frac{2 \cdot E \cdot I_y}{L} \\ 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I_z}{L^2} & 0 & 0 & \frac{4 \cdot E \cdot I_z}{L} & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2 \cdot E \cdot I_z}{L} \\ -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \cdot E \cdot I_z}{L^3} & 0 & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I_z}{L^2} & 0 & \frac{12 \cdot E \cdot I_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12 \cdot E \cdot I_y}{L^3} & 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L^2} & 0 & 0 & \frac{12 \cdot E \cdot I_y}{L^3} & 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{G \cdot I_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G \cdot I_t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L^2} & 0 & \frac{2 \cdot E \cdot I_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L^2} & 0 & \frac{4 \cdot E \cdot I_y}{L} \\ 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I_z}{L^2} & 0 & 0 & \frac{2 \cdot E \cdot I_z}{L} & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4 \cdot E \cdot I_z}{L} \end{bmatrix}$$

Ecuación (2.6)

Siendo:

- E el módulo de elasticidad longitudinal del material.
- A el área del perfil, sección transversal de la barra.
- L la longitud de la barra.
- I_x , I_y , I_z los momentos de inercia de la barra según los ejes X, Y, Z.
- I_t el módulo de torsión.

La matriz de rigidez K_L tiene las siguientes propiedades:

- Es una matriz cuadrada de orden 12.
- Los elementos de la diagonal principal son positivos y no nulos.
- El elemento k_{i-j} representa la solicitud de orden i originada por el desplazamiento unitario de orden j .
- Es una matriz simétrica. Se puede demostrar mediante el teorema de Maxwell.

2.2.5 Transformación de coordenadas

Centrándose en el caso espacial, un nudo tiene 6 grados de libertad. Agrupando sus variables en el sistema de coordenadas XYZ, denominado sistema global, se obtienen las ecuaciones 2.1 y 2.2 ya vistas.

Si se define el nudo desde otro sistema de coordenadas X'Y'Z', denominado sistema local, deberá existir una relación entre los vectores de fuerzas y desplazamientos expresados en ambos sistemas de coordenadas, según:

$$[V]_G = [R] \cdot [V]_L \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

$$[V]_L = [R]^T \cdot [V]_G \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

La matriz de rotación $[R]$ está definida según:

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 & \cos\alpha_3 \\ \cos\beta_1 & \cos\beta_2 & \cos\beta_3 \\ \cos\gamma_1 & \cos\gamma_2 & \cos\gamma_3 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

Donde:

- α_1, β_1 y γ_1 , son los ángulos que forma el eje local X_L con los ejes globales X, Y y Z.
- α_2, β_2 y γ_2 , son los ángulos que forma el eje local Y_L con los ejes globales X, Y y Z.
- α_3, β_3 y γ_3 , son los ángulos que forma el eje local Z_L con los ejes globales X, Y y Z.

2.2.6 Matriz de rigidez de una barra en globales

Teniendo en cuenta las particiones matriciales, la ecuación (2.5) se puede expresar de la forma:

$$\begin{aligned} [S_{AB}]_L &= [K_{AA}]_L [d_A]_L + [K_{AB}]_L [d_B]_L \\ [S_{AB}]_L &= [K_{BA}]_L [d_A]_L + [K_{BB}]_L [d_B]_L \end{aligned} \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

Designando por $[R_0]$ y $[R_0]^T$ a:

$$[R_0] = \begin{bmatrix} [R] & [0] \\ [0] & [R] \end{bmatrix} \quad [R_0]^T = \begin{bmatrix} [R]^T & [0] \\ [0] & [R]^T \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

Al premultiplicar por $[R_0]$ la expresión (2.10) resulta:

$$\begin{aligned} [R_0] [S_{AB}]_L &= [R_0] [K_{AA}]_L [d_A]_L + [R_0] [K_{AB}]_L [d_B]_L \\ [R_0] [S_{AB}]_L &= [R_0] [K_{BA}]_L [d_A]_L + [R_0] [K_{BB}]_L [d_B]_L \end{aligned} \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

Y tenemos que:

$$\begin{aligned} [d_A]_L &= [R_O]^T [d_A]_G & [d_B]_L &= [R_O]^T [d_B]_G \\ [R_O] [S_{AB}]_L &= [S_{AB}]_G & [R_O] [S_{BA}]_L &= [S_{BA}]_G \end{aligned} \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

Sustituyendo, se obtiene:

$$\begin{aligned} [S_{AB}]_G &= [R_O] [K_{AA}]_L [R_O]^T [d_A]_G + [R_O] [K_{AB}]_L [R_O]^T [d_B]_G \\ [S_{BA}]_G &= [R_O] [K_{BA}]_L [R_O]^T [d_A]_G + [R_O] [K_{BB}]_L [R_O]^T [d_B]_G \end{aligned} \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

Definiendo las submatrices de rigidez de las barras en coordenadas globales por:

$$\begin{aligned} [K_{AA}]_G &= [R_O] [K_{AA}]_L [R_O]^T & [K_{AB}]_G &= [R_O] [K_{AB}]_L [R_O]^T \\ [K_{BA}]_G &= [R_O] [K_{BA}]_L [R_O]^T & [K_{BB}]_G &= [R_O] [K_{BB}]_L [R_O]^T \end{aligned} \quad \text{Ecuación (2.15)}$$

Sustituyendo esos valores, las ecuaciones (2.14) se reducen a:

$$\begin{aligned} [S_{AB}]_G &= [K_{AA}]_G [d_A]_G + [K_{AB}]_G [d_B]_G \\ [S_{BA}]_G &= [K_{BA}]_G [d_A]_G + [K_{BB}]_G [d_B]_G \end{aligned} \quad \text{Ecuación (2.16)}$$

De forma simplificada:

$$[S]_G = [K]_G [d]_G \quad \text{Ecuación (2.17)}$$

En donde:

$$[K]_G = \begin{bmatrix} [K_{AA}] & [K_{AB}] \\ [K_{BA}] & [K_{BB}] \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2.18)}$$

La matriz $[K]_G$ es cuadrada y de orden 12, ya que una barra tiene 12 grados de libertad.

2.2.7 Síntesis de la matriz de la estructura

Siguiendo el procedimiento, se restablece el equilibrio y la continuidad de los nudos ensamblando las submatrices de rigidez de las barras en coordenadas globales.

De esta forma se obtiene la matriz de rigidez completa de la estructura $[K_0]$ que satisface la ecuación matricial:

$$[P]_G = [K_O] [d]_G \quad \text{Ecuación (2.19)}$$

La matriz de rigidez $[K_0]$ es una matriz cuadrada de orden $6n$, siendo n el número de nudos de la estructura.

Esta matriz es una matriz singular, ya que, al no haber impuesto ninguna condición de contorno, apoyos y/o empotramientos, se trata de un mecanismo y tiene infinitas soluciones.

2.2.8 Desplazamientos y reacciones

Al imponer las condiciones de apoyo, eliminando las columnas correspondientes a los desplazamientos conocidos (en los apoyos y/o empotramientos varios desplazamientos son 0) y las filas correspondientes a las cargas desconocidas (las reacciones en los apoyos), la ecuación (2.19) se reduce a la siguiente ecuación matricial, de donde podemos despejar los desplazamientos de la estructura:

$$[P_a]_G = [K] [d_1]_G \Rightarrow [d_1]_G = [K]^{-1} [P_a]_G \quad \text{Ecuación (2.20)}$$

Donde $[K]$ es la matriz de rigidez de la estructura que considera únicamente los nudos libres. Su orden es igual al grado de indeterminación cinemática de la estructura.

Para hacer un cálculo más general, se puede proceder dividiendo la matriz de rigidez de la estructura y los vectores de cargas y desplazamientos de la siguiente manera:

$$[K_0] = \begin{bmatrix} K_{LL} & K_{LR} \\ K_{RL} & K_{RR} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2.21a)}$$

$$[d]_G = \begin{bmatrix} d_L \\ d_R \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2.21b)}$$

$$[P]_G = \begin{bmatrix} P_L \\ P_R \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2.21c)}$$

Denominando con el subíndice R a las variables relacionadas con las reacciones y con el subíndice L a las variables relacionadas con las libertades.

Así, el sistema de ecuaciones quedaría:

$$\begin{bmatrix} P_L \\ P_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{LL} & K_{LR} \\ K_{RL} & K_{RR} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_L \\ d_R \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2.22)}$$

Donde las incógnitas son d_L (desplazamientos de los nudos libres) y P_R (reacciones en los apoyos).

Despejando en el primer grupo de ecuaciones, obtenemos los desplazamientos de la estructura:

$$P_L = K_{LL} \cdot d_L + K_{LR} \cdot d_R \Rightarrow d_L = K_{LL}^{-1} \cdot (P_L - K_{LR} \cdot d_R) \quad \text{Ecuación (2.23)}$$

Se puede observar cómo en el caso de que los desplazamientos conocidos (d_R) sean 0, que es lo habitual en este tipo de cálculos, esta ecuación es equivalente a la ecuación (2.20). En caso de que no sean nulos, no existe ninguna dificultad en el cálculo de los desplazamientos de los nudos libres (d_L).

Una vez obtenidos los desplazamientos y usando el segundo grupo de ecuaciones de la ecuación (2.22), calculamos las reacciones en los apoyos:

$$P_R = K_{RL} \cdot d_L + K_{RR} \cdot d_R \quad \text{Ecuación (2.24)}$$

2.2.9 Esfuerzos en las barras

Para realizar el cálculo de resistencia en una barra es necesario expresar los esfuerzos a los que está sometida respecto de sus ejes locales. Para ello, y aplicando la matriz de rotación descrita anteriormente, calculamos los desplazamientos de los nudos de la barra en locales:

$$[d]_L = [R_0]^T \cdot [d]_G \quad \text{Ecuación (2.25)}$$

Sustituyendo en la ecuación de comportamiento del elemento barra, obtenemos los esfuerzos en la barra:

$$[S]_L = [K]_L [d]_L \quad \text{Ecuación (2.26)}$$

2.3 RESUMEN Y CONSIDERACIONES FINALES

1. Definición de la estructura: Nudos, barras, apoyos, elementos, materiales...
2. Matriz de rigidez de cada barra en locales.
3. Matriz de rotación para cada barra.
4. Matriz de rigidez de cada barra en globales.
5. Composición de la matriz de rigidez total de la estructura.
6. División de la ecuación de comportamiento según nudos libres y reacciones.
7. Calculo de los desplazamientos en globales.
8. Calculo de las reacciones en globales.
9. Calculo de los desplazamientos en locales.
10. Calculo de los esfuerzos en los extremos de las barras.

Queda por comentar que la teoría del cálculo matricial abarca mucho más y es mucho más compleja que lo expuesto anteriormente. En este apartado de la memoria se ha intentado hacer un resumen, lo más sencillo y escueto posible, del cálculo matricial que será usado en nuestro programa.

3. CONFIGURACION DE LA ESTRUCTURA

3.1 INTRODUCCION

La estructura de la grúa torre se encuentra compuesta por las siguientes subestructuras:

- Pluma
- Contrapluma
- Torre

Estas partes son las subestructuras objeto de cálculo. Cada una de ellas está formada por una combinación organizada de barras que, conectadas entre sí, determinan una celosía.

Cada celosía tiene una serie de particularidades, de carácter geométrico, que las hace distintas entre sí. Tales diferencias están relacionadas con las distintas funciones que cada una de estas partes desempeña en el conjunto global de la estructura, así como con las solicitudes a las que van a estar sometidas.

Cada una de las subestructuras de la grúa están formados por una serie de módulos que van a ser descritos en los apartados siguientes.

3.2 CONFIGURACION DE LA PLUMA Y CONTRAPLUMA

3.2.1 Descripción de la estructura

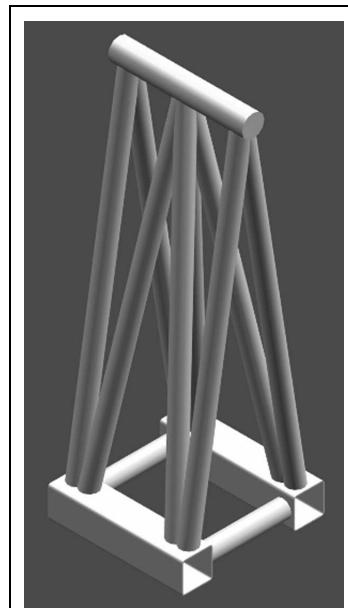
La pluma y la contrapluma son los elementos que sostienen a los elementos de elevación, la carga y el lastre. Están formadas por una serie de módulos que se van añadiendo a medida que se desea aumentar su longitud.

Para nuestro proyecto hemos definido 7 módulos diferentes, del 0 al 6, que pasamos a describir a continuación.

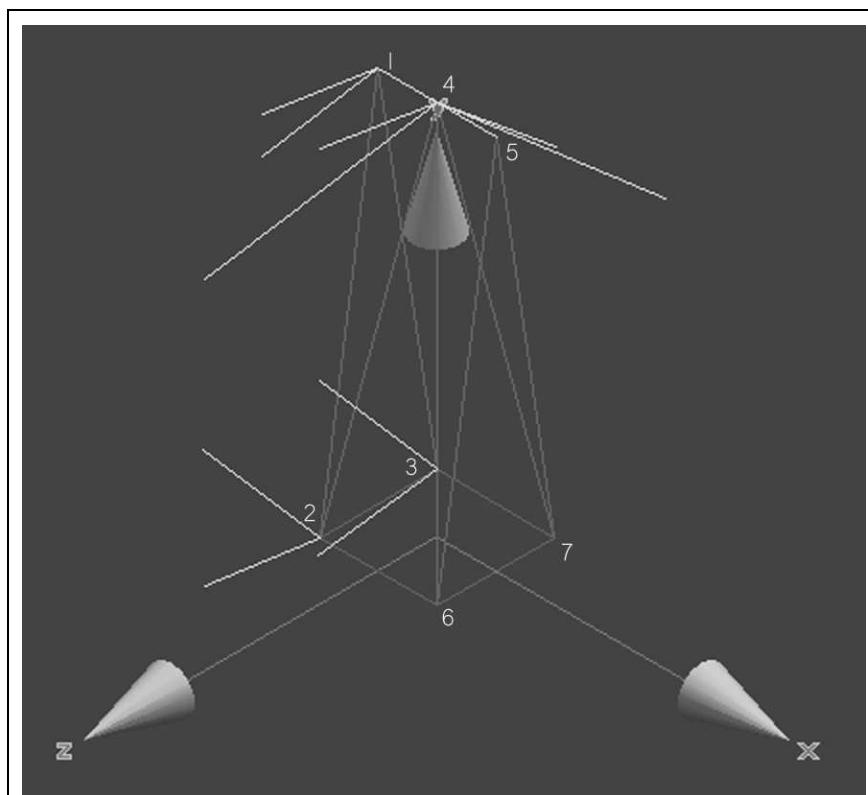
3.2.2 Módulo 0

Este módulo es el que sirve de unión a la pluma (por delante), contrapluma (por detrás) y torre (por debajo).

Tiene una altura de 3.2 metros, la máxima que permitimos en este proyecto, y una longitud y anchura de 1 metro. Está formado por dos barras cuadradas huecas inferiores y una barra circular maciza superior, el resto de barras, las que forman las pirámides y las que sirven de unión a las cuadradas huecas, son barras circulares huecas.

**Figura 3.1: Módulo 0**

Este módulo esta formado por 7 nudos y 14 barras, para su numeración y estudio utilizaremos el siguiente esquema que simplifica la estructura anterior:

**Figura 3.2: Esquema del módulo 0**

Rosa: Barras esquemáticas del módulo 0

Azul: Ejes globales

Amarillo: Ejes Y y Z locales de alguna de las barras

Números: Nudos del módulo 0

Para las barras que tienen dibujados sus ejes locales en la figura 3.2 sólo se han dibujado los ejes Y y Z. Esto se debe a que el eje X coincide con el esquema rosa de la barra y se dificultaría todavía más la diferenciación de los diversos elementos.

DEFINICION DE LOS NUDOS

La numeración de los nudos presente en el esquema del módulo 0, responde a la futura necesidad de composición de la matriz de rigidez total a partir de las matrices de rigidez de los diversos módulos. Estos se unen por los tres nudos presentes en cada extremo. Así, llamando a los tres nudos más a la izquierda 1, 2 y 3 y a los nudos más a la derecha con los tres últimos números necesarios, en este caso 5, 6 y 7, se simplifica mucho la unión de las matrices como ya se verá.

La tabla siguiente muestra las coordenadas en metros de cada uno de los nudos respecto al sistema global:

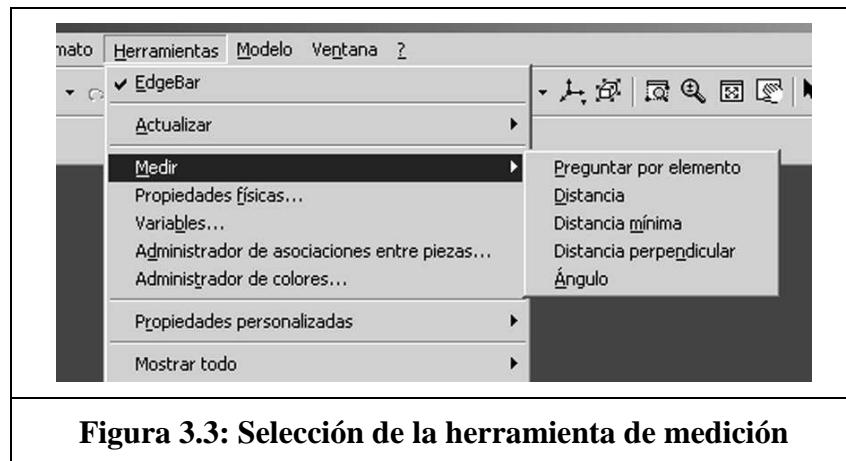
Nudo	1	2	3	4	5	6	7
Coord. X	-0.5	-0.5	-0.5	0	0.5	0.5	0.5
Coord. Y	3.2	0	0	3.2	3.2	0	0
Coord. Z	0	0.5	-0.5	0	0	0.5	-0.5

DEFINICION DE LAS BARRAS

Las definiciones de las barras de cada uno de los módulos, por ser unas tablas muy extensas, las incluiremos en un anexo del presente proyecto. A continuación incluimos una explicación de cómo se han realizado las mediciones necesarias.

Para la medida de la longitud y los diferentes ángulos de cada barra se ha usado una herramienta de medición (de elementos y de ángulos) incluida en el programa Solid Edge, el mismo programa utilizado para el dibujo de los diferentes módulos y sus esquemas. Esta herramienta es capaz de dar resultados hasta con 7 cifras decimales, precisión suficiente para nuestros propósitos.

Su utilización consiste en seleccionar con el ratón el elemento que queremos medir, o los dos elementos que forman el ángulo que queremos medir, y el programa nos da la magnitud deseada en un cuadro de texto. A continuación se incluyen unas pantallas mostrando el uso de esta herramienta:



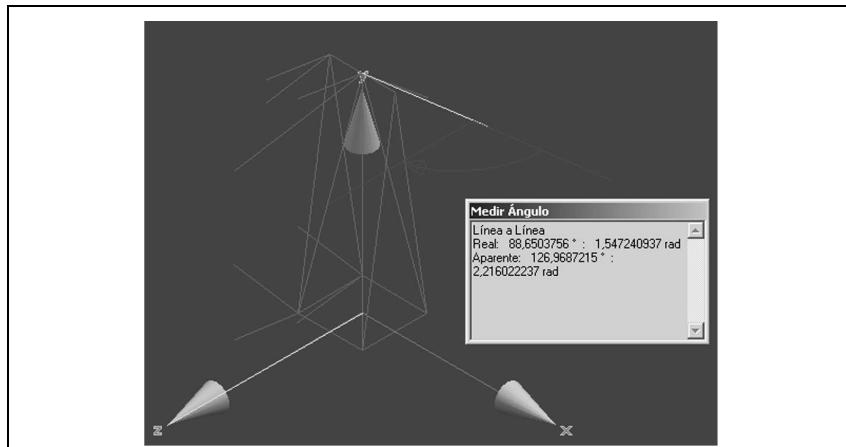


Figura 3.4: Uso de la herramienta de medición de ángulos

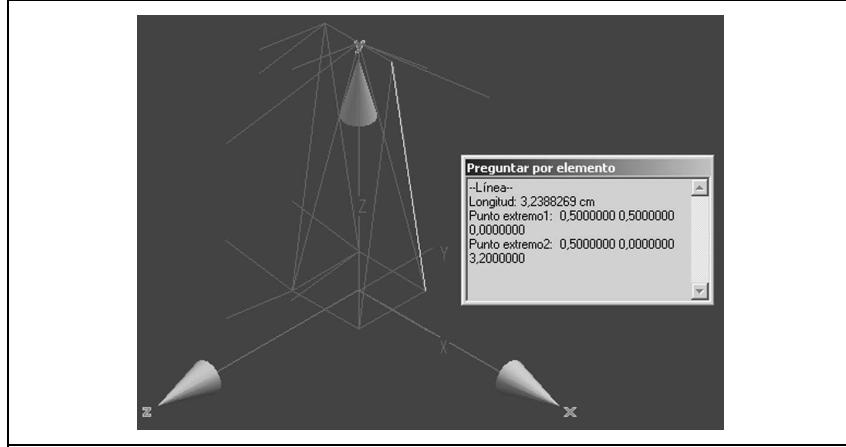


Figura 3.5: Uso de la herramienta de medición de elementos

3.2.3 Módulo 1

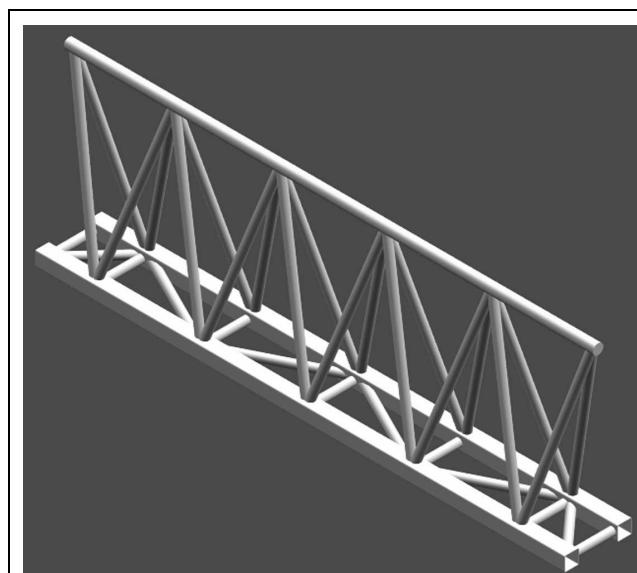
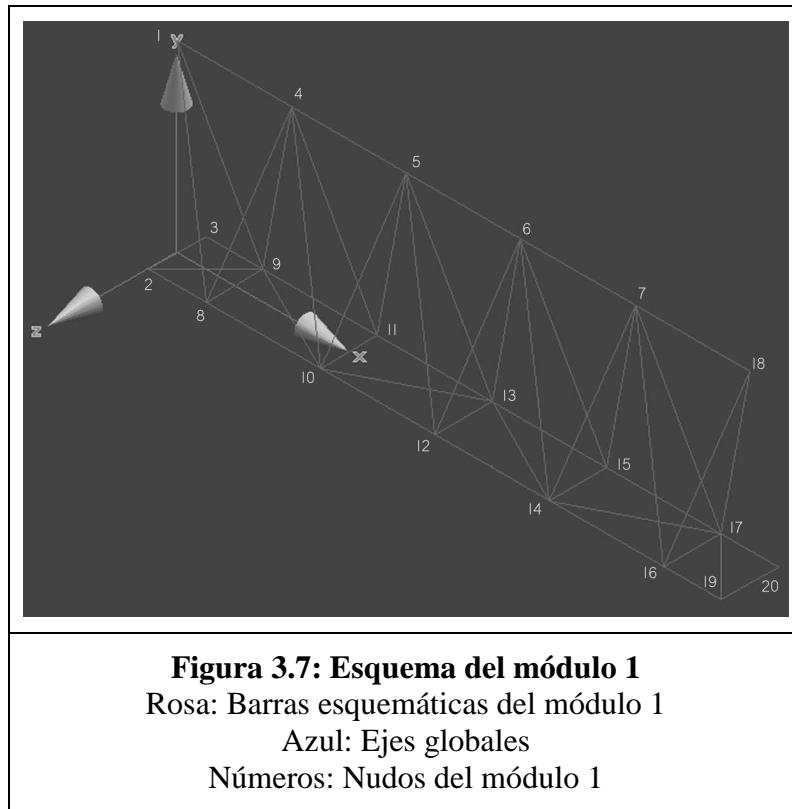


Figura 3.6: Módulo 1

Este módulo es el que sirve para aumentar la longitud de la pluma y también de la contrapluma, en caso de que la longitud a cubrir sea de 60 o 70 metros. Se pueden usar tantos módulos como sean necesarios para la configuración escogida.

Tiene una altura de 3.2 metros, una longitud de 10 metros y una anchura de 1 metro. Está formado por dos barras cuadradas huecas inferiores y una barra circular maciza superior. El resto de barras, las que forman las pirámides y las que sirven de unión a las cuadradas huecas, son barras circulares huecas.

Este módulo esta formado por 20 nudos y 50 barras, para su numeración y estudio utilizaremos el siguiente esquema que simplifica la estructura anterior:



Como ya se han visto los ejes locales de las barras y su uso en la medición de los ángulos en el apartado 3.2.2, se ha optado por no dibujarlos en la figura anterior, de manera que ésta quede lo más clara posible.

DEFINICION DE LOS NUDOS

La numeración de los nudos presente en el esquema del módulo 1, responde a la futura necesidad de composición de la matriz de rigidez total a partir de las matrices de rigidez de los diversos módulos. Éstos se unen por los tres nudos presentes en cada extremo. Así, llamando a los tres nudos más a la izquierda 1, 2 y 3 y a los nudos más a la derecha con los tres últimos números necesarios, en este caso 18, 19 y 20, se simplifica mucho la unión de las matrices.

La tabla siguiente muestra las coordenadas en metros de cada uno de los nudos respecto al sistema global:

Nudo	1	2	3	4	5	6	7
Coord. X	0	0	0	2	4	6	8
Coord. Y	3.2	0	0	3.2	3.2	3.2	3.2
Coord. Z	0	0.5	-0.5	0	0	0	0

Nudo	8	9	10	11	12	13	14
Coord. X	1	1	3	3	5	5	7
Coord. Y	0	0	0	0	0	0	0
Coord. Z	0.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5

Nudo	15	16	17	18	19	20
Coord. X	7	9	9	10	10	10
Coord. Y	0	0	0	3.2	0	0
Coord. Z	-0.5	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5

DEFINICION DE LAS BARRAS

Para la medida de la longitud y los diferentes ángulos de cada barra se ha usado una herramienta de medición presente en el programa Solid Edge, el mismo programa utilizado para el dibujo de los diferentes módulos y sus esquemas. Esta herramienta es capaz de dar resultados hasta con 7 cifras decimales, precisión suficiente para nuestro propósito.

Como en el apartado 3.2.2.2 ya se explicó el método de medición de las longitudes y los ángulos de las barras, no se vuelve a comentar aquí. Las tablas que contienen los datos obtenidos para las barras de este módulo pueden verse en los anexos de éste proyecto.

3.2.4 Módulo 2

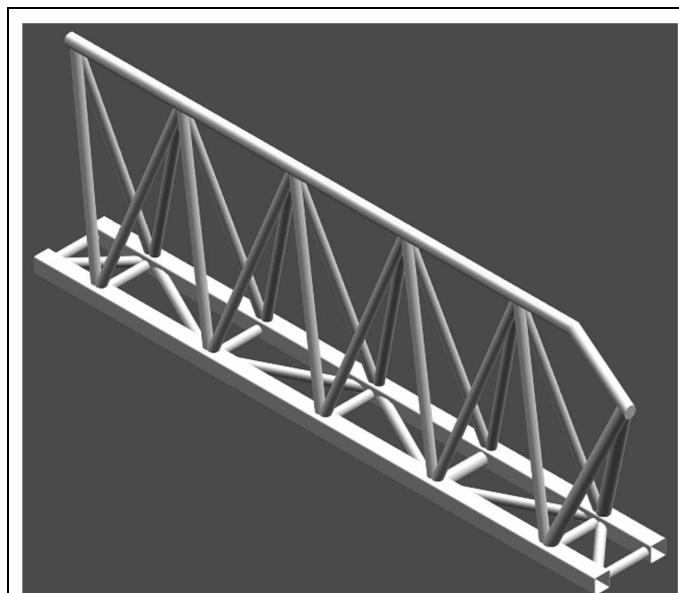
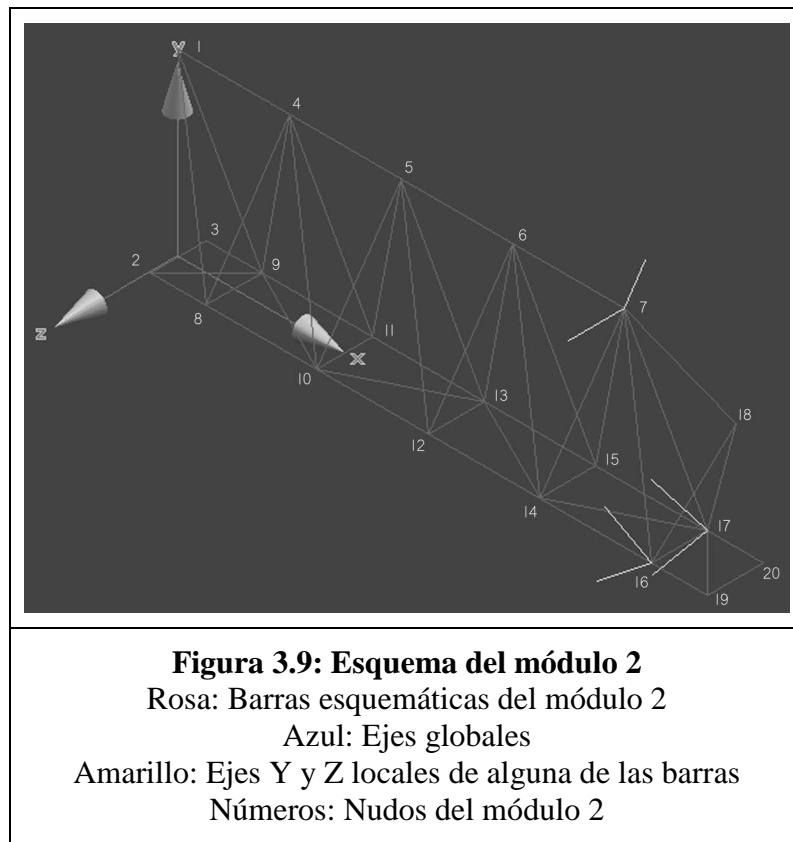


Figura 3.8: Módulo 2

Este módulo sirve para aumentar la longitud de la pluma y también para unir los módulos 1 y 3 que son de diferente altura. Sólo se puede usar un módulo en la pluma, en caso de que sea necesario para la configuración escogida.

Tiene una longitud de 10 metros y una anchura de 1 metro. La altura es de 3.2 metros durante los primeros 9 metros de su longitud y durante el último metro la altura va disminuyendo hasta quedarse en 2.4 metros. Está formado por dos barras cuadradas huecas inferiores y una barra circular maciza superior con un ángulo cerca de su extremo derecho. El resto de barras, las que forman las pirámides y las que sirven de unión a las cuadradas huecas, son barras circulares huecas.

Este módulo esta formado por 20 nudos y 50 barras. Para su numeración y estudio utilizaremos el esquema dibujado a continuación que simplifica la estructura anterior.



Para las barras que tienen dibujados sus ejes locales en la figura 3.9 sólo se han dibujado los ejes Y y Z. Esto se debe a que el eje X coincide con el esquema rosa de la barra y se dificultaría todavía más la diferenciación de los diversos elementos.

DEFINICION DE LOS NUDOS

La numeración de los nudos presente en el esquema del módulo 2, responde a la futura necesidad de composición de la matriz de rigidez total a partir de las matrices de rigidez de los diversos módulos. Éstos se unen por los tres nudos presentes en cada extremo.

Así, llamando a los tres nudos más a la izquierda 1, 2 y 3 y a los nudos más a la derecha con los tres últimos números necesarios, en este caso 18, 19 y 20, se simplifica mucho la unión de las matrices.

La tabla siguiente muestra las coordenadas en metros de cada uno de los nudos respecto al sistema global. Estas son exactamente iguales, salvo el nudo 18, que las del módulo 1:

Nudo	1	2	3	4	5	6	7
Coord. X	0	0	0	2	4	6	8
Coord. Y	3.2	0	0	3.2	3.2	3.2	3.2
Coord. Z	0	0.5	-0.5	0	0	0	0

Nudo	8	9	10	11	12	13	14
Coord. X	1	1	3	3	5	5	7
Coord. Y	0	0	0	0	0	0	0
Coord. Z	0.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5

Nudo	15	16	17	18	19	20
Coord. X	7	9	9	10	10	10
Coord. Y	0	0	0	2.4	0	0
Coord. Z	-0.5	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5

DEFINICION DE LAS BARRAS

Los anexos de este proyecto contienen los datos obtenidos para las barras. Estos datos son iguales, salvo los de las barras 5, 49 y 50, que los datos obtenidos para el módulo 1.

3.2.5 Módulo 3

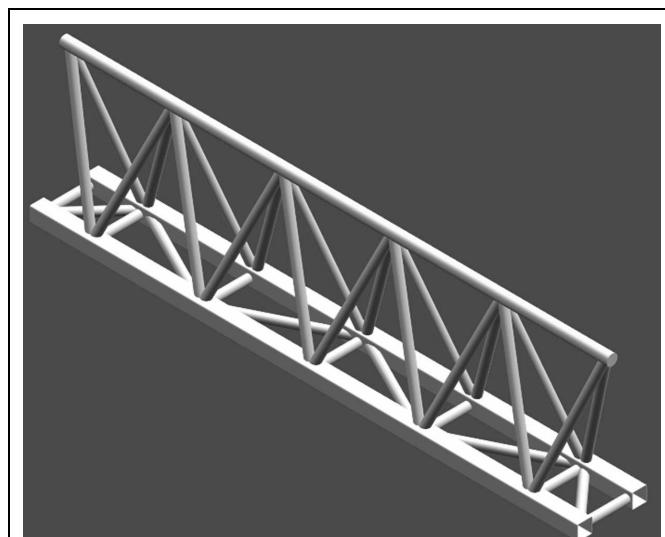
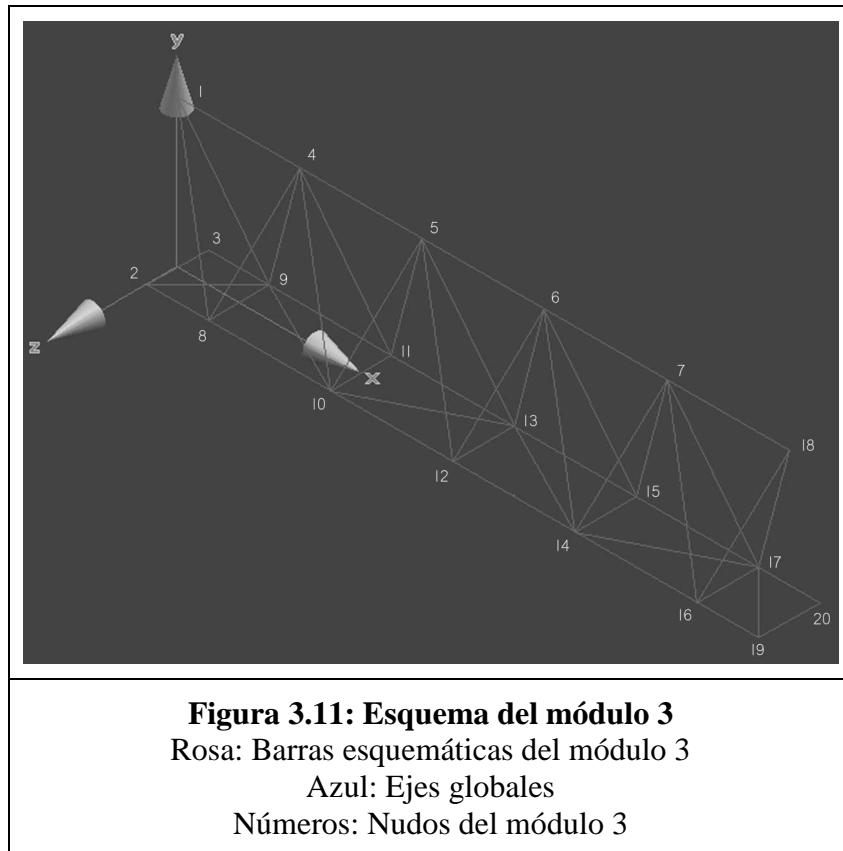


Figura 3.10: Módulo 3

Este módulo sirve para aumentar la longitud de la pluma. Se puede usar el número que se desee, siempre que antes hayamos usado un módulo 2 para cambiar la altura de la barra superior.

Tiene una longitud de 10 metros, una anchura de 1 metro y una altura de 2.4 metros. Está formado por dos barras cuadradas huecas inferiores y una barra circular maciza superior. El resto de barras, las que forman las pirámides y las que sirven de unión a las cuadradas huecas, son barras circulares huecas.

Este módulo está formado por 20 nudos y 50 barras. Para su numeración y estudio utilizaremos el siguiente esquema que simplifica la estructura anterior:



Como ya se han visto los ejes locales de las barras y su uso en la medición de los ángulos en el apartado 3.2.2, se ha optado por no dibujarlos en la figura anterior de manera que ésta quede lo más clara posible.

DEFINICION DE LOS NUDOS

La numeración de los nudos presente en el esquema del módulo 3, responde a la futura necesidad de composición de la matriz de rigidez total a partir de las matrices de rigidez de los diversos módulos. Éstos se unen por los tres nudos presentes en cada extremo. Así, llamando a los tres nudos más a la izquierda 1, 2 y 3 y a los nudos más a la derecha con los tres últimos números necesarios, en este caso 18, 19 y 20, se simplifica mucho la unión de las matrices.

La tabla siguiente muestra las coordenadas en metros de cada uno de los nudos respecto al sistema global. Estas son iguales, salvo los nudos superiores, que las del módulo 1:

Nudo	1	2	3	4	5	6	7
Coord. X	0	0	0	2	4	6	8
Coord. Y	2.4	0	0	2.4	2.4	2.4	2.4
Coord. Z	0	0.5	-0.5	0	0	0	0

Nudo	8	9	10	11	12	13	14
Coord. X	1	1	3	3	5	5	7
Coord. Y	0	0	0	0	0	0	0
Coord. Z	0.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5

Nudo	15	16	17	18	19	20
Coord. X	7	9	9	10	10	10
Coord. Y	0	0	0	2.4	0	0
Coord. Z	-0.5	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5

DEFINICION DE LAS BARRAS

Las tablas que contienen los datos obtenidos para las barras de este modulo están incluidas en los anexos de éste proyecto. Estas son iguales, salvo los de las barras que forman las pirámides, que los datos obtenidos para el módulo 1.

3.2.6 Módulo 4

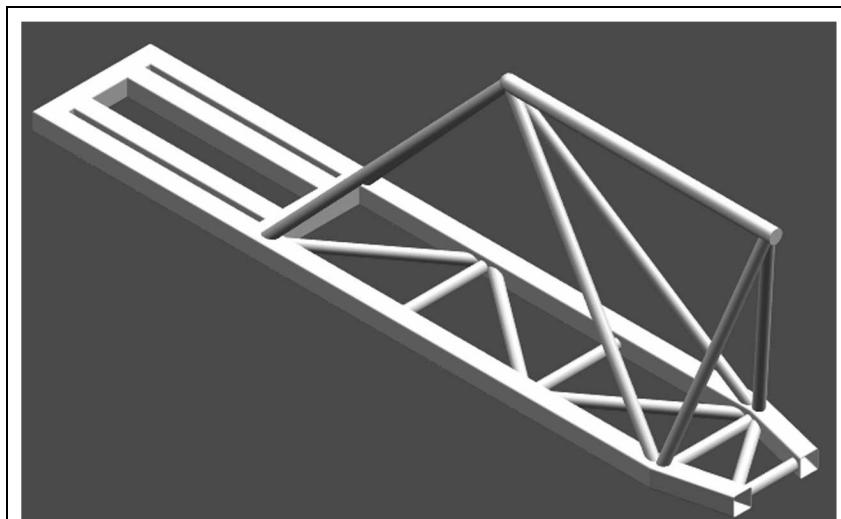
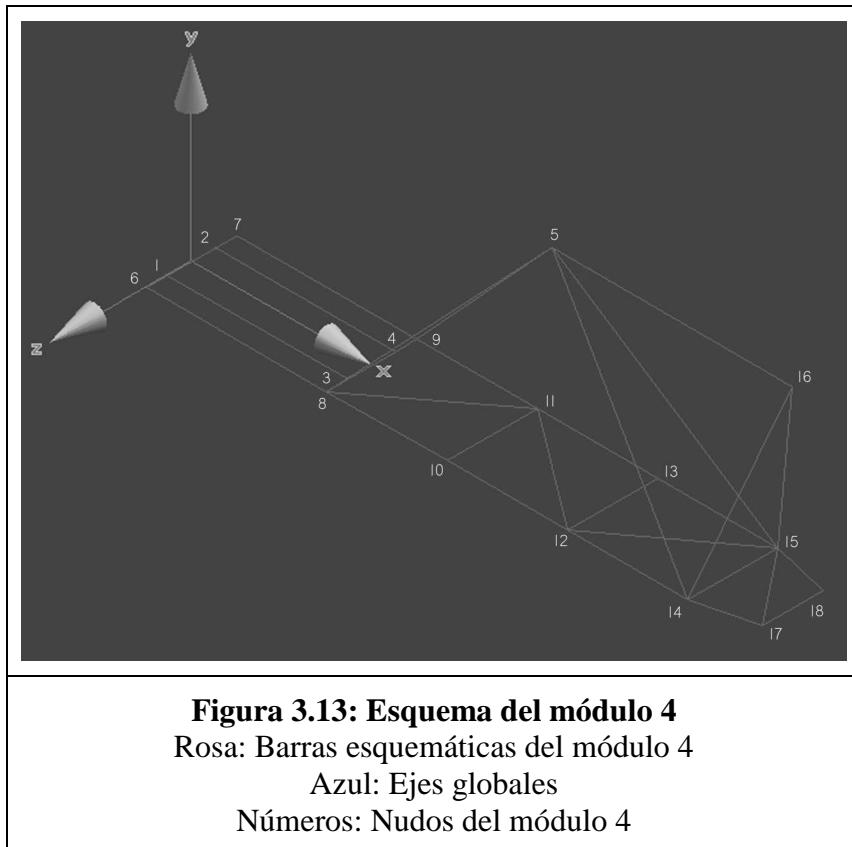


Figura 3.12: Módulo 4

Este módulo sirve para alojar el lastre, en el extremo plano de la izquierda. Es un módulo esencial de la grúa torre y se sitúa en el extremo de la contrapluma.

Tiene una longitud de 10 metros, una altura de 3.2 metros y una anchura de 1 metro en su extremo derecho, donde empieza a aumentar durante un metro hasta 1.5 metros, longitud que se mantiene en el resto del módulo. Está formado por dos barras cuadradas huecas inferiores, cuatro en la zona del lastre, y una barra circular maciza superior. El resto de barras, las que forman las pirámides y las que sirven de unión a las cuadradas huecas, son barras circulares huecas salvo las que están en la zona del lastre, que son cuadradas huecas.

Este módulo esta formado por 18 nudos y 33 barras. Para su numeración y estudio utilizaremos el esquema dibujado a continuación que simplifica la estructura arriba dibujada.



Como ya se han visto los ejes locales de las barras y su uso en la medición de los ángulos en el apartado 3.2.2, se ha optado por no dibujarlos en la figura siguiente, de manera que ésta quede lo más clara posible.

DEFINICION DE LOS NUDOS

La numeración de los nudos presente en el esquema del módulo 4, responde a la futura necesidad de composición de la matriz de rigidez total a partir de las matrices de rigidez de los diversos módulos.

Este módulo al encontrarse en un extremo de la pluma solo se une por los tres nudos presentes en el extremo derecho. Así, llamando a esos tres nudos 16, 17 y 18 se simplifica mucho la unión de las matrices.

La tabla siguiente muestra las coordenadas en metros de cada uno de los nudos respecto al sistema global:

Nudo	1	2	3	4	5	6
Coord. X	0	0	3	3	6	0
Coord. Y	0	0	0	0	3.2	0
Coord. Z	0.4	-0.4	0.4	-0.4	0	0.75

Nudo	7	8	9	10	11	12
Coord. X	0	3	3	5	5	7
Coord. Y	0	0	0	0	0	0
Coord. Z	-0.75	0.75	-0.75	0.75	-0.75	0.75

Nudo	13	14	15	16	17	18
Coord. X	7	9	9	10	10	10
Coord. Y	0	0	0	3.2	0	0
Coord. Z	-0.75	0.75	-0.75	0	0.5	-0.5

DEFINICION DE LAS BARRAS

Las tablas que contienen los datos obtenidos para las barras del módulo 4 pueden verse en los anexos de éste proyecto.

3.2.7 Módulo 5

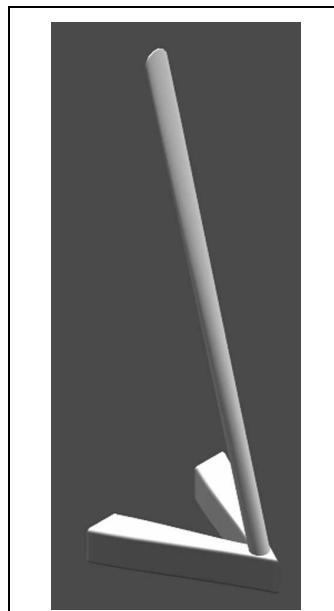
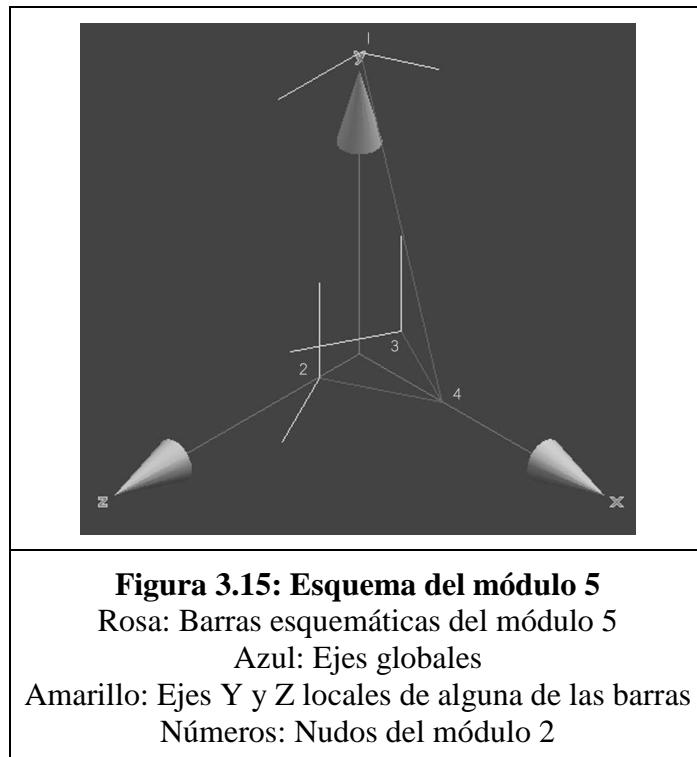


Figura 3.14: Módulo 5

Este módulo se sitúa en el extremo de la pluma para aumentar la rigidez y la sujeción de las barras del final del último módulo, en caso de que éste sea un módulo 1.

Tiene una longitud de 1 metro, una altura de 3.2 metros, y una anchura de 1 metro. Está formado por dos barras cuadradas huecas inferiores en ángulo y una barra circular maciza superior.

Este módulo está formado por 4 nudos y 3 barras. Para su numeración y estudio utilizaremos el siguiente esquema que simplifica la estructura anterior:



Para las barras que tienen dibujados sus ejes locales en la figura 3.15 sólo se han dibujado los ejes Y y Z. Esto se debe a que el eje X coincide con el esquema rosa de la barra y se dificultaría todavía más la diferenciación de los diversos elementos.

DEFINICION DE LOS NUDOS

La numeración de los nudos presente en el esquema del módulo 5, responde a la futura necesidad de composición de la matriz de rigidez total a partir de las matrices de rigidez de los diversos módulos. Este módulo, al encontrarse en un extremo de la pluma sólo se une por los tres nudos presentes en el extremo izquierdo. Así, llamando a esos tres nudos 1, 2 y 3 se simplifica mucho la unión de las matrices.

La tabla siguiente muestra las coordenadas en metros de cada uno de los nudos respecto al sistema global:

Nudo	1	2	3	4
Coord. X	0	0	0	1
Coord. Y	3.2	0	0	0
Coord. Z	0	0.5	-0.5	0

DEFINICION DE LAS BARRAS

Para la medida de la longitud y los diferentes ángulos de cada barra se ha usado una herramienta de medición presente en el programa Solid Edge, el mismo programa utilizado para el dibujo de los diferentes módulos y sus esquemas.

Incluimos a continuación, además de en los anexos, por ser solamente tres barras, los datos obtenidos para las barras del módulo 5:

Barra 1: 1-4		Longitud = 3.3526109
$\alpha_1 = 72.6459754$	$\beta_1 = 162.6459754$	$\gamma_1 = 90$
$\alpha_2 = 17.3540246$	$\beta_2 = 72.6459754$	$\gamma_2 = 90$
$\alpha_3 = 90$	$\beta_3 = 90$	$\gamma_3 = 0$

Barra 2: 2-4		Longitud = 1.1180340
$\alpha_1 = 26.5650512$	$\beta_1 = 90$	$\gamma_1 = 116.5650512$
$\alpha_2 = 90$	$\beta_2 = 0$	$\gamma_2 = 90$
$\alpha_3 = 63.4349488$	$\beta_3 = 90$	$\gamma_3 = 26.5650512$

Barra 3: 3-4		Longitud = 1.1180340
$\alpha_1 = 26.5650512$	$\beta_1 = 90$	$\gamma_1 = 63.4349488$
$\alpha_2 = 90$	$\beta_2 = 0$	$\gamma_2 = 90$
$\alpha_3 = 116.5650512$	$\beta_3 = 90$	$\gamma_3 = 26.5650512$

3.2.7 Módulo 6

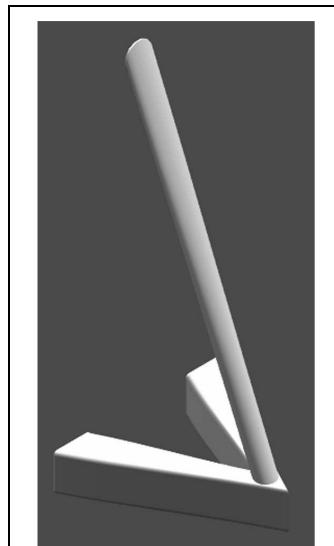
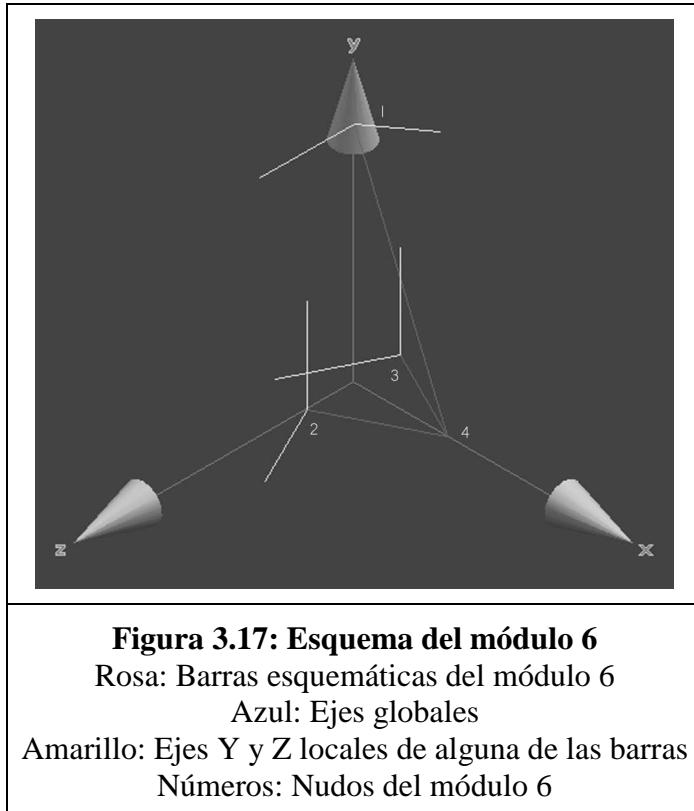


Figura 3.16: Módulo 6

Este módulo está formado por 4 nudos y 3 barras. Para su numeración y estudio utilizaremos el esquema dibujado a continuación que simplifica la estructura anterior:



Para las barras que tienen dibujados sus ejes locales en la figura 3.17 sólo se han dibujado los ejes Y y Z. Esto se debe a que el eje X coincide con el esquema Rosa de la barra y se dificultaría todavía más la diferenciación de los diversos elementos.

DEFINICION DE LOS NUDOS

La numeración de los nudos presente en el esquema del módulo 6, responde a la futura necesidad de composición de la matriz de rigidez total a partir de las matrices de rigidez de los diversos módulos.

Este módulo, al encontrarse en un extremo de la pluma sólo se une por los tres nudos presentes en el extremo izquierdo. Así, llamando a esos tres nudos 1, 2 y 3 se simplifica mucho la unión de las matrices.

La tabla siguiente muestra las coordenadas en metros de cada uno de los nudos respecto al sistema global:

Nudo	1	2	3	4
Coord. X	0	0	0	1
Coord. Y	2.4	0	0	0
Coord. Z	0	0.5	-0.5	0

DEFINICION DE LAS BARRAS

Para la medida de la longitud y los diferentes ángulos de cada barra se ha usado una herramienta de medición presente en el programa Solid Edge, el mismo programa utilizado para el dibujo de los diferentes módulos y sus esquemas.

Incluimos a continuación, además de en los anexos, por ser solamente tres barras, los datos obtenidos para las barras del módulo 6:

Barra 1: 1-4		Longitud = 2.6
$\alpha_1 = 67.3801351$	$\beta_1 = 157.3801351$	$\gamma_1 = 90$
$\alpha_2 = 22.6198649$	$\beta_2 = 67.3801351$	$\gamma_2 = 90$
$\alpha_3 = 90$	$\beta_3 = 90$	$\gamma_3 = 0$

Barra 2: 2-4		Longitud = 1.1180340
$\alpha_1 = 26.5650512$	$\beta_1 = 90$	$\gamma_1 = 116.5650512$
$\alpha_2 = 90$	$\beta_2 = 0$	$\gamma_2 = 90$
$\alpha_3 = 63.4349488$	$\beta_3 = 90$	$\gamma_3 = 26.5650512$

Barra 3: 3-4		Longitud = 1.1180340
$\alpha_1 = 26.5650512$	$\beta_1 = 90$	$\gamma_1 = 63.4349488$
$\alpha_2 = 90$	$\beta_2 = 0$	$\gamma_2 = 90$
$\alpha_3 = 116.5650512$	$\beta_3 = 90$	$\gamma_3 = 26.5650512$

3.3 CONFIGURACION DE LA TORRE

3.3.1 Descripción de la estructura

La torre es el elemento estructural sobre el cual se apoyan los demás elementos (actúa como soporte). Tiene una posición vertical respecto al eje de abscisas u horizontal. Además, en su base se instalarán los equipos de elevación y traslación.

Está formada por una serie de módulos que se van añadiendo a medida que se desea aumentar su altura. El módulo que queda en la parte superior será el que se une a la pluma y la contrapluma y el módulo que quede en la parte inferior será el que se empotre en el suelo para fijar la grúa.

Para la torre de nuestro proyecto hemos definido un módulo, el 7, que pasamos a describir a continuación.

3.3.2 Módulo 7

La altura de cada módulo es de 2 metros, y tiene una base cuadrada de 1 metro de lado. Se colocarán los módulos necesarios para proporcionar a la torre la altura deseada. Está formado por cuatro barras cuadradas huecas verticales. El resto de barras, que sirven de unión a las cuadradas huecas, son barras circulares huecas.

Este módulo está formado por 8 nudos y 12 barras. Para su numeración y estudio utilizaremos el esquema dibujado en la figura 3.19, que simplifica la estructura dibujada en la figura 3.18.

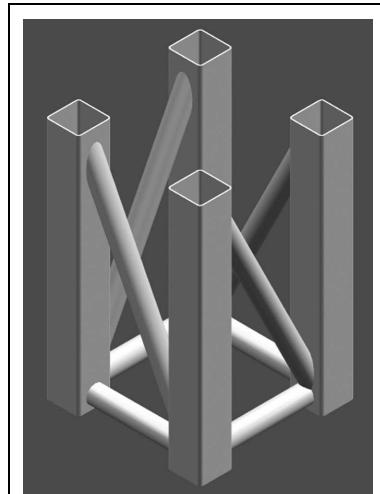
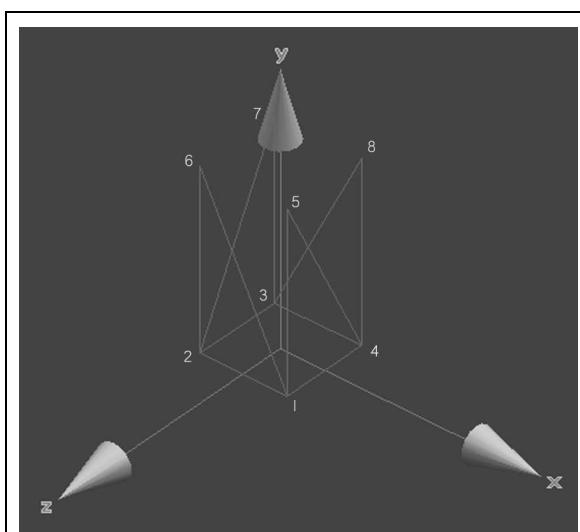
**Figura 3.18: Módulo 7**

Figura 3.19: Esquema del módulo 7
 Rosa: Barras esquemáticas del módulo 7
 Azul: Ejes globales
 Números: Nudos del módulo 7

Como ya se han visto los ejes locales de las barras y su uso en la medición de los ángulos en el apartado 3.2.2, se ha optado por no dibujarlos en la figura anterior de manera que ésta quede lo más clara posible. Además, en la vista del esquema de este módulo, figura 3.19, se ha variado un poco la vista isométrica con un pequeño giro respecto al eje Y, de manera que las barras 1-5 y 3-7 no coincidan una encima de otra.

DEFINICION DE LOS NUDOS

La numeración de los nudos presente en el esquema del módulo 7, responde a la futura necesidad de composición de la matriz de rigidez total a partir de las matrices de rigidez de los diversos módulos. Estos se unen por los cuatro nudos presentes en cada extremo. Así, llamando a los cuatro números inferiores 1, 2, 3 y 4 y a los nudos superiores 5, 6, 7 y 8, se simplifica mucho la unión de las matrices.

La tabla siguiente muestra las coordenadas en metros de cada uno de los nudos respecto al sistema global:

Nudo	1	2	3	4	5	6	7	8
Coord. X	0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	-0.5	-0.5	0.5
Coord. Y	0	0	0	0	2	2	2	2
Coord. Z	0.5	0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	-0.5	-0.5

DEFINICION DE LAS BARRAS

Para la medida de la longitud y los diferentes ángulos de cada barra se ha usado una herramienta de medición presente en el programa Solid Edge, el mismo programa utilizado para el dibujo de los diferentes módulos y sus esquemas. Esta herramienta es capaz de dar resultados hasta con 7 cifras decimales, precisión suficiente para nuestros propósitos.

Como en el apartado 3.2.2.2 ya se explicó el método de medición de las longitudes y los ángulos de las barras, no se vuelve a comentar aquí. Las tablas presentes en los anexos de éste proyecto contienen los datos obtenidos para las barras de este módulo.

3.4 CONSIDERACIONES FINALES

3.4.1 Cálculo mediante Matlab

Para hacer una comprobación de la veracidad de estos datos se ha procedido a empotrar cada uno de los módulos por un extremo y cargarlos en el otro, obteniendo los resultados mediante Matlab y comprobando que las deformaciones sean y correctas.

3.4.2 Comprobación mediante Microsoft Excel

Mediante Microsoft Excel, se realizó la resolución del mismo estado de cargas que el estudiado mediante Matlab con algunos de los módulos. Se contrastaron ambos resultados, no obteniendo ninguna anomalía de consideración y dando por buenas las configuraciones de los diferentes módulos.

4. CÁLCULO DE LAS HIPOTESIS DE CARGA

4.1 DEFINICION DE LAS CARGAS DE LA GRUA

4.1.1 Clasificación de la grúa

Antes de proceder a definir las cargas que solicitan la grúa, haremos un inciso para explicar los grupos de clasificación del aparato. Hacemos esto ya que es necesario conocer el grupo de aparato para calcular un coeficiente que aparecerá más adelante.

Para poder calcular el grupo de clasificación del mecanismo es necesario plantearse que vida estimada tendrá y saber cuánto y cómo trabajará. Con estos datos definidos y usando la tabla siguiente, obtendremos su grupo.

Estado de carga		K_m	Vida en horas de funcionamiento real del mecanismo						
			800	1600	3200	6300	12500	25000	50000
Ligero (frecuencia muy reducida)	0,125				M_3	M_4	M_5	M_6	M_7
Moderado (frecuencia reducida)	0,25			M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Pesado (frecuencia aproximada)	0,5	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_8	M_8
Muy pesado (frecuencia elevada)	1,0	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_8	M_8	M_8

Una vez definidos el grupo de clasificación del aparato, pasamos a estudiar los tipos y el cálculo de las diferentes cargas que solicitan la grúa.

4.1.2 Tipos de cargas

La estructura a dimensionar puede estar solicitada por una o más acciones:

- Cargas permanentes: Se consideran como este tipo de cargas las cargas del peso propio de la estructura, el peso de los diferentes elementos del mecanismo de elevación (gancho, poleas ...) o el lastre.
- Acción del viento: Producida por la presión dinámica que genera el viento al incidir sobre la estructura. Esta presión se multiplica por diversos coeficientes que modifican el valor inicial en función de la altura de la grúa, el ángulo de incidencia del viento...

- Cargas variables: La carga de trabajo o carga a elevar y trasladar. Esta carga puede variar tanto en su punto de aplicación, como en su magnitud, manteniéndose constante únicamente el sentido de aplicación de la carga.
- Otras cargas: Su incidencia se considerará mediante los coeficientes de seguridad necesarios.

Inicialmente se asignan unos valores mínimos a las áreas e inercias de los perfiles de las barras de la grúa. Tales valores serán insuficientes para soportar las cargas, por lo que se procederá a un cálculo iterativo hasta dar con los perfiles necesarios.

4.2 CÁLCULO DE LAS CARGAS

4.2.1 Solicitaciones a considerar

Una vez asignados los perfiles a cada clase de barra se procederá al cálculo de las solicitudes que afecten al sistema. Las solicitudes a considerar son:

- Solicitudes principales actuando sobre la estructura:
 - * Solicitudes debidas a los pesos propios de los elementos (S_G)
 - * Solicitudes debidas a la carga de servicio (S_L)
- Solicitudes debidas a los movimientos verticales:
 - * Solicitudes debidas a la elevación de la carga de servicio (S_L)
- Solicitudes debidas al viento:
 - * Efecto del viento (S_w)
 - * Efecto del viento fuera de servicio ($S_{w_{max}}$)

En los siguientes apartados será necesario el uso de un coeficiente dinámico de elevación ψ , que mayora la carga de servicio por la solicitud que produce su elevación. Su valor viene definido por la siguiente expresión:

$$\psi = 1 + \xi \cdot v_L \quad \text{Ecuación (4.1)}$$

Donde:

- v_L es la velocidad de elevación de la carga en m/s.
- ξ es un coeficiente experimental. Para grúas torre se usa 0.3.

4.2.2 Caso I: Aparato en servicio sin viento

Se consideran las solicitudes estáticas debidas al peso propio de los elementos S_G , las solicitudes debidas a la carga de servicio S_L , multiplicada por el coeficiente dinámico ψ para tener en cuenta el movimiento vertical, y los efectos horizontales más desfavorables, con exclusión de los efectos de choque S_H .

El conjunto de solicitudes se multiplicará por el coeficiente de mayoración γ_C especificado en la tabla siguiente:

Tabla 4.2: Coeficientes de mayoración de cargas								
Grupo del aparato	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈
γ _C	1,00	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20

$$\gamma_C \cdot (S_G + \psi \cdot S_L + S_H) \quad \text{Ecuación (4.2)}$$

4.2.3 Caso II: Aparato en servicio con viento

A las solicitudes del caso I hay que añadir los efectos producidos por el viento límite de servicio S_W.

$$\gamma_C \cdot (S_G + \psi \cdot S_L + S_H) + S_W \quad \text{Ecuación (4.3)}$$

4.2.4 Caso III: Aparato sometido a solicitudes excepcionales

Las solicitudes excepcionales corresponden a los siguientes casos:

- Aparato fuera de servicio con viento máximo.
- Aparato en servicio bajo el efecto de un choque.
- Aparato sometido a los ensayos previstos en la norma UNE 58-118.

Se considerará la mayor de las combinaciones siguientes:

- Solitación S_G debida al peso propio aumentada con la S_{Wmax} debida al viento máximo fuera de servicio:

$$S_G + S_{Wmax} \quad \text{Ecuación (4.4)}$$

- Solitación S_G debida al peso propio y S_L debida a la carga de servicio a la que se añade el mayor de los efectos de choque S_T:

$$S_G + S_L + S_T \quad \text{Ecuación (4.5)}$$

- Solitación S_G debida al peso propio aumentada en la mayor de las dos solicitudes $\psi\rho_1 S_L$ y $\rho_2 S_L$ siendo ρ_1 y ρ_2 los coeficientes de mayoración de la carga nominal prevista en los ensayos dinámicos definidos en la norma UNE 58-118:

$$S_G + \psi\rho_1 S_L \quad \text{o} \quad S_G + \rho_2 S_L \quad \text{Ecuación (4.6)}$$

4.3 CARGAS DE LAS SOLICITACIONES PRINCIPALES

4.3.1 Peso propio de la grúa

El cálculo del peso propio de la estructura dependerá de los perfiles elegidos. Con el dato del peso de perfil se calculará la carga para cada barra y se repartirá entre sus dos nudos correspondientes.

En realidad, la carga del peso propio de cada barra debería de ser una carga distribuida a lo largo de toda la longitud de la barra. En lugar de eso y como ya hemos comentado, dividimos toda la carga entre los dos nudos que pertenecen a cada barra. Realizamos esta simplificación porque facilita enormemente el cálculo matricial.

Haremos la misma simplificación con el resto de las cargas que sean distribuidas, como las cargas del viento, dividiendo esas cargas entre los nudos que intervengan.

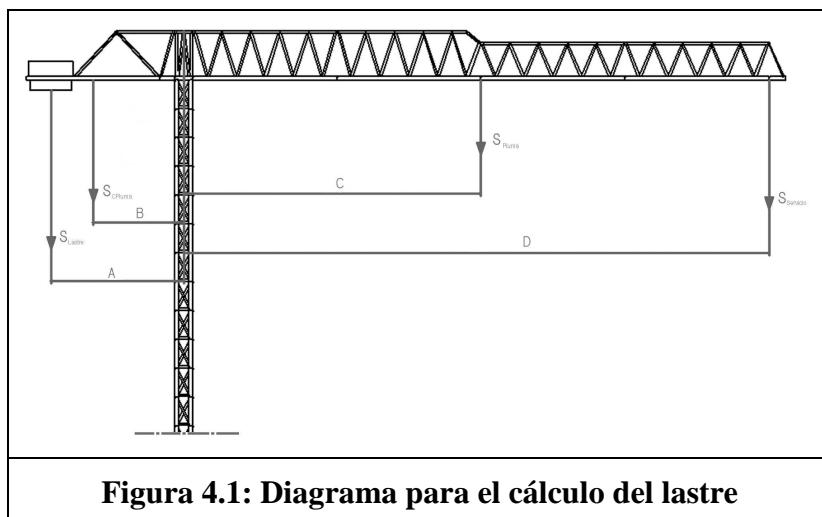
4.3.2 Peso de la carga de servicio

Este valor es uno de los datos de partida necesarios para iniciar el cálculo de la estructura. Su valor puede variar hasta tomar un valor máximo de 6.000 kg. en la mitad de la pluma o 3.000 kg. en la punta de la pluma.

Como ya se ha visto en los casos I y II, esta carga se debe mayorar con un coeficiente dinámico ψ para tener en cuenta su movimiento vertical.

4.3.3 Peso del lastre

El lastre se dimensiona de forma que compense el momento producido por todas las cargas anteriores. Este peso se distribuirá entre los nudos de la parte izquierda del módulo 4 de la contrapluma. En la siguiente figura se muestra un esquema de la situación de las fuerzas que intervienen en el cálculo del lastre:



Así, con los pesos calculados y las longitudes definidas, se puede calcular el lastre haciendo sumatorio de momentos respecto a la parte central de la pluma. Aplicamos esto mediante la siguiente ecuación:

$$(S_{\text{Lastre}} \cdot A) + (S_{\text{CPluma}} \cdot B) = \left(S_{\text{Servicio}} \cdot \frac{D}{2} \right) + (S_{\text{Pluma}} \cdot C) \quad \text{Ecuación (4.7)}$$

4.4 CARGAS DEL VIENTO

4.4.1 Condiciones del viento

Deben tenerse en cuenta dos hipótesis para el cálculo de las acciones que el viento produce sobre las grúas. Estas hipótesis dependen de las condiciones del viento, es decir, del tipo de viento que esté produciéndose.

- Viento en servicio: Se trata de la velocidad máxima del viento que la grúa debe resistir en condiciones de servicio, es decir, siendo la grúa completamente funcional, independientemente de su altura.
- Viento fuera de servicio: Se trata del viento máximo (tempestad) soplando en la dirección más desfavorable que una grúa debe poder resistir cuando está fuera de servicio.

La velocidad del viento es variable en función del lugar geográfico y de la exposición de la grúa a los vientos dominantes.

Para la mayor parte de las estructuras, completas o parciales, y para los elementos individuales utilizados en las estructuras de grúas, la acción debida al viento F se da en kiloNewtons mediante la ecuación siguiente:

$$S_w = A \cdot p \cdot C_F \quad \text{Ecuación (4.8)}$$

Donde:

- A = Superficie neta (m^2)
- p = Presión del viento (kN/m^2)
- C_F = Coeficiente de forma

4.4.2 Coeficiente de forma

Los coeficientes de forma para vigas simples y marcos de celosía, se dan en la siguiente tabla:

Tabla 4.3: Coeficientes de forma C_F							
Tipo	Descripción	Coeficiente aerodinámico l/b o l/D					
		5	10	20	30	40	50
Elementos simples	Perfiles laminados en L, en U y chapas planas	1,30	1,35	1,60	1,65	1,70	1,90
	Perfiles redondos: $D \cdot v_S \leq 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $D \cdot v_S > 6 \text{ m}^2/\text{s}$	0,75 0,60	0,80 0,65	0,90 0,70	0,95 0,70	1,00 0,75	1,10 0,80
	Perfiles cuadrados de más de 350mm. de lado y rectangulares de más de 250mm. x 450mm.	b/d					
Marcos simples de celosía	Perfiles de caras planas					1,70	
	Perfiles redondos: $D \cdot v_S \leq 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $D \cdot v_S > 6 \text{ m}^2/\text{s}$					1,20 0,80	
	Casetas	El aire no circula en la estructura				1,10	

Cuando un marco esté constituido por perfiles de caras planas y por perfiles redondos, o bien por perfiles redondos bajo los dos regímenes aerodinámicos ($D \cdot v_S < 6 \text{ m}^2/\text{s}$) y ($D \cdot v_S > 6 \text{ m}^2/\text{s}$), como es el caso de este proyecto, los coeficientes de forma apropiados se aplican a las superficies netas correspondientes.

4.4.3 Coeficiente de efecto de pantalla

Cuando los marcos o vigas paralelas están colocados de tal manera que se abriguen mutuamente, la acción del viento sobre el primer cuadro, o sobre la primera viga expuestos al viento y sobre las partes no abrigadas de los situados detrás se calcula por medio de los coeficientes de forma apropiados.

Los coeficientes de forma de las partes abrigadas se multiplicarán por un coeficiente η dado en la tabla expuesta a continuación. Los valores de η varían en función de los coeficientes de superficie neta y de las separaciones definidos a continuación:

$$\frac{A}{A_e} = \frac{\text{superficie de las partes sólidas}}{\text{superficie total}} \quad \text{Ecuación (4.9)}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{\text{distancia entre caras opuestas}}{\text{altura del elemento cara al viento}} \quad \text{Ecuación (4.10)}$$

Tabla 4.4: Coeficiente multiplicador de pantalla η						
Coeficiente de separación a/b	Coeficiente de superficie neta A/A_e					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	0,75	0,40	0,32	0,21	0,15	0,10
1,0	0,92	0,75	0,59	0,43	0,25	0,10
2,0	0,96	0,80	0,63	0,50	0,33	0,20
4,0	1,00	0,88	0,76	0,66	0,55	0,45
5,0	1,00	0,95	0,88	0,81	0,75	0,68
6,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Cuando haya varias vigas o marcos idénticos y situados a intervalos regulares, uno detrás de otro, de manera que cada celosía abriga a los que se encuentran detrás de él, se supone que el efecto pantalla aumenta hasta el noveno marco y después queda constante.

Las cargas debidas al viento, se calculan con ayuda de las fórmulas siguientes:

- Sobre el primer marco:

$$S_{w1} = A \cdot p \cdot C_F \quad \text{Ecuación (4.11)}$$

- Sobre el segundo marco:

$$S_{w2} = \eta \cdot A \cdot p \cdot C_F \quad \text{Ecuación (4.12)}$$

- Sobre el n -simo marco (para los 9 primeros):

$$S_{wn} = \eta^{(n-1)} \cdot A \cdot p \cdot C_F \quad \text{Ecuación (4.13)}$$

- Sobre el n -simo marco (a partir del décimo):

$$S_{wn} = \eta^8 \cdot A \cdot p \cdot C_F \quad \text{Ecuación (4.14)}$$

4.4.4 Cargas producidas por el viento de servicio

Para determinar la acción del viento sobre la pluma se deberán coger las áreas de los diferentes perfiles usados, ya que constituyen la superficie neta que ofrece la estructura al paso del viento. La superficie neta cara al viento se calcula sumando la superficie de cada barra.

La presión del viento sobre la pluma se obtiene de la tabla siguiente:

Tabla 4.5: Velocidad y presión del viento			
Tipo de grúa	Velocidad (m/s)	Presión	
		(N/m²)	(kPa)
Grúas fácilmente protegibles contra la acción del viento y concebidas para utilizarse exclusivamente con viento ligero	14	125	0,125
Todos los tipos normales de grúas que se instalan al aire libre	20	250	0,250
Grúas de tipo portuario que deben poder continuar funcionando incluso en caso de viento fuerte	28,5	500	0,500

Para poder determinar el esfuerzo que el viento produce sobre la estructura aplicamos la ecuación (4.13) para cada uno de los marcos. Todos los factores necesarios se obtienen de las tablas ya vistas o de la geometría de la estructura y de los perfiles.

4.4.5 Cargas producidas por el viento fuera de servicio

En estas condiciones la grúa no puede trabajar, por lo que este esfuerzo se considerará en el caso III, donde se contemplan las solicitudes excepcionales.

Como los coeficientes usados en las fórmulas del cálculo de la carga de viento sólo dependen de las características estructurales y geométricas de la grúa, todos ellos tienen el mismo valor que en el caso anterior.

El único factor que nos diferencia la fuerza del viento en servicio y la fuerza del viento fuera de servicio es la presión expuesta en la tabla siguiente:

Tabla 4.6: Velocidad y presión del viento máximo			
Altura sobre el suelo	Velocidad (m/s)	Presión	
		N/m²	kPa
0 a 20	36	800	0,8
20 a 100	42	1.100	1,1
Más de 100	46	1.300	1,3

Tomando de inicio la ecuación (4.13) por ser la más general, y despejando los valores conocidos tenemos:

$$\left. \begin{array}{l} S_{Wn} = \eta^{(n-1)} \cdot A \cdot p \cdot C_F \\ S_{W_{max-n}} = \eta^{(n-1)} \cdot A \cdot p_{MAX} \cdot C_F \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{S_{Wn}}{p} = \eta^{(n-1)} \cdot A \cdot C_F \\ \frac{S_{W_{max-n}}}{p_{MAX}} = \eta^{(n-1)} \cdot A \cdot C_F \end{array} \right. \quad \text{Ecuación (4.15)}$$

Como todos los coeficientes tienen los mismos valores podemos igualar las dos ecuaciones y despejando obtenemos la formula para la fuerza del viento fuera de servicio en el marco n-simo:

$$\frac{S_{Wn}}{p} = \frac{S_{W_{max-n}}}{p_{MAX}} \Rightarrow S_{W_{max-n}} = \frac{p_{MAX}}{p} \cdot S_{Wn} \quad \text{Ecuación (4.16)}$$

Así, si ya hemos calculado la fuerza del viento en servicio de una estructura determinada, el cálculo de la fuerza del viento fuera de servicio, para la misma estructura, es casi inmediato.

4.5 HIPOTESIS ADOPTADAS

En el programa realizado en Matlab se consideraran las siguientes hipótesis de carga:

- Hipótesis I. Caso I: El aparato en servicio sin viento y con la máxima carga permitida en la punta de la pluma.
- Hipótesis II. Caso II: El aparato en servicio con viento de servicio y con la máxima carga permitida en la punta de la pluma.
- Hipótesis III. Caso III: El aparato fuera de servicio con viento fuera de servicio.

Para cada una de las anteriores hipótesis se calculará el vector de cargas, que se introducirá en el programa de cálculo. Con los resultados obtenidos para cada hipótesis se calculará la estructura.

5. PROGRAMA EN MATLAB

5.1 INTRODUCCION

5.1.1 Matlab

Matlab es un entorno de cálculo técnico, que se ha convertido en estándar de la industria, con capacidades no superadas en computación y visualización numérica, de forma coherente y sin ningún tipo de fisuras. Este sistema integra los requisitos claves de un sistema de computación técnico:

- Cálculo numérico.
- Gráficos.
- Herramientas para aplicaciones específicas
- Capacidad de ejecución en múltiples plataformas.

Matlab dispone también en la actualidad de un amplio abanico de programas de apoyo especializados, denominados Toolbox (cajas de herramientas), los cuales extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos Toolbox cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la Ingeniería y la Simulación, destacando entre ellos el Toolbox de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neurales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc.

Esta familia de productos proporciona al usuario un medio de carácter único, para resolver los problemas más complejos y difíciles.

5.1.2 Origen del Matlab

Matlab nace como una solución a la necesidad de mejores y más poderosas herramientas de cálculo para resolver problemas de complejos en los que es necesario aprovechar las amplias capacidades de proceso de datos de grandes computadores.

El nombre Matlab viene de "MATrix LABoratory" (laboratorio matricial). Matlab fue originalmente escrito para proveer acceso fácil al software matricial desarrollado por los proyectos LINPACK y EISPACK, que juntos representan el software para computación matricial.

Hoy en día, Matlab es usado en una variedad de áreas de aplicación, incluyendo procesamiento de señales e imágenes, diseño de sistemas de control, ingeniería financiera e investigación médica.

La arquitectura abierta facilita usar Matlab y los productos que lo acompañan para explorar datos y crear herramientas personalizadas que proveen visiones profundas y ventajas competitivas.

5.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA

5.2.1 Introducción

El funcionamiento del programa desarrollado es igual para cualquiera de las estructuras posibles, diferenciándose únicamente en los datos de entrada: Cantidad de barras, longitudes y ángulos de cada una, altura de la torre, longitud de la pluma, carga a elevar, peso de los mecanismos necesarios, etc.

El programa de cálculo matricial se ha desarrollado por el método de las sub-funciones o método de la familia. Este método consiste en que cada función puede ser una función “padre” que va llamando a otras funciones, denominadas “hijas”. Esto agiliza el proceso de cálculo, ya que la programación es más sencilla.

El problema total se divide en problemas más sencillos con cada sub-función. Además, la gran ventaja que presenta este método es que las sub-funciones programadas son reutilizables, pudiéndose usar la misma para resolver un mismo problema en dos situaciones diferentes.

5.2.2 Consideraciones iniciales

Hay que indicar que separaremos el cálculo de la estructura de la grúa en dos pasos. Se hace esta simplificación, porque facilita enormemente el ensamblaje de las matrices de cada módulo para formar la matriz total de la estructura.

Primer paso: Realizaremos el cálculo de la estructura pluma-contrapluma, tomando los puntos de unión con la torre como empotramientos. Sobre esta estructura aplicaremos las condiciones de cada una de las hipótesis elegidas y obtendremos como resultado los perfiles necesarios para su construcción.

Segundo paso: Realizaremos el cálculo de la torre, colocando en los puntos de unión con la pluma las reacciones obtenidas en los empotramientos del paso anterior. Sobre esta estructura también aplicaremos las condiciones de cada una de las hipótesis elegidas y obtendremos como resultado los perfiles necesarios para su construcción.

Así, nos quedan dos estructuras “lineales”. La pluma, que se forma añadiendo nuevos módulos a la derecha de los anteriores, y la torre, añadiendo módulos en la parte superior de los anteriores. Esto hace que el ensamblaje de las matrices sea más sencillo.

5.2.3 Definición de una barra

Para la definición de una barra usaremos una matriz fila y en sus columnas indicaremos los valores necesarios para la composición de su matriz de rigidez:

$$\text{Barra} = (A, E, G, I_X, I_Y, J, L, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \alpha_3, \beta_3, \gamma_3, n_1, n_2); \quad \text{Ecuación (5.1)}$$

Estos valores, más adelante veremos qué son, pueden dividirse en dos tipos:

- Definidos por el tipo de perfil: A, I_x , I_y y J
- Definidos por la barra: E, G, L, α_1 , β_1 , γ_1 , α_2 , β_2 , γ_2 , α_3 , β_3 , γ_3 , n_1 y n_2

Para continuar la programación, usaremos unos valores definidos por el tipo de perfil fijos, más adelante ya crearemos la manera de modificarlos según necesidad. Los datos de los valores definidos por la barra podemos verlos en el apartado 3 de este proyecto. Además, faltan de añadir otros valores necesarios para el cálculo resistente: S, W_x , W_y , W_z , i, peso. Cuando hagan falta, ya veremos la manera de añadirlos.

5.2.4 Matriz de rigidez de una barra en globales

Creamos una función que nos genere la matriz de rigidez de la barra en coordenadas globales. Para esto llamaremos a dos funciones:

La primera función tomara los datos necesarios de la matriz fila que define la barra y nos generara la matriz de rigidez de la barra en coordenadas locales. Esto se consigue usando la ecuación (2.6) vista en el apartado de cálculo matricial.

La segunda función tomara los datos de los ángulos de la matriz fila que define la barra y nos generara la matriz de cambio de coordenadas. Esto se consigue usando las ecuaciones (2.9) y (2.11) vistas en el apartado de cálculo matricial.

Con la matriz en locales y la matriz de cambio calculamos la matriz en globales mediante la ecuación (2.15).

5.2.5 Definición de un módulo

Para definir un módulo de la grúa usaremos una matriz, siendo cada fila una de sus barras:

$$\text{Modulo} = \begin{pmatrix} \text{Barra}_1 \\ \text{Barra}_2 \\ \vdots \\ \text{Barra}_N \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación (5.2)}$$

Para cada uno de los módulos crearemos una matriz de barras, y las generaremos mediante una función que las pida a partir de un número. Este número, que podrá ir del 0 al 7, se corresponde con la numeración de los módulos vista en el apartado 3 de este proyecto.

5.2.6 Matriz de rigidez de cada módulo

Una vez obtenida la matriz de barras de un módulo, lo primero que hacemos, es un barrido por las dos últimas columnas para obtener el número total de nudos.

Multiplicamos ese valor por 6, los grados de libertad de cada nudo, y creamos una matriz de ceros cuadrada con el tamaño del número de grados de libertad obtenidos.

Tras esto, tomamos la primera barra, la primera fila de la matriz de barras, y calculamos su matriz de rigidez en coordenadas globales. Esta matriz se divide en las cuatro sub-matrices que la forman.

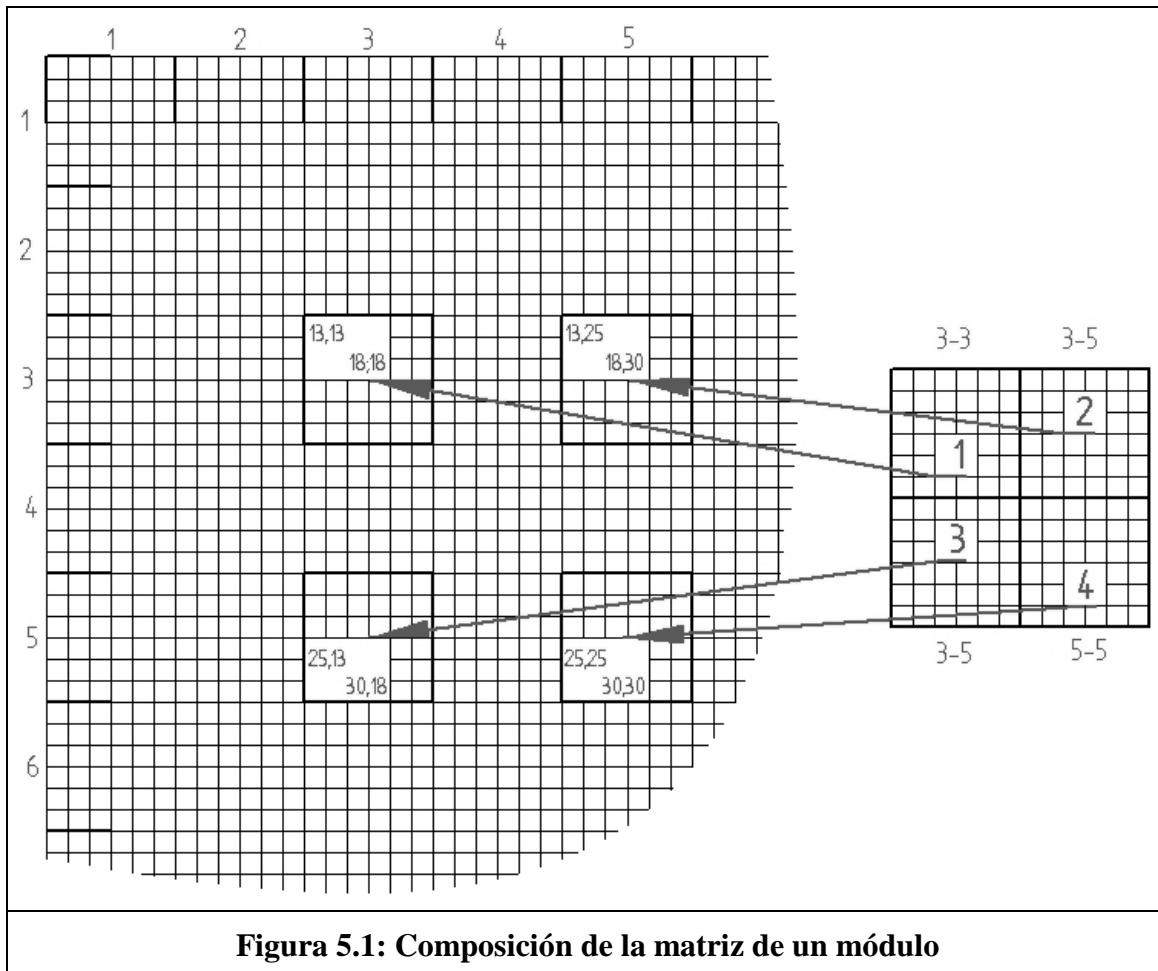
Ahora es donde entran en juego la numeración de los dos nudos de la barra. Estos valores nos indican la posición en la que se han de insertar las sub-matrices de rigidez de la barra en la matriz de rigidez del módulo.

Así, si una barra une los nudos 3 y 5, calculamos los grados de libertad iniciales de las sub-matrices multiplicando por 6 y restando 5. Nos quedan 13 y 25, las sub-matrices se incluirán entre los siguientes grados de libertad:

- Sub-matriz 1: (13,13;18,18)
- Sub-matriz 2: (13,25;18,30)
- Sub-matriz 3: (25,13;30,18)
- Sub-matriz 4: (25,25;30,30)

Para entenderlo mejor, puede verse un dibujo explicativo en la figura 5.1.

Realizando este proceso con todas las barras obtendremos la matriz de rigidez del módulo.

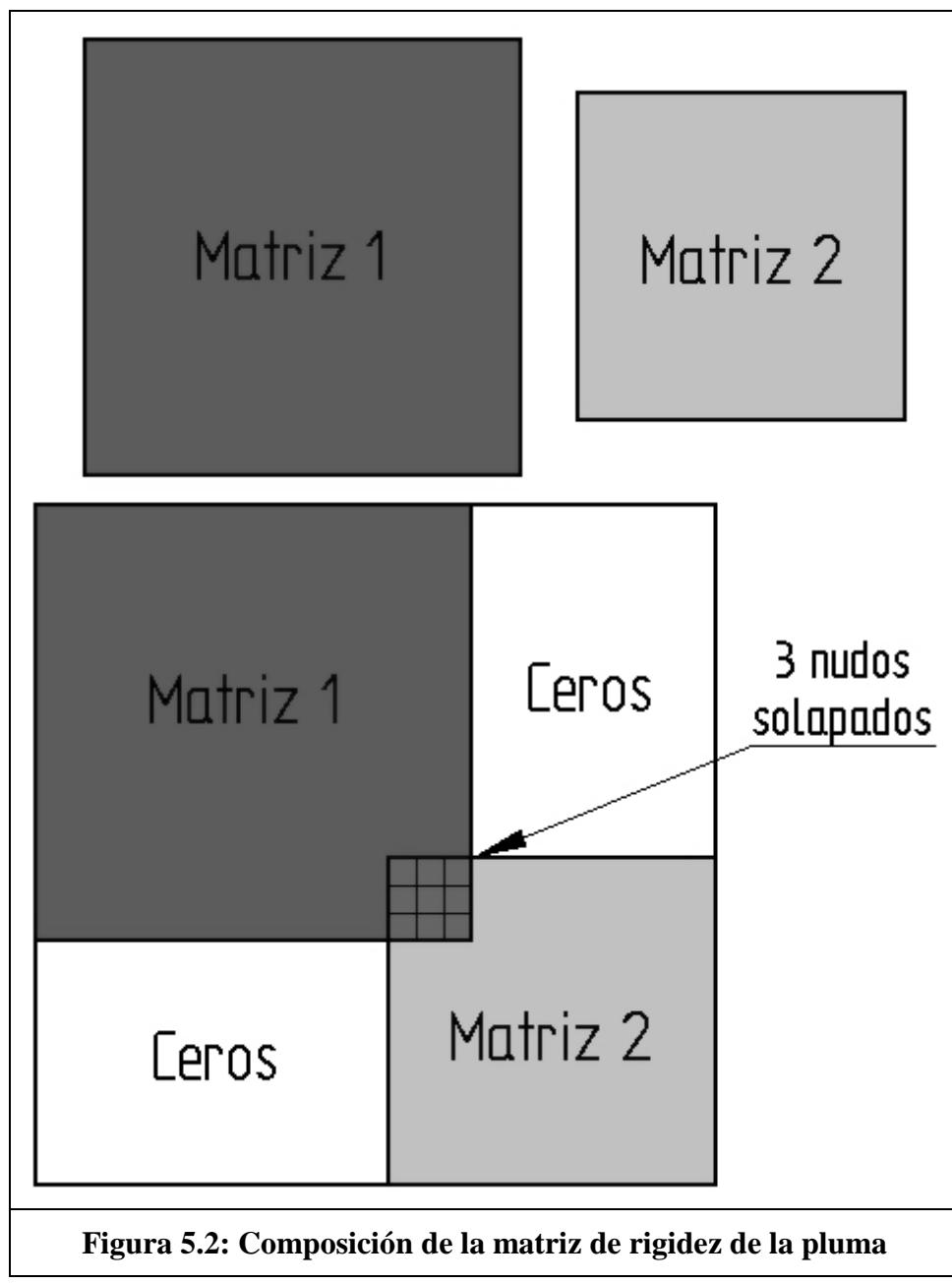


5.2.7 Matriz de rigidez de la pluma

Como ya se explicó en el apartado 3 de este proyecto, la numeración de los módulos se realizaba de manera que, los tres primeros nudos fueran los de la izquierda y los tres últimos los de la derecha.

La unión entre módulos se realiza mediante esos seis nudos, que pasan a ser solamente tres en la estructura total. De manera que hay que para unir las matrices de rigidez hay sumar los valores de esos 18 grados de libertad, 3 nudos, que se unen.

Como los valores que hay que sumar están en las esquinas de cada matriz de rigidez, debido a la numeración empleada, bastara con solapar las matrices y dejar el resto de valores en 0. La figura siguiente indica este solapamiento:



Al programa se le proporcionara como uno de los datos iniciales una matriz fila que llevará de una manera ordenada los números de los módulos que se han de usar, a partir de esa matriz se procederá como sigue.

$$\text{Pluma} = (4, 1, 0, 1, 1, 1, 2, 3, 3, 3, 6); \quad \text{Ecuación (5.3)}$$

Se toma el primer número, se pide su matriz de barras y se calcula su matriz de rigidez. Se hace lo mismo con el segundo número y se solapan las dos matrices.

Además de solapar las matrices de rigidez, también uniremos las matrices de barras, para que al final tengamos una única matriz con todas las barras de la pluma.

Para poder realizar esto correctamente tendremos que tener dos variables, una que controle el número de nudos y otra el número de barras que llevamos. Usando estas variables podremos renombrar el valor de los nudos y las barras para conseguir el solapamiento y la unión explicados arriba:

$$\begin{array}{l} \text{modulo 4} \left\{ \begin{array}{l} \text{barras 1 - 33} \rightarrow \text{barras 1 - 33} \\ \text{nudos 1 - 18} \rightarrow \text{nudos 1 - 18} \end{array} \right. \\ \text{modulo 1} \left\{ \begin{array}{l} \text{barras 1 - 50} \rightarrow \text{barras 34 - 83} \\ \text{nudos 1 - 20} \rightarrow \text{nudos 16 - 36} \end{array} \right. \\ \text{modulo 0} \left\{ \begin{array}{l} \text{barras 1 - 14} \rightarrow \text{barras 84 - 97} \\ \text{nudos 1 - 7} \rightarrow \text{nudos 34 - 41} \end{array} \right. \end{array} \left. \begin{array}{l} \text{SOLAPAMIENTO} \\ \text{barras 1 - 83} \\ \text{nudos 1 - 36} \\ \text{SOLAPAMIENTO} \\ \text{barras 1 - 97} \\ \text{nudos 1 - 41} \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación (5.4)}$$

Se continúa calculando la matriz de rigidez del tercer número, renombrando sus valores, solapándola con la obtenida a partir del primer y segundo número y añadiendo sus barras a la matriz total de barras. Se continúa hasta solapar y unir las matrices de todos los números de la matriz fila introducida como dato de partida.

5.2.8 Valores variables de los perfiles de la pluma

Antes de pasar a la programación de las diferentes hipótesis, explicaremos unos cambios introducidos en la definición de las barras y la aparición de nuevas variable para controlar las características de los perfiles.

Como las características inicialmente incluidas en las barras, van a ir cambiando según el perfil que se use, decidimos que, en las definiciones de las barras, se incluyan solamente las características fijas, las que no varíen con el perfil usado. Para las demás características utilizaremos una nueva variable, que variara según el perfil que se este utilizando.

Además, a esta última variable, añadiremos las características resistentes que se nos había olvidado incluir en la definición inicial de la barra (S, W_x, W_y, W_z, i y peso).

La definición de la barra nos quedará de la siguiente manera:

$$\text{Barra} = (p, E, G, L, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \alpha_3, \beta_3, \gamma_3, n_1, n_2); \quad \text{Ecuación (5.5)}$$

Donde:

- p: Es un número que nos indicara el tipo de perfil de la barra:
 - 1: Perfil circular hueco.
 - 2: Perfil circular macizo.
 - 3: Perfil cuadrado hueco.
- E: Módulo de elasticidad, para este proyecto vale $2.1 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$.
- G: Módulo de elasticidad a torsión, vale $8.05 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$.
- L: Longitud de la barra en m.
- $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$: Ángulos que forma el eje X_L con los ejes globales en grados.
- $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$: Ángulos que forma el eje Y_L con los ejes globales en grados.
- $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$: Ángulos que forma el eje Z_L con los ejes globales en grados.
- n_1, n_2 : Nudos de inicio y final de la barra

A la hora de construir la matriz de rigidez de la barra, es la propia función, que creamos en Matlab, la que se encargará de convertir la longitud de la barra a cm y los ángulos a radianes.

Para cada uno de los tres tipos de perfiles usados, crearemos una matriz en la que cada línea será un perfil de mayor área cada vez y las columnas serán las características necesarias:

$$\text{Perfil} = (A, S, I_Z, I_Y, W_Z, W_Y, i, I_X, W_X, P, d, e, p); \quad \text{Ecuación (5.6)}$$

Donde:

- A: Área del perfil en cm^2 .
- S: Momento estático del perfil para media sección en cm^3 .
- I_Y, I_Z : Momentos de inercia del perfil respecto a los ejes Y y Z en cm^4 .
- W_Y, W_Z : Momentos de inercia del perfil respecto a Y y Z en cm^3 .
- i: Radio de giro del perfil en cm.
- I_X : Momento de inercia del perfil respecto a X en cm^4 .
- W_X : Momento estático del perfil respecto a X en cm^3 .
- P: Peso por metro de perfil en kg/m .
- d: Diámetro o lado del perfil, según el tipo en cm.
- e: Espesor del perfil en cm (no se incluye en los círculos macizos).
- p: Designación del perfil.

$$\text{Tabla_Perfiles} = \begin{pmatrix} \text{Perfil}_1 \\ \text{Perfil}_2 \\ \vdots \\ \text{Perfil}_N \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación (5.7)}$$

La ordenación de los perfiles se hace de menor a mayor área porque cuando el primer perfil no sea válido, tomaremos el inmediatamente siguiente. Y así obtendremos la estructura menos pesada y más económica que pueda soportar los esfuerzos a los que estará sometida.

Para controlar los perfiles usaremos una matriz fila de tres columnas, una para cada tipo de perfil. Cada una de ellas contendrá un número. Este número será la fila de la tabla del perfil en la que estamos actualmente.

Cuando un perfil no cumpla las solicitudes a las que está sometido, aumentaremos una unidad el número del perfil que corresponda en esta variable para, en el siguiente bucle, aumentar ese tipo de perfil.

A parte de esta variable de control, necesitaremos otras variables que contengan las características del perfil tomadas de su tabla, para realizar los cálculos y comprobaciones necesarias.

Al introducir estos cambios, deberemos modificar parte de las funciones realizadas con anterioridad. Esto no tiene ninguna complejidad y las funciones continúan teniendo los mismos finos que antes.

5.2.9 Cálculo de libertades y reacciones de la pluma

Como ya hemos dicho anteriormente, la pluma está empotrada en los nudos en los que se une con la torre. Los grados de libertad de esos nudos serán las reacciones y el resto de grados de libertad serán las libertades.

En principio podría parecer que esos valores fueran fijos, pero no es así. Si la pluma tiene más de 50 metros, la contrapluma tiene 20 en lugar de 10. Solucionamos esto con una variable que pueda tomar los valores de 0, para plumas de 50 o menos metros, y 1, para plumas de más de 50 metros.

Según el valor de la anterior variable asignaremos unos u otros valores a las reacciones y libertades de la pluma, que así, quedarán definidas para el resto del programa.

5.2.10 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis I de la pluma

Crearemos una función que haga los siguientes pasos con las cargas:

Colocamos la mitad de la carga de servicio con signo negativo en el segundo grado de libertad, en la dirección del eje Y_G , de los 2 penúltimos nudos de la estructura. El último nudo es la punta del módulo 5 o 6 y allí no llega el carro. Esta carga hay que mayorarla con el coeficiente dinámico de elevación que obtendremos en el programa de Visual Basic.

La carga del equipo de elevación, valor que obtendremos en el programa de Visual Basic, la repartiremos con signo negativo en el segundo grado de libertad de los nudos 10, 11, 12 y 13 de la estructura, bajo la pirámide del módulo 4.

Para calcular el peso propio de la pluma, usaremos la matriz de barras de la estructura total. Iremos tomando cada una de las filas, multiplicando la longitud de la barra por el peso por metro del perfil que corresponda, y repartiendo el resultado entre los segundos grados de libertad de los dos nudos que tenga esa barra.

A parte de esto último, tendremos dos variables que nos irán sumando los pesos para obtener el peso total de la pluma y el peso total de la contrapluma.

Calculamos el lastre mediante la ecuación 4.9 y se reparte por igual entre los nudos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 y 9 de la estructura, la parte plana del módulo 4.

Una vez obtenido el vector completo, le aplicaremos el coeficiente de mayoración γ_C que nos vendrá dado por el programa de Visual Basic.

5.2.11 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis II de la pluma

La primera parte del vector de cargas se calcula exactamente igual que el anterior. A esto hay que añadirle las cargas que genera el viento. Estas las calcularemos con una función aparte y luego sumaremos los dos vectores obtenidos.

La función viento va llamando a cada uno de los módulos de la grúa por separado y calcula los esfuerzos que genera el viento en cada uno de sus marcos, como se indica en el apartado 4.4 de este proyecto.

A partir de los datos de los perfiles, de los datos de las barras y la presión y la velocidad del viento, se calcula los diversos coeficientes y finalmente el valor del esfuerzo que genera el viento en toda la longitud de la barra.

La función programada calcula los esfuerzos en todas las barras y los reparte entre los terceros grados de libertad, en la dirección del eje Z_G , de los dos nudos que unen.

Al no ser una estructura simétrica, esto se ve sobre todo en la zona de la contrapluma, se realizó un cálculo añadiendo estos esfuerzos con signo negativo y otro con signo positivo. Obtuviómos que el signo positivo generaba unos desplazamientos mayores y por tanto tensiones más grandes, por lo que, al ser más desfavorable, mantuvimos este sentido del viento.

Una vez calculado el vector de cargas que produce el viento, se le suma el vector de cargas producidas por los elementos.

Esta suma ha de hacerse después de la aplicación del coeficiente γ_C .

5.2.12 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis III de la pluma

El vector de cargas producidas por los elementos se calculará igual que en los anteriores casos, pero con dos pequeñas modificaciones: La carga de servicio no se debe incluir y no se debe de usar el coeficiente de mayoración γ_C .

Para no tener que crear funciones nuevas, añadimos una variable de valor 1 en las dos primeras hipótesis y 0 en la tercera, de manera que las dos operaciones expuestas arriba solo se realicen cuando esta variable sea distinta de 0.

El cálculo del vector de cargas producidas por el viento se realizará igual que en el caso de la segunda hipótesis, pero los valores de la presión y la velocidad del viento se tomarán mayores, tal como indica la normativa.

Como en la segunda hipótesis, se sumarán estos dos vectores para obtener el vector de cargas total para esta hipótesis.

5.2.13 Cálculo de los desplazamientos y las reacciones de la pluma

Una vez obtenidos la matriz de rigidez global, las libertades y reacciones y el vector de cargas total, el cálculo de los desplazamientos y las reacciones de la estructura, se puede hacer directamente mediante operaciones matriciales.

Las fórmulas a utilizar y el método a seguir ya se explicó en el apartado 2.2.8 de este proyecto.

5.2.14 Cálculo de los esfuerzos en las barras de la pluma

Para cada una de las barras de la estructura, calculamos su matriz de rigidez en locales y su matriz de cambio. Para ello usamos llamadas a las mismas funciones explicadas antes.

Con esos dos elementos, y los desplazamientos correspondientes a los dos nudos de la barra que estemos estudiando, para obtenerlos basta con tomar del vector de desplazamientos total los 6 grados de libertad de cada uno de los nudos, calculamos los esfuerzos en los dos extremos de la barra.

Para ello utilizaremos las fórmulas vistas en el apartado 2.2.9 de este proyecto.

5.2.15 Cálculo resistente de las barras de la pluma

Crearemos una función que se dedique a comprobar cada barra en sus dos nudos dado que, al no haber cargas en la barra, la sección más desfavorable estará en uno de ellos.

Habrá una variable que comenzara con valor (1, 1, 1), indicando que todos los perfiles son válidos. Si durante el cálculo resistente alguna barra no soporta las acciones a las que está sometida, modificaremos la variable colocando un 0 en la posición del perfil de la barra.

La función se continuará ejecutando. Barra a barra, hasta que todas las barras se han comprobado o ninguno de los perfiles aguanta las solicitudes a las que está sometido, la variable habrá tomado el valor (0, 0, 0).

Una vez finalizada la función, se comprobará la variable. Si todos los valores son 1, los perfiles comprobados serán los definitivos. Si algún valor de la variable es 0, habrá que aumentar la posición de ese perfil en la tabla de perfiles que le corresponda y volver a realizar todo el cálculo: Nuevas matrices de rigidez, nuevos vectores de carga, nuevos desplazamientos y nuevos esfuerzos en las barras.

Las fórmulas usadas para el cálculo resistente son las siguientes:

- Tracción/Compresión: $\sigma_N = \omega \frac{N}{A}$ Ecuación (5.8)
- Cortantes:
$$\begin{cases} \tau_{CY} = \frac{V_Y \cdot m}{e \cdot I_Y} \\ \tau_{CZ} = \frac{V_Z \cdot m}{e \cdot I_Z} \end{cases}$$
 Ecuación (5.9)
- Momentos flectores:
$$\begin{cases} \sigma_Y = \frac{M_Y}{W_Y} \\ \sigma_Z = \frac{M_Z}{W_Z} \end{cases}$$
 Ecuación (5.10)
- Momento torsor: $\tau_T = \frac{M_x \cdot e}{I_x}$ Ecuación (5.11)
- Tensiones compuestas:
$$\begin{cases} \sigma = \sigma_N + \sigma_Y + \sigma_Z \\ \tau_Y = \tau_{CY} + \tau_T \\ \tau_Z = \tau_{CZ} + \tau_T \end{cases}$$
 Ecuación (5.12)
- Tensión de Von-Misses: $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot (\tau_Y^2 + \tau_Z^2)}$ Ecuación (5.13)

Si cualquiera de los resultados obtenidos en las ecuaciones de arriba es mayor que la tensión admisible del acero usado, el perfil no será valido.

Para el cálculo de la ω en el esfuerzo de compresión, usaremos una función aparte. A esta función, que tendrá una tabla con todos los valores de ω , se le entregara el valor de λ de la barra y devolverá el valor correspondiente de ω .

5.2.16 Matriz de rigidez de la torre

A partir de la altura de la torre, que es un valor de entrada dado por el programa de Visual Basic, y sabiendo que cada módulo tiene dos metros de alto, calculamos el número de módulos que necesitaremos usar. Crearemos una matriz fila, con tantas columnas como ese número calculado, que nos definirá la estructura de la torre:

$$\text{Torre} = (7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7); \quad \text{Ecuación (5.14)}$$

Al intentar proceder como antes, solapando las diferentes matrices de rigidez de los módulos, observamos que la función utilizada en la pluma no sirve para la torre, ya que en esta última se solapan 4 nudos.

Para no tener que realizar una nueva función, incluiremos una variable que nos indique el número de nudos a solapar, 3 para la pluma y 4 para la torre. Con unas ligeras modificaciones en la función que realiza el solapamiento de las matrices y en las llamadas a ésta, queda solucionado el problema.

5.2.17 Valores de los perfiles, libertades y reacciones de la torre

Para llevar la cuenta de la fila de la tabla de los perfiles en la que nos encontramos y poder obtener sus características, crearemos dos nuevas variables del mismo estilo a las usadas para los perfiles de la pluma.

El cálculo de las libertades y reacciones de la torre puede hacerse directamente. Los grados de libertad de los cuatro primeros nudos serán siempre reacciones, ya que éstos están empotados en el suelo, y el resto de grados de libertad serán libertades.

5.2.18 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis I de la torre

Para calcular el peso propio de la torre, usaremos la matriz de barras de la estructura total. Iremos tomando cada una de las filas, multiplicando la longitud de la barra por el peso por metro del perfil que corresponda y repartiendo el resultado entre los dos nudos que contiene esa barra.

Aparte de esto ultimo, tendremos una variable que nos irá sumando los pesos para obtener el peso total de la torre.

Una vez obtenido el vector completo, le aplicaremos el coeficiente de mayoración γ_C , que nos vendrá dado por el programa de Visual Basic.

En los grados de libertad de los últimos cuatro nudos de ese vector ya mayorado, habrá que aplicar las reacciones obtenidas en el empotramiento del cálculo de la primera hipótesis de la pluma.

5.2.19 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis II de la torre

El vector total de cargas se consigue sumando las cargas originadas por el peso propio, las reacciones obtenidas en la segunda hipótesis de la pluma y las cargas generadas por el viento.

Para el cálculo de las dos primeras solicitudes utilizaremos la misma función que en la hipótesis anterior pero usando distintas reacciones, las obtenidas en el empotramiento del cálculo de la segunda hipótesis de la pluma.

Para las cargas generadas por el viento, podremos usar la misma función utilizada en la pluma, siempre que definamos una sub-función con las características de las barras del módulo 7.

5.2.20 Cálculo del vector de cargas para la hipótesis III de la torre

El vector total de cargas se consigue sumando las cargas originadas por el peso propio, las reacciones obtenidas en la tercera hipótesis de la pluma y las cargas generadas por el viento.

Para el cálculo de las dos primeras solicitudes utilizaremos la misma función que en la hipótesis anterior pero usando distintas reacciones, las obtenidas en el empotramiento del cálculo de la segunda hipótesis de la pluma.

En esta tercera hipótesis, el vector de cargas no debe ser mayorado por γ_C . Por lo que, al igual que en la función de la pluma, añadiremos una variable para distinguir cuando se ha de multiplicar el vector por γ_C y cuando no.

Para las cargas generadas por el viento, podremos usar la misma función utilizada en la pluma, siempre que definamos la sub-función para el módulo 7 y tengamos en cuenta que la presión y velocidad del viento son distintas que en la hipótesis anterior.

5.2.21 Desplazamientos, reacciones y esfuerzos en las barras de la torre

Para estos cálculos podemos usar exactamente las mismas funciones y fórmulas que las utilizadas para los cálculos de la pluma.

5.2.23 Cálculo resistente de las barras de la torre

Para este cálculo podemos usar exactamente la misma función que la utilizada para los cálculos de la pluma, con una matización: En torre sólo se usan dos tipos de perfiles, y la función para la comprobación de las barras esta preparada para utilizar una variable de 3 columnas, una para cada tipo de perfil.

Lo que haremos será, igual que en la comprobación de las barras de la pluma, utilizar una variable de tres columnas dándole el valor inicial de (1, 1, 1).

Como el perfil macizo no se usa en la torre, nunca se modificará, en valor de la columna central y nunca será necesario aumentarlo. Por tanto, continuaremos ejecutando la función hasta que todas las barras se hayan comprobado o la variable haya tomado el valor (0, 1, 0), con lo que ninguno de los perfiles utilizados en la torre aguante las solicitudes a las que esta sometido.

Si, al finalizar la función, algún valor de la variable es 0, habrá que aumentar ese perfil y volver a realizar todo el cálculo.

5.2.24 Dibujo de la deformada de la grúa

Una vez completados todos los cálculos y obtenidos los desplazamientos de todos los grados de libertad de todos los nudos para cada una de las tres hipótesis, podemos dibujar la deformada de la grúa.

Crearemos una función que procese los desplazamientos necesarios y llame con ellos a sub-funciones, una para cada uno de los módulos.

En estas sub-funciones están definidas las posiciones de cada nudo, con ellas dibujará la grúa en posición estática y, aplicándoles los diferentes desplazamientos, dibujará la deformada de la grúa para cada una de las hipótesis en diferentes colores.

5.2.25 Pasos finales

Por ultimo, crearemos una función que, tomando las matrices y variables generadas a lo largo del programa, las opere y modifique. De manera que los datos devueltos por esta función, sean directamente los que tome el programa de Visual Basic como solución a la llamada realizada.

Además de todas las funciones indicadas en los puntos anteriores, hemos generado otras tres que son importantes y pasamos a explicar a continuación.

A la hora de crear las tablas de los tres tipos perfiles, usé los valores que vienen indicados en la norma NBE EA-95, anejos 2.A1 y 2.A2. Estos perfiles son insuficientes a la hora de dimensionar la grúa más solicitada, elevar 3 toneladas a 70 metros de longitud y a 40 metros de altura. Por ello creé una función para cada tipo de perfil de manera que, introduciendo el valor del diámetro o lado y el espesor en caso de ser necesario, me diera los valores que usaremos en el programa de ese perfil. De esta manera fui añadiendo nuevas líneas a la tabla de los perfiles hasta que la grúa más solicitada se podía resolver.

5.3 FUNCIONES DESARROLLADAS

5.3.1 Árbol genealógico del programa

En la página siguiente puede verse una figura con el árbol genealógico del programa. En él se incluyen todas las funciones programadas en su orden de llamada.

Además, en los siguientes puntos del presente proyecto puede encontrarse unos resúmenes de los nombres, acciones, entradas, salidas y llamadas de las funciones escritas para el funcionamiento del programa.

En los apéndices, podrá encontrarse el código de todas estas funciones al completo.

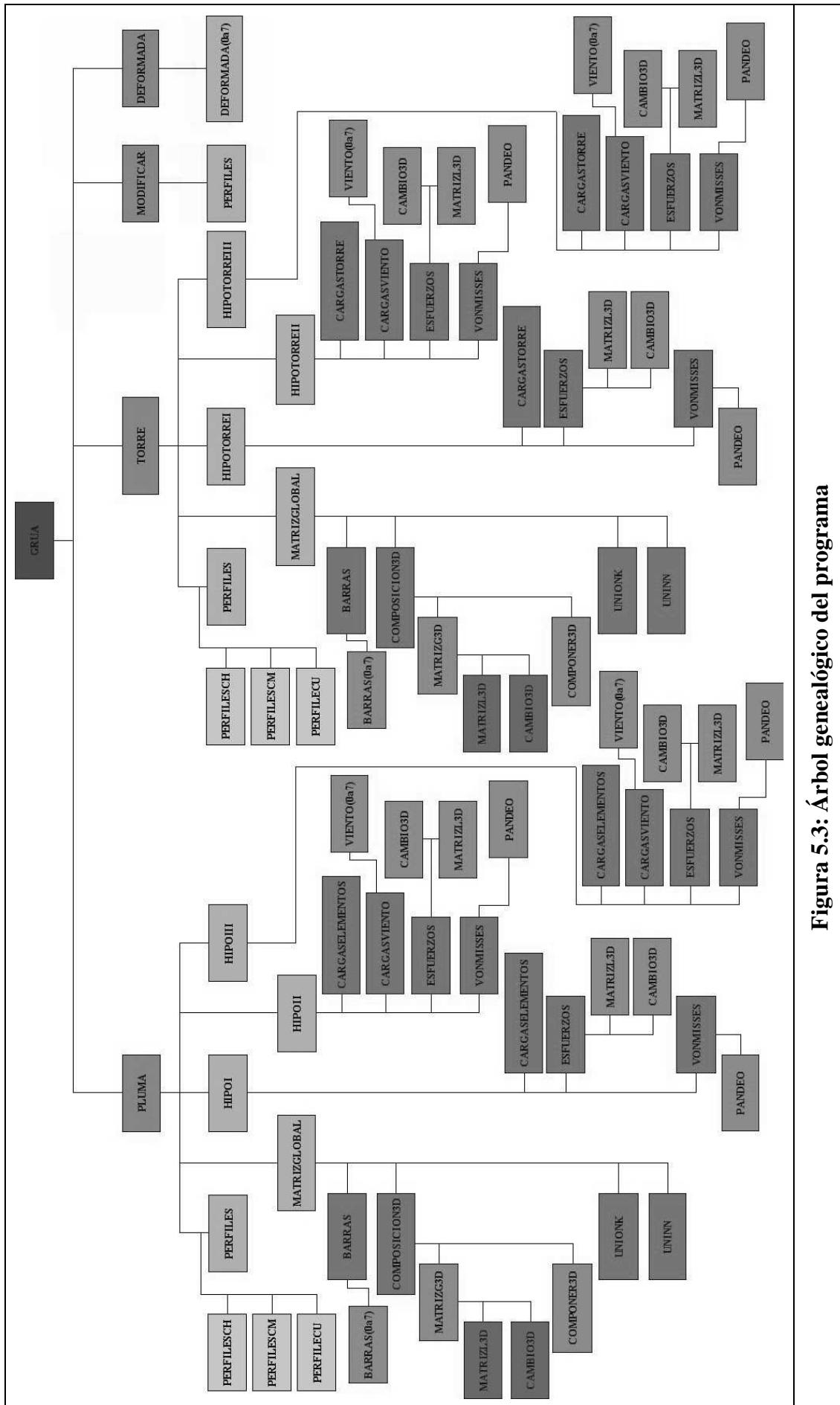


Figura 5.3: Árbol genealógico del programa

5.3.2 function [Result] = grua(a,P,Q,H,T,G,def1,def2,def3);

Función a la que llama el programa en Visual Basic. Aplica el coeficiente dinámico de elevación a la carga útil, llama a las funciones que calculan de dos estructuras, a la función que dibuja la deformada y a la función que prepara los datos de salida.

VALORES DE ENTRADA

- a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.
- P: Peso de la carga útil en punta de pluma.
- Q: Peso del equipo de elevación.
- H: Altura de la torre.
- T: Coeficiente dinámico de elevación ψ .
- G: Coeficiente de mayoración γ_c .
- def1, def2, def3: Indican de que hipótesis se dibujara la deformada.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

- [p,d,R,Lastre,PP,PCP,t,z] = pluma(a,P,Q,G); Ver apartado 5.3.3
- [p2,d2,PT,a2] = torre(H,R,t,G); Ver apartado 5.3.27
- [Result] = modificar(p,p2,d,d2,R,Lastre,PP,PCP,PT); Ver apartado 5.3.32
- [h] = deformada(a,a2,d,d2,z,'color'); Ver apartado 5.3.33

VALORES DE SALIDA

Result: Matriz fila con los datos que necesita el programa en Visual Basic.

Esta matriz incluye: Tipos de perfiles necesarios en la pluma y en la torre, desplazamientos máximos de la punta de la pluma, los distintos pesos calculados a lo largo del programa y el esfuerzo cortante y momento flector en la parte superior de la torre.

5.3.3 function [p,d,R,Lastre,PP,PCP,t,z] = pluma(a,P,Q,G);

Esta función asigna los perfiles iniciales de la pluma y realiza los bucles de las hipótesis necesarios para el cálculo de los perfiles finales de la estructura.

VALORES DE ENTRADA

- a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.
- P: Peso de la carga útil en punta de pluma aplicado ya el coeficiente ψ .
- Q: Peso del equipo de elevación.
- G: Coeficiente de mayoración γ_c .

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

- [ch,cm,cu] = perfiles(p); Ver apartado 5.3.4
- [K,n] = matrizglobal(a,ch,cm,cu,3); Ver apartado 5.3.8
- [v,d,R,r,l] = hipoI(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,G,z); Ver apartado 5.3.18
- [v,d,R] = hipoII(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,G,r,l,z); Ver apartado 5.3.23
- [v,d,Lastre,PP,PCP,R] = hipoIII(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,r,l,z); Ver apartado 5.3.26

VALORES DE SALIDA

- p: Variable que recoge la fila de la tabla en la que se encuentran los perfiles.

- d: Matriz con los desplazamientos obtenidos en las tres hipótesis.
 R: Matriz con las reacciones obtenidas en las tres hipótesis.
 Lastre: Peso del lastre.
 PP: Peso de la pluma.
 PCP: Peso de la contrapluma.
 t: Variable que usaremos para definir los perfiles iniciales de la torre.
 z: Variable que define si la contrapluma mide 10 o 20 metros.

5.3.4 function [ch,cm,cu] = perfiles(p);

Esta función se encarga de asignar a unas variables las características geométricas de cada uno de los tres perfiles distintos que usamos. Estos valores están agrupados por filas en matrices y ordenados de menor a mayor área.

VALORES DE ENTRADA

p: Variable que recoge la fila de la tabla en la que se encuentran los perfiles.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

- [p] = perfilesch(d,e); Ver apartado 5.3.5
 [p] = perfilescm(d); Ver apartado 5.3.6
 [p] = profilescu(L,e); Ver apartado 5.3.7

Para el cálculo de los valores de las matrices se ha realizado una función para cada uno de los perfiles, de manera que, introduciendo diámetros o lados y espesores devuelva todos los valores necesarios. Estas funciones se comentan a continuación aunque no pertenecen al programa propiamente dicho y se comentan en esta sección aunque no sean llamadas desde el programa por la función “perfiles”.

VALORES DE SALIDA

- ch: Vector con las características del perfil circular hueco.
 cm: Vector con las características del perfil circular macizo.
 cu: Vector con las características del perfil cuadrado hueco.

5.3.5 function [p] = perfilesch(d,e);

Calcula las características de un perfil circular hueco.

VALORES DE ENTRADA

- d: Diámetro del perfil.
 e: espesor del perfil.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

- p: Vector con las características del perfil introducido.

5.3.6 function [p] = perfilscm(d);

Calcula las características de un perfil circular macizo.

VALORES DE ENTRADA

d: Diámetro del perfil.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

p: Vector con las características del perfil introducido.

5.3.7 function [p] = perfilscu(L,e);

Calcula las características de un perfil cuadrado hueco.

VALORES DE ENTRADA

L: Lado del perfil.

e: espesor del perfil.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

p: Vector con las características del perfil introducido.

5.3.8 function [K,n] = matrizglobal(a,ch,cm,cu,union);

Por medio de diversas sub-funciones se calculan las barras y la matriz de rigidez de cada módulo de la pluma y contrapluma y se unen todos en una única matriz de barras y una única matriz de rigidez total.

VALORES DE ENTRADA

a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.

ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.

union: Variable que indica el número de nudos que se solapan.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[n] = barras(a); Ver apartado 5.3.9

[K1] = composicion3d(n1,ch,cm,cu); Ver apartado 5.3.11

[K1] = unionK(K1,K2,union); Ver apartado 5.3.16

[n] = unionN(n1, n2); Ver apartado 5.3.17

VALORES DE SALIDA

K: Matriz de rigidez total de la estructura.

n: Matriz con las características de todas las barras de la estructura.

5.3.9 function [n] = barras(a);

Hace una llamada a la función que obtiene los valores de las barras para el módulo concreto que se pide.

VALORES DE ENTRADA

a: Número que indica el tipo de módulo que se pide.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[n] = barras_X; Ver apartado 5.3.10

Siendo X un número, del 0 al 7, según el tipo de módulo al que se llame.

VALORES DE SALIDA

n: Matriz con las características de todas las barras del módulo que se pide.

5.3.10 function [n] = barras_X;

X es un número, del 0 al 7, que define el tipo de módulo que se va a calcular. La función obtiene los valores de las barras para el módulo de ese tipo.

VALORES DE ENTRADA

Ninguno.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

n: Matriz con las características de todas las barras del módulo X.

5.3.11 function [K] = composicion3d(n,ch,cm,cu);

Crea la matriz de rigidez de un módulo.

VALORES DE ENTRADA

n: Características de todas las barras del módulo que se están calculando.

ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[k] = matrizg3d(n,ch,cm,cu); Ver apartado 5.3.12

[K] = componer3d(K,k,x,y); Ver apartado 5.3.15

VALORES DE SALIDA

K: Matriz de rigidez del módulo del que se ha pedido el cálculo.

5.3.12 function [K] = matrizg3d(n,ch,cm,cu);

Calcula la matriz de rigidez de una barra respecto a los ejes globales.

VALORES DE ENTRADA

n: Características la barra que se está calculando.

ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[k] = matrizl3d (n,ch,cm,cu); Ver apartado 5.3.13

[R0] = cambio3d(n); Ver apartado 5.3.14

VALORES DE SALIDA

K: Matriz de rigidez de la barra de la que se ha pedido el cálculo en globales.

5.3.13 function [K] = matrizl3d(n,ch,cm,cu);

Calcula la matriz de rigidez de una barra respecto a los ejes locales.

VALORES DE ENTRADA

n: Características la barra que se esta calculando.

ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

K: Matriz de rigidez de la barra de la que se ha pedido el cálculo en locales.

5.3.14 function [R0] = cambio3d(n);

Calcula la matriz de cambio de una barra.

VALORES DE ENTRADA

n: Características la barras que se esta calculando.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

R0: Matriz de cambio de la barra de la que se ha pedido el cálculo.

5.3.15 function [K] = componer3d(K,k,a,b);

Introduce la matriz de rigidez de una barra dentro de la matriz total del módulo según los nudos de los que forme parte.

VALORES DE ENTRADA

- K: Matriz total del módulo, incompleta hasta el cálculo de la última barra.
- k: Matriz de rigidez de la barra.
- a: Posición del primer grado de libertad del primer nudo de la barra.
- b: Posición del primer grado de libertad del segundo nudo de la barra.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

- K: Matriz total del módulo con la matriz de la barra introducida.

5.3.16 function [K] = unionK(K1,K2,union);

Une las matrices de dos módulos diferentes, haciendo coincidir los grados de libertad de los últimos nudos que se indiquen de la primera matriz con los grados de libertad de los primeros nudos que se indiquen de la segunda.

VALORES DE ENTRADA

- K1: Matriz de rigidez del primer módulo.
- K2: Matriz de rigidez del segundo módulo.
- union: Variable que indica el número de nudos que se solaparán.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

- K: Matriz total de la estructura, incompleta hasta la unión del último módulo.

5.3.17 function [n] = unionN(n1,n2);

Une las matrices de barras de dos módulos diferentes, colocando las barras del segundo módulo a continuación de las barras del primero.

VALORES DE ENTRADA

- n1: Matriz de barras del primer módulo.
- n2: Matriz de barra del segundo módulo.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

- n: Matriz de barras total de la estructura, incompleta hasta el último módulo.

5.3.18 function $[v,d,R,r,l] = \text{hipol}(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,G,z);$

Calcula las libertades y reacciones y realiza las operaciones y llamaradas necesarias para que la pluma y la contrapluma aguanten la primera hipótesis.

VALORES DE ENTRADA

- K: Matriz de rigidez total de la estructura.
- n: Matriz de barras total de la estructura.
- a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.
- ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.
- P: Peso de la carga útil en punta de pluma aplicado ya el coeficiente ψ .
- Q: Peso del equipo de elevación.
- G: Coeficiente de mayoración de cargas.
- z: Variable que define si la contrapluma mide 10 o 20 metros.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

- $[PV, \text{Lastre}, \text{PP}, \text{PCP}] = \text{cargaselementos}(K, n, a, ch, cm, cu, P, Q, z, G);$
- Ver apartado 5.3.19
- $[S] = \text{esfuerzos}(n, d, ch, cm, cu);$ Ver apartado 5.3.20
- $[v] = \text{vonmisses}(n, S, ch, cm, cu, z);$ Ver apartado 5.3.21

VALORES DE SALIDA

- v: Vector que nos indica si los perfiles de entrada han aguantado o no.
- d: Vector de desplazamientos de la primera hipótesis.
- R: Reacciones en los empotramientos.
- r: Reacciones de la estructura.
- l: Libertades de la estructura.

5.3.19 function $[PV, \text{Lastre}, \text{PP}, \text{PCP}] = \text{cargaselementos}(K, n, a, ch, cm, cu, P, Q, z, G);$

Calcula el vector de cargas de la estructura. Se tienen en cuenta cuando sea necesario: La carga útil y su coeficiente dinámico de elevación, el peso del equipo de elevación, el peso propio de los perfiles y el peso del lastre. Todo este vector es mayorado con el correspondiente coeficiente.

VALORES DE ENTRADA

- K: Matriz de rigidez total de la estructura.
- n: Matriz de barras total de la estructura.
- a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.
- ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.
- P: Peso de la carga útil en punta de pluma aplicado ya el coeficiente ψ .
- Q: Peso del equipo de elevación.
- z: Variable que define si la contrapluma mide 10 o 20 metros.
- G: Coeficiente de mayoración de cargas.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

PV: Vector de cargas mayoradas.
 Lastre: Peso del lastre.
 PP: Peso de la pluma.
 PCP: Peso de la contrapluma.

5.3.20 function [S] = esfuerzos(n,d,ch,cm,cu);

Calcula los esfuerzos en locales en los dos extremos de cada barra.

VALORES DE ENTRADA

n: Matriz de barras total de la estructura.
 d: Vector de desplazamientos de la estructura.
 ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[K] = matrizl3d(n,ch,cm,cu); Ver apartado 5.3.13
 [R0] = cambio3d(n); Ver apartado 5.3.14

VALORES DE SALIDA

S: Matriz con los esfuerzos de los nudos de todas las barras.

5.3.21 function [v] = vonmisses(n,S,ch,cm,cu,z);

Realiza el cálculo resistente de todas las barras, realizando bucles para comprobar cada barra en sus dos nudos

VALORES DE ENTRADA

n: Matriz de barras total de la estructura.
 S: Matriz con los esfuerzos de los nudos de todas las barras.
 ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.
 z: Variable que define si la contrapluma mide 10 o 20 metros.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[w] = pandeo(L); Ver apartado 5.3.22

VALORES DE SALIDA

v: Vector que define que perfiles aguantan.

5.3.22 function [w] = pandeo(L);

Devuelve el coeficiente ω de pandeo para una determinada λ .

VALORES DE ENTRADA

L: Variable con el valor de λ para la barra en estudio.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

o: Coeficiente de pandeo para la barra en estudio.

5.3.23 function [v,d,R] = hipoll(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,G,r,l,z);

Realiza las operaciones y llamadas necesarias para la resolución de la estructura y que la pluma y la contrapluma aguanten satisfactoriamente la segunda hipótesis.

VALORES DE ENTRADA

K: Matriz de rigidez total de la estructura.

n: Matriz de barras total de la estructura.

a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.

ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.

P: Peso de la carga útil en punta de pluma aplicado ya el coeficiente ψ .

Q: Peso del equipo de elevación.

G: Coeficiente de mayoración de cargas.

r: Reacciones de la estructura.

l: Libertades de la estructura.

z: Variable que define si la contrapluma mide 10 o 20 metros.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[PV,Lastre,PP,PCP] = cargaselementos(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,z,G);

Ver apartado 5.3.19

[Pviento] = cargasviento(K,n,a,ch,cm,cu,p,v); Ver apartado 5.3.24

[S] = esfuerzos (n,d,ch,cm,cu); Ver apartado 5.3.20

[v] = vonmisses(n,S,ch,cm,cu,z); Ver apartado 5.3.21

VALORES DE SALIDA

v: Vector que nos indica si los perfiles de entrada han aguantado o no.

d: Vector de desplazamientos de la segunda hipótesis.

R: Reacciones en los empotramientos.

5.3.24 function [Pviento] = cargasviento(K,n,a,ch,cm,cu,p,v);

Hace una llamada a la función que obtiene el vector de cargas por efecto del viento para el módulo concreto que se pide.

VALORES DE ENTRADA

K: Matriz de rigidez total de la estructura.

n: Matriz de barras total de la estructura.

a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.

ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.

p: Presión del viento de servicio.

v: Velocidad del viento de servicio.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[Pviento] = viento_X(n,ch,cm,cu,p,v,Pviento); Ver apartado 5.3.25

Siendo X un número, del 0 al 7, según el tipo de módulo al que se llame.

VALORES DE SALIDA

Pviento: Vector de cargas producidas por el viento de servicio.

5.3.25 function [Pviento] = viento_X(n,ch,cm,cu,p,v,Pviento);

X es un número del, 0 al 7, que define el tipo de módulo que se va a calcular. La función obtiene el vector de cargas producidas por el viento para el módulo de ese tipo.

VALORES DE ENTRADA

n: Matriz de barras del módulo en estudio.

ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.

p: Presión del viento de servicio.

v: Velocidad del viento de servicio.

Pviento: Vector de cargas por el viento, incompleto hasta el último módulo.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

Pviento: Nuevo vector de cargas por el viento, con el módulo estudiado añadido.

5.3.26 function [v,d,Lastre,PP,PCP,R] = hipolll(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,r,l,z);

Realiza las operaciones y llamadas necesarias para la resolución de la estructura y que la pluma y la contrapluma aguanten satisfactoriamente la tercera hipótesis. En esta hipótesis no se debe usar el coeficiente de mayoración G, le daremos el valor 0 y así, la función “cargaselementos” ni lo aplicará, ni usará el valor de la carga de servicio. La carga de servicio si que se incluye, porque es necesaria para el cálculo del lastre.

VALORES DE ENTRADA

K: Matriz de rigidez total de la estructura.

n: Matriz de barras total de la estructura.

a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.

ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.

P: Peso de la carga útil en punta de pluma, aplicado ya el coeficiente ψ .

Q: Peso del equipo de elevación.

r: Reacciones de la estructura.

l: Libertades de la estructura.

z: Variable que define si la contrapluma mide 10 o 20 metros.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[PV,Lastre,PP,PCP] = cargaselementos(K,n,a,ch,cm,cu,P,Q,z,G);

Ver apartado 5.3.19

[Pviento] = cargasviento(K,n,a,ch,cm,cu,p,v); Ver apartado 5.3.24

[S] = esfuerzos (n,d,ch,cm,cu); Ver apartado 5.3.20

[v] = vonmisses(n,S,ch,cm,cu,z); Ver apartado 5.3.21

VALORES DE SALIDA

v: Vector que nos indica si los perfiles de entrada han aguantado o no.

d: Vector de desplazamientos de la tercera hipótesis.

Lastre: Peso del lastre.

PP: Peso de la pluma.

PCP: Peso de la contrapluma.

R: Reacciones en los empotramientos.

5.3.27 function [p,d,PT,a] = torre(H,R,t,G);

Esta función asigna los perfiles iniciales de la torre y realiza los bucles de las hipótesis necesarios para el cálculo de los perfiles finales de la estructura.

VALORES DE ENTRADA

H: Altura de la torre.

R: Matriz con las reacciones en los empotramientos de la pluma.

t: Variable que usaremos para definir los perfiles iniciales de la torre.

G: Coeficiente de mayoración γ_c .

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[ch,cm,cu] = perfiles(p); Ver apartado 5.3.4

[K,n] = matrizglobal(a,ch,cm,cu,4); Ver apartado 5.3.8

[v,d] = hipotorreI(K,n,a,ch,cm,cu,R,G); Ver apartado 5.3.28

[v,d] = hipotorreII(K,n,a,ch,cm,cu,,G); Ver apartado 5.3.30

[v,d,PT] = hipotorreIII(K,n,a,ch,cm,cu,); Ver apartado 5.3.31

VALORES DE SALIDA

p: Variable que recoge la fila de la tabla en la que se encuentran los perfiles.

d: Matriz con los desplazamientos obtenidos en las tres hipótesis.

PT: Peso de la torre.

a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la torre.

5.3.28 function [v,d] = hipotorrel(K,n,a,ch,cm,cu,P,G);

Calcula las libertades y reacciones y realiza las operaciones y llamadas necesarias para la resolución de la estructura y que la torre aguante satisfactoriamente la primera hipótesis.

VALORES DE ENTRADA

- K: Matriz de rigidez total de la estructura.
- n: Matriz de barras total de la estructura.
- a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.
- ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.
- P: Matriz con las reacciones en los empotramientos de la pluma.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

- [PV,PT] = cargastorre(K,n,ch,cm,cu,P,G); Ver apartado 5.3.29
- [S] = esfuerzos (n,d,ch,cm,cu); Ver apartado 5.3.20
- [v] = vonmisses(n,S,ch,cm,cu,z); Ver apartado 5.3.21

VALORES DE SALIDA

- v: Vector que nos indica si los perfiles de entrada han aguantado o no.
- d: Vector de desplazamientos de la primera hipótesis.

5.3.29 function [PV,PT] = cargastorre(K,n,ch,cm,cu,P,G);

Calcula el vector de cargas de la estructura. Se tienen en cuenta el peso propio de los perfiles, mayorado con el correspondiente coeficiente cuando sea necesario, y las reacciones que se obtuvieron en el cálculo de la primera hipótesis en la pluma.

VALORES DE ENTRADA

- K: Matriz de rigidez total de la estructura.
- n: Matriz de barras total de la estructura.
- ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.
- P: Matriz con las reacciones en los empotramientos de la pluma.
- G: Coeficiente de mayoracion de cargas.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

- PV: Vector de cargas mayoradas.
- PT: Peso de la torre.

5.3.30 function [v,d] = hipotorrell(K,n,a,ch,cm,cu,P,G);

Calcula las libertades y reacciones y realiza las operaciones y llamadas necesarias para la resolución de la estructura y que la torre aguante satisfactoriamente la segunda hipótesis.

VALORES DE ENTRADA

- K: Matriz de rigidez total de la estructura.
- n: Matriz de barras total de la estructura.
- a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.
- ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.
- P: Matriz con las reacciones en los empotramientos de la pluma.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[PV,PT] = cargastorre(K,n,ch,cm,cu,P,G); Ver apartado 5.3.29
 [Pviento] = cargasviento(K,n,a,ch,cm,cu,p,v); Ver apartado 5.3.24
 [S] = esfuerzos (n,d,ch,cm,cu); Ver apartado 5.3.20
 [v] = vonmisses(n,S,ch,cm,cu,z); Ver apartado 5.3.21

VALORES DE SALIDA

v: Vector que nos indica si los perfiles de entrada han aguantado o no.
 d: Vector de desplazamientos de la segunda hipótesis.

5.3.31 function [v,d,PT] = hipotorrell(K,n,a,ch,cm,cu,P);

Realiza las operaciones y llamadas necesarias para que la torre aguante satisfactoriamente la tercera hipótesis. En esta hipótesis no se debe usar el coeficiente de mayoración G, le daremos el valor 0 y así, la función “cargaselementos” no lo aplicará.

VALORES DE ENTRADA

K: Matriz de rigidez total de la estructura.
 n: Matriz de barras total de la estructura.
 a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la estructura.
 ch, cm y cu: Vectores con las características de los distintos perfiles.
 P: Matriz con las reacciones en los empotramientos de la pluma.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[PV,PT] = cargastorre(K,n,ch,cm,cu,P,G); Ver apartado 5.3.29
 [Pviento] = cargasviento(K,n,a,ch,cm,cu,p,v); Ver apartado 5.3.24
 [S] = esfuerzos (n,d,ch,cm,cu); Ver apartado 5.3.20
 [v] = vonmisses(n,S,ch,cm,cu,z); Ver apartado 5.3.21

VALORES DE SALIDA

v: Vector que nos indica si los perfiles de entrada han aguantado o no.
 d: Vector de desplazamientos de la segunda hipótesis.
 PT: Peso de la torre.

5.3.32 function [Result] = modificar(p,p2,d,d2,R,Lastre,PP,PCP,PT);

Esta función se encarga de modificar los resultados obtenidos para que el programa de Visual Basic los pueda aceptar.

VALORES DE ENTRADA

p: Fila de la tabla en la que se encuentran los perfiles que configuran la pluma.
 p2: Fila de la tabla en la que se encuentran los perfiles que configuran la torre.
 d: Vector de desplazamientos de la pluma.
 d2: Vector de desplazamientos de la torre.
 R: Reacciones en los empotramientos de la pluma.
 Lastre: Peso del lastre.
 PP: Peso de la pluma.
 PCP: Peso de la contrapluma.

PT: Peso de la torre.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[ch,cm,cu] = perfiles(p); Ver apartado 5.3.4

VALORES DE SALIDA

Result: Matriz fila con los datos que necesita el programa de Visual Basic.

Esta matriz incluye: Tipos de perfiles necesarios en la pluma y en la torre, desplazamientos máximos de la punta de la pluma, los distintos pesos calculados a lo largo del programa y el esfuerzo cortante y momento flector en la parte superior de la torre.

5.3.33 function [h] = deformada(a,a2,d,d2,z,color);

Hace una llamada a la función que dibuja la deformada del módulo concreto que se pide.

VALORES DE ENTRADA

a: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la pluma.

a2: Vector que recoge el número y tipo de módulos que configuran la torre.

d: Vector de desplazamientos de la pluma.

d2: Vector de desplazamientos de la torre.

z: Variable que define si la contrapluma mide 10 o 20 metros.

color: Variable de texto que define el color en el que se dibujará la deformada.

La estructura sin deformar siempre se dibujará en azul.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

[h] = deformada_X(t,pX,pY,X,Y,Z,color); Ver apartado 5.3.34

Siendo X un número, del 0 al 7, según el tipo de módulo al que se llame.

VALORES DE SALIDA

h: Variable necesaria para la definición de la función pero cuyo valor no es útil.

5.3.34 function [h] = deformada_X(t,pX,pY,X,Y,Z,color);

X es un número, del 0 al 7, que define el tipo de módulo que se va a calcular. La función obtiene el vector de cargas producidas por el viento para el módulo de ese tipo. Para la función del módulo 7 los valores de X, Y y Z son 0.

VALORES DE ENTRADA

t: Vector de desplazamientos del módulo que se pide

pX: Posición en el eje X del módulo que se pide.

pY: Posición en el eje Y del módulo que se pide.

X: Desplazamiento respecto al eje X de la parte superior de la torre.

Y: Desplazamiento respecto al eje Y de la parte superior de la torre.

Z: Desplazamiento respecto al eje Z de la parte superior de la torre.

color: Variable de texto que define el color en el que se dibujará la deformada.

La estructura sin deformar siempre se dibujará en azul.

LLAMADAS A OTRAS FUNCIONES

Ninguna.

VALORES DE SALIDA

h: Variable necesaria para la definición de la función pero cuyo valor no es útil.

6. CÁLCULO DE LOS MECANISMOS

6.1 INTRODUCCION

6.1.1 Generalidades

En la grúa torre se pueden diferenciar los siguientes tipos de mecanismos:

- Mecanismo de elevación de la carga.
- Mecanismo de orientación de la pluma.
- Mecanismo de traslación de la carga.

Cada uno de estos mecanismos actuando individual o conjuntamente posibilita la funcionalidad de la grúa, dotándola de las características necesarias: Elevar y trasladar cargas.

En los siguientes apartados explicaremos el cálculo que, según la normativa, ha de realizarse para cada uno de los elementos que intervienen.

6.1.2 Clasificación

Para poder dimensionar los diversos elementos que componen la grúa, es necesario determinar el grupo de clasificación al que.

Este cálculo ya se vio en el apartado 4.1.1 de la presente memoria, por lo que no se repetirá aquí.

6.2 MECANISMO DE ELEVACION

6.2.1 Gancho

El gancho se selecciona según la carga máxima a elevar por la grúa y según las normas DIN 15401 y 15402. El número con que estas normas definen a cada gancho es la carga que es capaz de soportar.

El gancho puede ser simple o doble, dependiendo del tonelaje a elevar: Simple de 2,5 a 5 kg. y doble de 6 a 250 kg., pero siempre estará dotado de un pestillo de seguridad para impedir la salida de la eslinga.

A continuación se incluye una imagen de ambos tipos de ganchos y una tabla con los valores de los ganchos y sus rodamientos necesarios para este proyecto, los que soportan hasta 6.000 kg.:

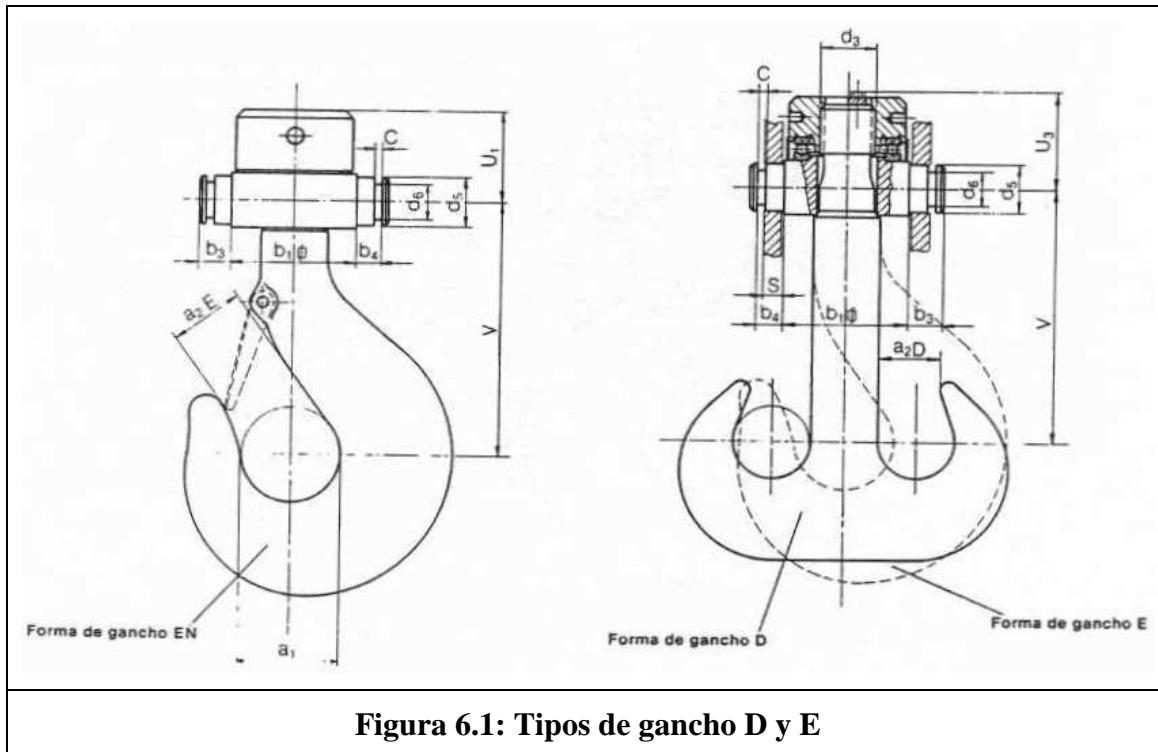


Figura 6.1: Tipos de gancho D y E

Tabla 6.1: Dimensiones de ganchos según DIN 15401 y 15402

Nº de gancho	2.5	4	5	6
Tipo	E	E	E	D
a₁	63	71	80	90
b₁	80	90	100	125
b₃	22,5	25	27,5	30
b₄	17	19	22	24
C	8	8	8	10
d₃	M36	M42	M45	Rd50
U₁	64	71	80	-
U₃	-	-	-	95
V	170	190	210	240
Rodamiento	51.108	51.110	51.112	51.214
Peso (kg.)	9	14	20	29
Referencia	011.2.5	001.4	001.5	001.6

Una vez definido el gancho se elige su suspensión, compuesta de: Traviesa, tuerca y pieza de aseguramiento (sólo para ganchos 6 o mayores). Éstas vienen definidas para cada número de gancho por las normas DIN 15412, 15413 y 15414 respectivamente.

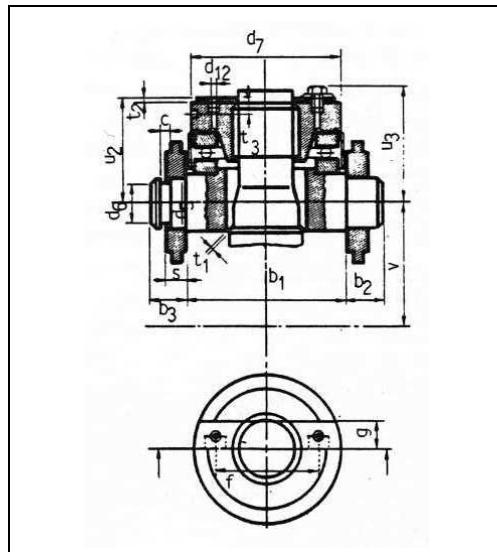


Figura 6.2: Suspensión del gancho

A continuación se incluye las imágenes y tablas de valores de los elementos necesarios para nuestro proyecto:

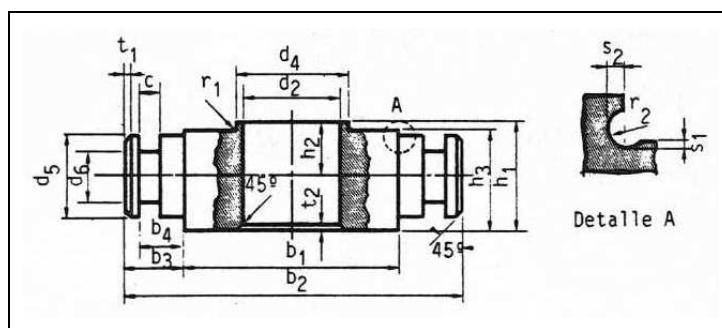


Figura 6.3: Traviesa del gancho

Tabla 6.2: Dimensiones de traviesas de ganchos según DIN 15412									
Nº de gancho	b₁	b₂	b₃	b₄	C	d₂	d₄ (j6)	d₅ (h9)	d₆
2,5	60	125	22,5	17	8	37	40	30	19
4	90	140	25	19	8	43	50	35	23
5	100	155	27,5	22	8	46	60	40	27
6	125	185	30	24	10	51	70	45	32

Nº de gancho	h_1	h_2	h_3 (h_{11})	r_1 (max)	r_2	s_1	s_2	t_1	t_2
2,5	40	21,5	37	0,6	1,6	0,5	1,2	2	2
4	45	24	42	0,6	1,6	0,5	1,2	3	2
5	50	27,5	45	1	1,6	0,5	1,2	3	2
6	55	30	50	1	1,2	0,5	1,2	4	2,5

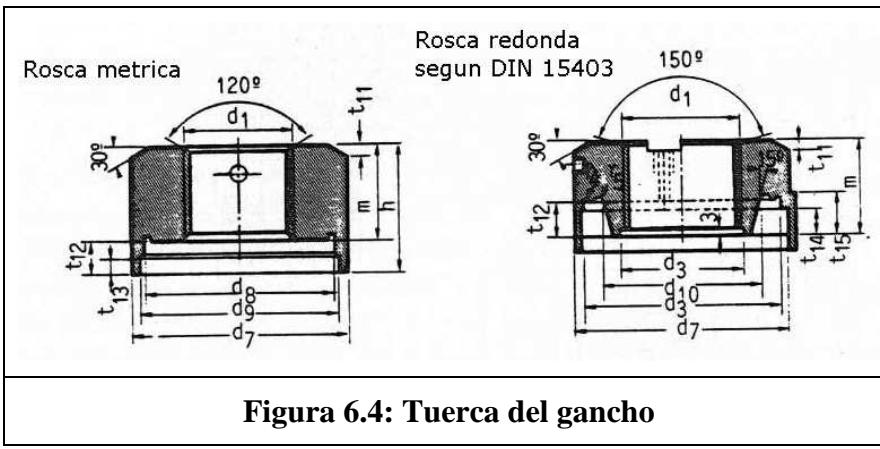


Figura 6.4: Tuerca del gancho

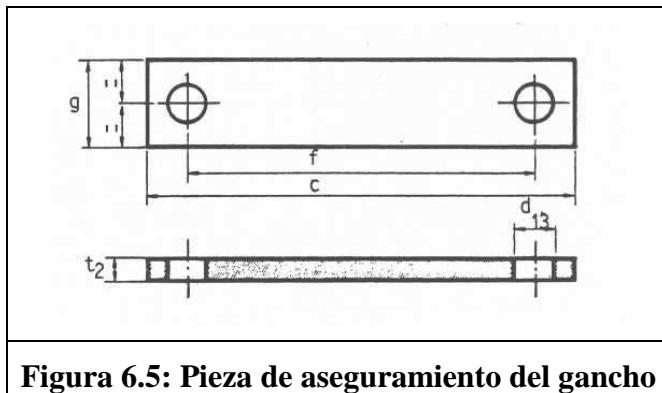


Figura 6.5: Pieza de aseguramiento del gancho

Tabla 6.3: Dimensiones de tuercas de ganchos según DIN 15413

Nº de gancho	d_1 métrica	d_1 redonda	d_3 (c_{11})	d_7	d_8 (E9)	d_9	d_{10}	h
2,5	M36	-	-	70	50	63	-	44
4	M42	-	-	80	70	73	-	49
5	M45	-	-	95	85	88	-	56
6	-	Rd 50x6	50,6	115	105	-	68	-

Nº de gancho	m	r ₄	r ₅	t ₁₁	t ₁₂	t ₁₃	t ₁₄	t ₁₅
2,5	32	0,6	-	4	12	8	-	-
4	36	0,6	-	5	13	9	-	-
5	40	1	-	5	16	9	-	-
6	55	1,6	4	8	20	-	15	22

Tabla 6.4: Dimensiones de piezas de aseguramiento de ganchos según DIN 15414

Nº de gancho	f (± 0,5)	g (h11)	t ₂	c	d ₁₃
6	75	25	6	100	11,5

6.2.2 Aparejo

Este tipo de grúas usan un tipo especial de aparejos, denominados aligerados, que maximizan su capacidad en función del su peso.

Es importante resaltar que, según el número de ramales de cable, el aparejo aligerado deberá estar capacitado para su unión al gancho, por el inferior, y a 1 o 2 poleas, por su parte superior.

6.2.3 Cable

La norma UNE 58-120-91/1 establece las reglas para el dimensionamiento de los cables. Su diámetro mínimo se determina mediante la siguiente formula:

$$d_{\min} = K_C \cdot \sqrt{S} \quad \text{Ecuación (6.1)}$$

Donde:

- d_{\min} es el diámetro mínimo del cable en mm.
- K_C es un coeficiente obtenido de la tabla 6.6.
- S es la solicitud del cable en kg.

La solicitud del cable se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$S = \frac{P_{\max}}{n \cdot \mu} \quad \text{Ecuación (6.5)}$$

En donde:

- P_{\max} es la carga máxima a elevar en kg. (carga útil + peso del gancho).
- n es el número de ramales de la grúa.
- μ es el coeficiente de rendimiento de las poleas obtenido de la tabla 6.5.

Y así la ecuación para hallar el diámetro mínimo del cable quedará:

$$d_{\min} = K_C \cdot \sqrt{\frac{P_{\max}}{n \cdot \mu}} \quad \text{Ecuación (6.7)}$$

Tabla 6.5: Coeficiente de rendimiento de poleas						
Nº de ramales	1	2	3	4	5	6
Rendimiento μ de las poleas	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95

El coeficiente K_C se puede obtener de la siguiente tabla, que la normativa UNE que seguimos toma de las normas DIN, sabiendo que para este proyecto usaremos cables con una tensión máxima de rotura de 180 kg/mm²:

Tabla 6.6: Coeficiente K_C según normas DIN	
Grupo	Carga peligrosa y cable antigiratorio
M3	0,265
M4	0,280
M5	0,315
M6	0,335
M7	0,375
M8	0,425

Por otra parte, la norma UNE 58-120-91/1 también determina un coeficiente de seguridad a aplicar a la carga, para hallar la tensión de rotura efectiva que este debe de poder soportar:

$$\sigma_0 = Z_P \cdot S \quad \text{Ecuación (6.8)}$$

Donde:

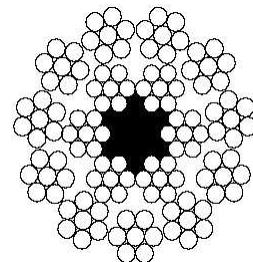
- σ_0 es la carga de rotura efectiva que debe soportar el cable en kg/mm².
- S es la solicitud del cable en kg.
- Z_P es un coeficiente de seguridad.

El coeficiente Z_P se obtiene de la siguiente tabla, que la normativa UNE que seguimos toma de las normas FEM:

Tabla 6.7: Coeficiente Z_P según normas FEM

Grupo	Carga peligrosa y cable antigiratorio
M3	4
M4	4,5
M5	6,6
M6	7,1
M7	9
M8	11,2

Como nuestra grúa torre elevará las cargas a alturas considerables, elegiremos un cable del tipo antigiratorio. Debemos escoger en la tabla 6.8, un cable con mayor diámetro práctico y mayor carga de rotura efectiva que los obtenidos mediante las ecuaciones anteriores.

Tabla 6.8: Cables antigiratorios 17x7₍₁₊₆₎₊₁

d_{comercial} (mm)	d_{práctico} (mm)	d_{hilo} (mm)	Sección (mm²)	Peso (kg/m)	Carga de rotura efectiva (kg/mm²)
10,0	10,33	0,70	46,81	0,420	6.900
11,0	11,07	0,75	52,54	0,485	7.900
11,5	11,80	0,80	59,84	0,550	9.000
12,5	12,54	0,85	67,50	0,620	10.200
13,0	13,28	0,90	76,73	0,696	11.500
14,0	14,02	0,95	84,33	0,775	12.800
14,5	14,75	1,00	93,50	0,860	14.100
15,5	15,49	1,05	103,03	0,948	15.600
16,0	16,23	1,10	113,13	1,040	17.100
17,0	16,97	1,15	123,60	1,136	18.700
17,5	17,70	1,20	134,64	1,238	20.400
18,5	18,45	1,25	146,04	1,343	22.100
19,0	19,18	1,30	158,01	1,455	23.900
20,0	19,92	1,35	170,35	1,566	25.800

d_{comercial} (mm)	d_{práctico} (mm)	d_{hilo} (mm)	Sección (mm²)	Peso (kg/m)	Carga de rotura efectiva (kg/mm²)
20,50	20,66	1,40	183,26	1,685	27.700
21,50	21,40	1,45	196,53	1,807	29.700
22,00	22,14	1,50	210,37	1,935	31.800
23,50	23,60	1,60	239,36	2,200	36.200
25,00	25,08	1,70	270,21	2,485	40.900

El cable escogido de esta manera, cumple la normativa, pero también debemos comprobar que es capaz de aguantar una vida aceptable en función de su uso. El cable debe cumplir:

$$W = \frac{170.000}{n} \cdot \left(10 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \frac{\frac{D}{d} - \frac{9}{1}}{\sigma_e + 40} \right)^2 > 150.000 \quad \text{Ecuación (6.9)}$$

Donde:

- W es la vida del cable en número de flexiones.
- n es un coeficiente de valor 1 para flexión siempre en el mismo sentido.
- D es el diámetro de la polea en mm.
- d es el diámetro del cable en mm.
- b₁ es un coeficiente de valor 1 para un radio de garganta r = 0,54 · d.
- b₂ es un coeficiente de valor 1,04 para cable cruzado.
- σ_e es la tensión de extensión del cable en MPa.

Aplicando los valores de coeficientes conocidos nos queda:

$$W = \frac{170.000}{1} \cdot \left(10 \cdot 1 \cdot 1,04 \cdot \frac{\frac{D}{d} - \frac{9}{1}}{\sigma_e + 40} \right)^2 > 150.000 \quad \text{Ecuación (6.10)}$$

Y despejando de la formula anterior, nos queda la vida del cable:

$$W = 18.387.200 \cdot \left(\frac{\frac{D}{d} - 9}{\sigma_e + 40} \right)^2 > 150.000 \quad \text{Ecuación (6.11)}$$

La tensión de extensión del cable en MPa, se calcula mediante la siguiente formula:

$$\sigma_e = \frac{P_{maxN}}{A \cdot n} = \frac{P_{maxN}}{\pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot n} = 4 \cdot \frac{P_{maxN}}{\pi \cdot d^2 \cdot n}$$

Ecuación (6.12)

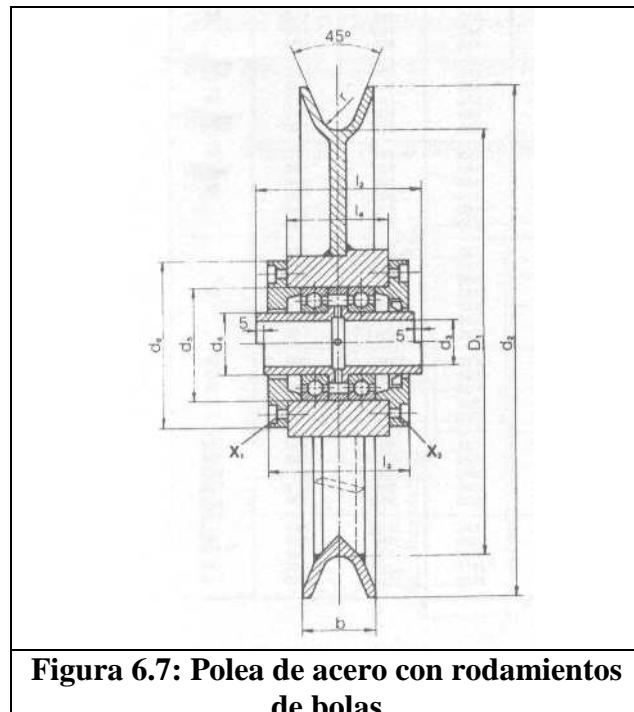
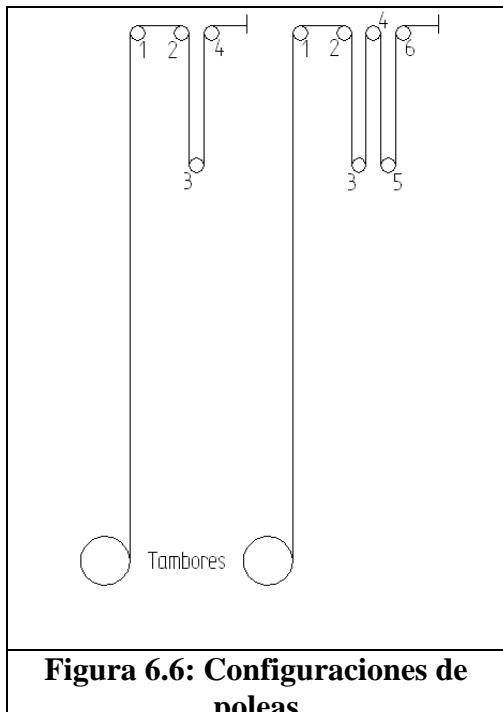
Donde:

- σ_e es la tensión de extensión del cable en MPa.
- P_{max} es la carga máxima a elevar en N. (carga útil + peso del gancho).
- A es la sección aparente del cable en mm.
- n es el número de ramales.
- d es el diámetro del cable.

Como en la ecuación de la vida del cable esta presente el diámetro de la polea, esta comprobación se realizará después de cálculo de estas. No es habitual, pero si se da el caso de que el cable no cumple esta ecuación, se deberán tomar unas poleas de mayor diámetro.

6.2.4 Poleas

Según la configuración del aparejo y el número de ramales de nuestra grúa, 2 o 4, harán falta 4 o 6 poleas:



Como todo el conjunto de cable y poleas trabaja en el mismo plano y con cargas transversales nulas, usaremos poleas de acero con rodamientos de bolas. A continuación incluimos una imagen de este tipo de poleas y las tablas de valores para su selección.

Tabla 6.12: Dimensiones de las poleas de acero con rodamientos de bolas											
D₁	d_{cable}	r	d₂	b	d₃ E9	d₄ H7	d₅	d₆	l₄	Peso (kg.)	Ref.
225	6-10	4	255	30	45	60	85	120	65	10	017.22.09
		5	260	32	50	60	85	120	65	11	017.22.10
250	7-12	5,6	285	34	50	60	85	120	65	12	017.25.10
		6,3	290	38	60	70	100	135	75	14	017.25.12
280	9-14	5,6	315	34	50	60	85	135	65	15	017.28.10
		6,3	320	38	55	70	100	135	75	17	017.28.11
		7	325	44	60	70	100	145	75	18	017.28.12
315	10-15	6,3	355	38	50	60	85	120	65	18	017.31.10
		7	360	38	60	70	100	135	75	20	017.31.12
		8	360	40	70	80	110	145	75	22	017.31.14
355	12-17	8	400	40	70	80	110	145	75	22	017.35.14
		9	411	48	80	100	140	180	95	26	017.35.16
400	13-21	8	445	40	70	80	110	145	75	26	017.40.14
		9	448	44	75	90	125	165	85	27	017.40.15
		10	456	50	80	100	140	180	95	28	017.40.16
		11	475	60	90	110	150	190	95	32	017.40.18
450	15-24	9	506	48	70	80	110	145	75	36	017.45.14
		10	506	50	80	110	140	180	95	40	017.45.16
		11	525	60	90	110	150	190	95	41	017.45.18
500	16-26	10	556	50	70	80	110	145	75	38	017.50.14
		11	575	60	80	100	140	180	95	40	017.50.16
		14	570	60	100	120	165	220	105	45	017.50.20
560	18-31	11	635	60	80	100	140	180	95	52	017.56.16
		14	630	60	100	120	165	220	105	56	017.56.20
		16	640	70	120	140	190	240	115	60	017.56.24
630	20-34	14	700	60	90	110	150	190	95	63	017.63.18
		16	710	70	110	130	180	230	105	66	017.63.22
		18	730	80	150	170	215	265	115	70	017.63.30
710	23-38	14	780	60	100	120	165	220	95	82	017.71.20
		16	790	70	120	140	190	240	105	86	017.71.24
		18	810	80	140	160	200	250	115	92	017.71.28
		20	810	83	170	190	240	300	115	100	017.71.34
800	25-43	16	880	70	110	130	180	230	105	113	017.80.22
		18	900	80	130	150	190	240	105	120	017.80.26
		20	900	83	150	170	215	265	115	125	017.80.30

El diámetro mínimo de la polea se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$D_{\text{polea}} = d_{\text{cable}} \cdot h_1 \cdot h_2 \quad \text{Ecuación (6.13)}$$

Donde:

- d_{cable} es el diámetro del cable seleccionado.
- h_1 y h_2 son dos coeficientes determinados por la normativa.

En las tablas siguientes se exponen los valores de los coeficientes h_1 y h_2 :

Tabla 6.9: Valores del coeficiente h_1		
Grupo	Cable antigiratorio	
	Polea	Tambor
M3	14	16
M4	16	18
M5	16	20
M6	18	22,4
M7	18	25
M8	20	28

Tabla 6.10: Valores del coeficiente h_2				
Tambores y poleas compensadoras	h_2	1		
		W_{total}	≤ 5	6 a 10
Poleas de cable	h_2	h_2	1	1,12
				1,25

Para las poleas de cable, los valores de h_2 dependen del número de poleas por las que pasa el cable y del número de inversiones del sentido de enrollamiento. Así, contaremos:

- $W = 0$ para poleas compensadoras.
- $W = 1$ para tambores.
- $W = 2$ para poleas de cable sin inversión del sentido de enrollamiento.
- $W = 4$ para poleas de cable con inversión del sentido de enrollamiento.

El valor W_{total} necesario para obtener el coeficiente h_2 , se obtiene sumando todos los W correspondientes a los diversos elementos de la grúa. Para las configuraciones usadas en nuestro proyecto, que puede verse en la figura 6.6, este valor es:

2 ramales: 1 tambor + 3 poleas con inversión + 1 polea sin inversión:

$$W_{\text{total}} = 1 + (3 \cdot 4) + (1 \cdot 2) = 15$$

4 ramales: 1 tambor + 5 poleas con inversión + 1 polea sin inversión:

$$W_{\text{total}} = 1 + (5 \cdot 4) + (1 \cdot 2) = 23$$

Para ambos casos el valor del coeficiente h_2 será 1,25.

Tras definir el diámetro mínimo de las poleas, y escogerlas de la tabla 6.12, debemos comprobar que el diámetro de nuestro cable, está dentro del rango indicado para esas poleas. En caso negativo aumentaremos el cable o la polea escogida hasta que el resultado sea satisfactorio.

Tras seleccionar la polea, pasamos a realizar el cálculo de los radios y garganta de la misma.

Para calcular la garganta, consideraremos la llanta de la polea como una viga recta, apoyada en cada una de las posiciones de sus radios. De esta manera se pueden obtener los esfuerzos máximos a los que se verá sometida:

$$\left. \begin{array}{l} M = \frac{P \cdot L}{16} \\ V = \frac{P}{2} \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} P = 2 \cdot S \cdot \sin(\gamma/2) \\ S = \frac{Q_t}{n} \\ \gamma = \frac{2 \cdot \pi}{n_r} \\ L = \frac{\pi \cdot D}{n_r} \end{array} \right\} \text{Ecuación (6.14)}$$

Donde:

- M y N son el momento y el esfuerzo cortante máximos que soporta.
- S es la carga sobre la garganta en kg.
- γ es el ángulo entre en que se reparte la carga en radianes.
- Q_t es la carga total (carga a elevar + peso del gancho) en kg.
- n es el número de ramales.
- n_r es el número de radios de la polea.
- L es la longitud entre radios de la polea en mm.
- D es el diámetro de la polea en mm.

Una vez calculado los esfuerzos máximos, se comprueba que la garganta aguanta mediante Von Misses:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = \frac{M}{W} \\ \tau = \frac{V}{A} \end{array} \right\} CS \cdot \sigma_{\text{eq}} = CS \cdot \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} < \sigma_{\text{acero}} \text{Ecuación (6.15)}$$

Donde:

- W y A son características que dependen de la geometría de la sección de la polea y que calcularemos a continuación.
- CS es un coeficiente de seguridad y que ajustaremos en torno a 2,5.
- σ_{acero} es la resistencia del acero que usaremos para la polea. En este caso usaremos un A42 con $\sigma_{acero} = 26 \text{ kg/mm}^2$.

Las gargantas de las poleas tienen un perfil semicircular, pero para simplificar los cálculos, lo ajustaremos a un perfil de rectángulos combinados, como puede verse en la figura 6.8.

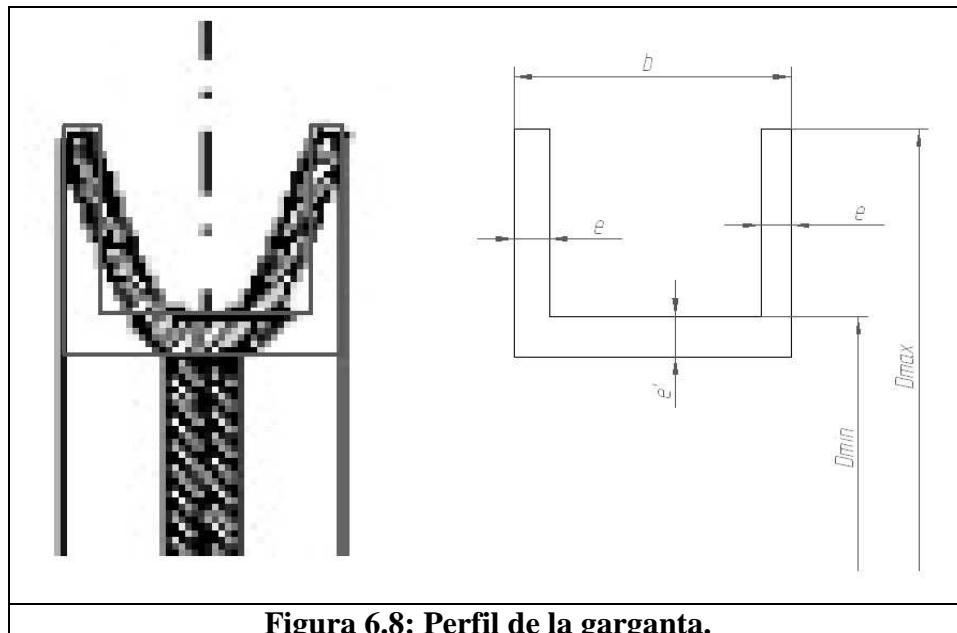


Figura 6.8: Perfil de la garganta.

De las dimensiones mostradas en la imagen anterior, b , D_{\max} y D_{\min} están definidas por la polea que hayamos escogido (ver b , d_2 y D_1 en la tabla 6.12). Mientras que los espesores podremos elegirlos según nuestras necesidades. Para una mayor simplicidad a la hora de realizar los cálculos, supondremos que todos los espesores son de igual magnitud $e = e'$.

Calculamos el área sometida a cortante:

$$A = 2 \cdot e \cdot (D_{\max} - D_{\min} + e) \quad \text{Ecuación (6.16)}$$

Para calcular W , calcularemos primero la posición del centro de gravedad de la sección de la garganta en el eje y , el valor de I y de r_{\max} :

$$Y_{cdg} = \frac{2 \cdot e \cdot (D_{\max} - D_{\min}) \cdot \left(\frac{(D_{\max} - D_{\min})}{2} + e \right) + b \cdot e \cdot \frac{e}{2}}{2 \cdot e \cdot (D_{\max} - D_{\min}) + b \cdot e} \quad \text{Ecuación (6.17)}$$

$$r_{\max} = (D_{\max} - D_{\min} + e) - Y_{cdg} \quad \text{Ecuación (6.18)}$$

$$\left. \begin{aligned}
 I_A &= \frac{1}{12} \cdot e \cdot (D_{\max} - D_{\min} + e)^3 + e \cdot (D_{\max} - D_{\min} + e) \cdot \left(\frac{(D_{\max} - D_{\min} + e)}{2} - Y_{cdg} \right)^2 \\
 I_B &= \frac{1}{12} \cdot (b - 2 \cdot e) \cdot e^3 + (b - 2 \cdot e) \cdot e \left(Y_{cdg} - \frac{e}{2} \right)^2 \\
 I &= 2 \cdot I_A + I_B
 \end{aligned} \right\} \text{Ecuación (6.19)}$$

$$W = \frac{I}{r_{\max}} \quad \text{Ecuación (6.20)}$$

Una vez calculada la garganta, pasamos a calcular los radios de la polea. Para ello podemos valernos de 3 variables diferentes: altura y anchura de la sección del radio (utilizaremos una sección rectangular) y número de radios.

Lo primero que deberemos tener en cuenta es que estos radios no se pueden solapar ni sobresalir, por lo que se deberá cumplir que:

$$h_r \cdot n_r < D_C \cdot \pi \quad \text{Ecuación (6.21)}$$

$$b_r < l_C \quad \text{Ecuación (6.22)}$$

Donde:

- h_r es la altura de la sección del radio.
- n_r es el número de radios de la polea.
- D_C es el diámetro del cubo de la polea, ver d_6 en la tabla 6.12.
- b_r es la anchura de la sección del radio.
- l_C es la anchura del cubo de la polea, ver l_4 en la tabla 6.12.

Podemos calcular inmediatamente la longitud del radio, como:

$$L_r = \frac{D_{\min} - D_C - 2 \cdot e}{2} \quad \text{Ecuación (6.23)}$$

Una vez tengamos unos datos validos elegidos, pasamos al cálculo del radio a pandeo, por el lado más desfavorable:

$$I_{\min} = \frac{1}{12} \cdot h_r \cdot b_r^3 \quad \text{Ecuación (6.24)}$$

$$A = h_r \cdot b_r \quad \text{Ecuación (6.25)}$$

$$k_r = \sqrt{I_{\min} / A} = \sqrt{\frac{b_r^2}{12}} \quad \text{Ecuación (6.26)}$$

$$\text{Esbeltz} = \frac{L_r}{k_r} \quad \text{Ecuación (6.27)}$$

Una vez obtenida la esbeltez del radio, podemos obtener el factor mayorante ω entrando con ella en las tablas de pandeo, y así el cálculo del radio nos quedará:

$$\sigma_{\text{acero}} = \omega \cdot \text{CS} \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación (6.27)}$$

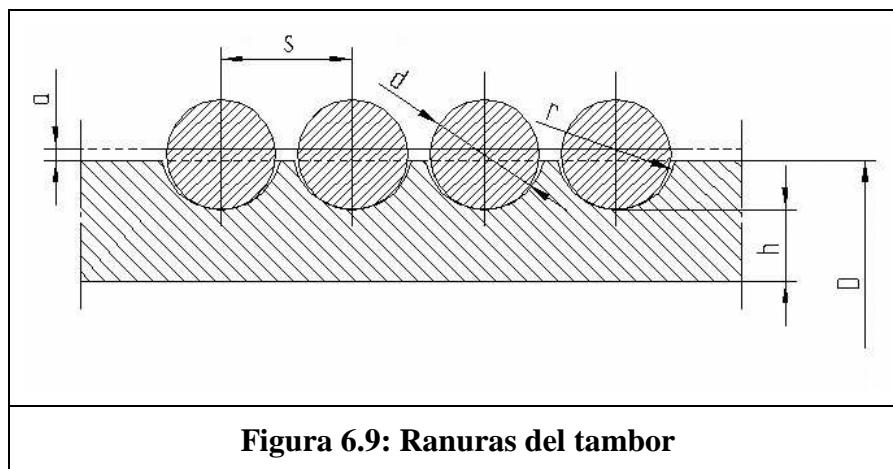
Donde:

- CS es un coeficiente de seguridad y que ajustaremos en torno a 2,5.
- σ_{acero} es la resistencia del acero que usaremos para el radio. En este caso usaremos un A42 con $\sigma_{\text{acero}} = 26 \text{ kg/mm}^2$.
- $P = 2 \cdot S \cdot \text{sen}(\gamma/2)$ como ya se vio en el calculo de la garganta.
- ω es factor mayorante de pandeo.

6.2.5 Tambor

Según la configuración del aparejo de nuestra grúa, ya sea de 2 o 4 ramales (ver figura 6.6), se empleará un tambor de una salida.

El tambor se encuentra ranurado, para que el cable se adapte mejor a su perfil y puede enrollarse y desenrollarse adecuadamente. En la figura siguiente se muestra las ranuras del tambor y las dimensiones que intervienen.



De la tabla siguiente se obtienen los valores de las dimensiones vistas en la figura anterior:

Tabla 6.11: Dimensiones de las ranuras de los tambores

d (diámetro del cable)	10	13	16	19	22	27
s	12	15	18	22	25	31
r	6,5	7	9	10,5	12	15
a	1	1,5	2	2,5	3	3,5

El diámetro mínimo del tambor se calculará aplicando la ecuación 6.13, en la que, el valor h_2 que vale 1 para tambores y obtendremos el valor de h_1 de la tabla 6.9:

$$D_T > d_{cable} \cdot h_1 \quad \text{Ecuación (6.28)}$$

Con el diámetro mínimo calculado y la carga máxima a elevar entramos en la tabla siguiente, para material de tensión admisible de 16 kg/mm^2 , y hallamos su espesor:

Tabla 6.12: Espesores de tambores de tensión admisible 16 kg/mm^2										
S ··· Diámetros	250	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1500
1000	40	40								
1500	40	50	50							
2000		60	60	60						
2500			70	70	70					
3000				80	80	80				
4000					80	90	100			
5000					90	90	100	120		
6000							100	120	120	120

La longitud de cable a enrollar será:

$$L_e = L + H \cdot n_r \quad \text{Ecuación (6.29)}$$

Donde:

- L_e es la longitud de cable a enrollar en mm.
- L es la longitud de la pluma de grúa en mm.
- H es la altura de la torre de la grúa en mm.
- n_r es el número de ramales de la grúa.

Por lo que el número de espiras que necesitara el tambor serán:

$$n_{\text{espiras}} = \frac{L_e}{L_D} + n \cdot e_{\text{seg}} = \frac{L_e}{\pi \cdot D_{\text{Tambor}}} + 3 \quad \text{Ecuación (6.30)}$$

Donde:

- n es el número de salidas del tambor, 1 en nuestro proyecto.
- e_{seg} es el número de espiras de seguridad, 3 en nuestro proyecto.
- L_D es la longitud de la circunferencia del tambor en mm.
- D_{Tambor} es el diámetro elegido para el tambor en mm.

Y por tanto, la longitud útil del tambor, obteniendo el factor s de la tabla 6.11, será:

$$L_{\text{util}} = n_{\text{espiras}} \cdot s = \frac{L_e}{\pi \cdot D_{\text{Tambor}}} \cdot s \quad \text{Ecuación (6.31)}$$

Para la longitud total del tambor, habrá que tener en cuenta la longitud útil, el tramo en ambos extremos sin mecanizar y el espesor de las dos paredes en el extremo del tambor. Esto puede verse en la figura 6.10. La longitud total del tambor, en mm, será:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{util}} + 2 \cdot 30 + 2 \cdot 50 \quad \text{Ecuación (6.32)}$$

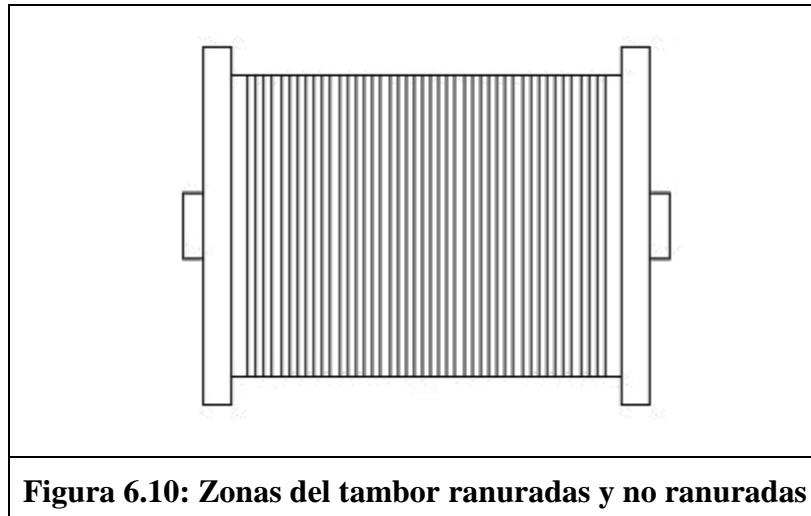


Figura 6.10: Zonas del tambor ranuradas y no ranuradas

Según la normativa vigente, la longitud total del tambor partido del diámetro del mismo ha de ser menor de 3 para evitar el pandeo. En nuestro caso:

$$\frac{L_{\text{total}}}{D_{\text{Tambor}}} < 3 \quad \text{Ecuación (6.33)}$$

Si esta condición no se cumple, habrá que aumentar el diámetro del tambor hasta que no se produzca pandeo.

Calculamos ahora las tensiones que se producen en el tambor, para comprobar si las medidas elegidas son capaces de soportarlas:

* Cálculo a torsión: Suponiendo la carga total en el centro del tambor la tensión creada por el momento torsor será:

$$\tau = \frac{M_t}{W_t} < 16 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{Ecuación (6.34)}$$

En donde:

$$M_t = 2 \cdot S \cdot \frac{D_T}{2}$$

$$W_t = \frac{\pi \cdot (D_T^4 - D_{Ti}^4)}{32 \cdot \frac{D_T}{2}} = \frac{\pi \cdot (D_T^4 - D_{Ti}^4)}{16 \cdot D_T}$$

Ecuación (6.35)

Siendo:

- S es la solicitación del cable en mm.
- D_T es el diámetro exterior del tambor en mm.
- D_{Ti} es el diámetro interior del tambor en mm.

* Cálculo a flexión: Suponiendo la carga total en el centro del tambor, la tensión creada por el momento flector será:

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_f} < 16 \text{ kg/mm}^2$$

Ecuación (6.36)

En donde:

$$M_f = 2 \cdot S \cdot \frac{L_{total}}{2}$$

$$W_f = \frac{W_t}{2} = \frac{\pi \cdot (D_T^4 - D_{Ti}^4)}{32 \cdot D_T}$$

Ecuación (6.37)

Siendo:

- S es la solicitación del cable en mm.
- L_{total} es la longitud total del tambor en mm.
- D_T es el diámetro exterior del tambor en mm.
- D_{Ti} es el diámetro interior del tambor en mm.

* Cálculo a compresión: La tensión de compresión es igual a:

$$\sigma_c = 0.85 \frac{2 \cdot S}{h \cdot s} < 16 \text{ kg/mm}^2$$

Ecuación (6.38)

Siendo:

- S es la solicitación del cable en kg.
- h es el espesor del tambor en mm.
- s es la separación entre las ranuras del tambor en mm.

* Cálculo teniendo en cuenta el esfuerzo equivalente: El valor del esfuerzo equivalente es igual a:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_c^2 + 3 \cdot \tau^2} < 16 \text{ kg/mm}^2$$

Ecuación (6.39)

Si el valor obtenido en cualquiera de los cuatro cálculos es mayor que los 16 kg/mm^2 que puede soportar nuestro material, habrá que aumentar las medidas del tambor, incluso saliéndonos de la tabla 6.12, o escoger un material con mayor tensión de rotura.

6.2.6 Motor

Tabla 6.13: Motores eléctricos sin levanta-escobillas							
Velocidad nominal de todos los motores de la tabla en r.p.m.: 1500							
HP (CV)	Velocidad de funcionamiento (r.p.m.)	Rendimiento	Par nominal (Nm)	Par Máximo (Nm)	Momento de Inercia (kgm²)	Peso (kg)	Tipo
5,5	1.410	0,77	27	75,6	0,03	75	1LS1-133
7,5	1.410	0,82	37	99,9	0,035	80	1LS1-135
10	1.425	0,85	50	150	0,068	110	1LS1-163
15	1.440	0,87	74	251,6	0,09	125	1LS1-166
20	1.445	0,88	101	404	0,23	215	1LS2-136
25	1.450	0,89	124	471,2	0,39	285	1LS2-155
30	1.450	0,90	148	592	0,43	305	1LS2-156
40	1.455	0,905	201	783,9	0,76	400	1LS2-176
50	1.460	0,905	247	938,6	1,02	555	1LS2-185
60	1.465	0,915	300	1260	1,16	595	1LS2-186
82	1.470	0,925	392	1568	1,9	745	1LS2-204
100	1.475	0,93	497	1988	2,17	820	1LS2-206

Como nuestro motor esta destinado a una grúa torre al aire libre, lo dotaremos de una protección IP 55, que según DIN 4050, CEI 144 y CEI 525 es una protección absoluta contra contactos, acumulación de polvo y chorros de agua.

La potencia teórica necesitada en el tambor, en CV, es:

$$HP = \frac{G_2 \cdot v_{elevacion}}{4500 \cdot \eta} \quad \text{Ecuación (6.40)}$$

Donde:

- G_2 es el peso de la carga útil y los elementos de suspensión en daN.
- $v_{elevacion}$ es la velocidad que estimemos en m/min.
- η es un coeficiente de rendimiento mecánico, que estimaremos en 0,9.
- 4500 es el factor de conversión de las unidades usadas a CV.

Con el valor de la potencia obtenido entraremos en la tabla anterior y escogeremos el motor necesario para nuestra grúa, el que produzca una potencia mayor que la obtenida.

Una vez escogido el motor, aplicamos otra vez la ecuación 6.44 con el nuevo valor del rendimiento del motor obtenido en la tabla anterior. Así, comprobamos si la potencia del motor escogido es realmente superior a la exigida por nuestra grúa, en caso negativo deberemos tomar un motor más potente.

Además de la potencia de funcionamiento, nuestro motor debe de poder proporcionar un par mayor que el par de arranque necesario. A continuación calcularemos el par de arranque de la grúa, y si el motor previamente elegido no es capaz de proporcionarlo, deberemos tomar un motor de mayor potencia.

$$M_a = M_w + M_b \quad \text{Ecuación (6.41)}$$

Donde:

- M_a es el par de arranque.
- M_w es el par resistente.
- M_b es el par de aceleración.

Y por partes:

$$M_w = \frac{HP \cdot 716}{n_1} \quad \text{Ecuación (6.42)}$$

Donde:

- HP es la potencia del motor en CV.
- n_1 es la velocidad nominal del motor en rpm.
- 4500 es el factor de conversión para las unidades usadas.
- M_w es el par resistente en daNm.

$$M_b = \frac{\sum GD_i^2 \cdot n_1}{375 \cdot t_a} \quad \text{Ecuación (6.43)}$$

Donde:

- $\sum GD_i^2$ es la suma de los momentos de inercia referidos al eje del motor.
- n_1 es la velocidad nominal del motor en rpm.
- t_a es el tiempo de aceleración, se tomará de 2 segundos para elevación.

Y los momentos de inercia se calculan:

$$\left. \begin{aligned} \sum GD_i^2 &= GD_{\text{masas}}^2 + GD_{\text{rotor}}^2 \\ GD_{\text{masas}}^2 &= \frac{G \cdot d^2}{\eta} \\ d &= \frac{v \cdot n_r}{\pi \cdot n_1} \\ GD_{\text{rotor}}^2 &= 4 \cdot \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2} \end{aligned} \right\} \quad \text{Ecuación (6.44)}$$

Donde:

- G es el peso de la carga útil y los elementos de suspensión en daN.
- η es el rendimiento mecánico del motor.
- v es la velocidad de elevación que hayamos estimado en m/min.
- n_r es el número de ramales de la grúa.
- n_1 es la velocidad nominal del motor en rpm.
- n_2 es la velocidad de funcionamiento del motor en rpm.
- $GD^2/4$ es el momento de inercia del motor.

Si el par máximo del motor escogido no es suficiente para vencer al par de arranque calculado, deberemos tomar un motor con un par máximo mayor, que ya nos cumplirá con todas las especificaciones.

6.2.7 Freno

Para calcular el par necesario en el freno, deberemos tener en cuenta el par máximo que es capaz de ejercer el motor seleccionado. Además, hay que seleccionar un coeficiente de seguridad K , de valor 2 o 2.5, en función de si se usara el mecanismo de elevación para elevar personas o no.

Como con las grúas de nuestro proyecto nunca se elevarán personas, se tomará K de valor 2, con lo que la fórmula para la selección del freno quedará:

$$M_F = K \cdot M_M = 2 \cdot M_M \quad \text{Ecuación (6.45)}$$

Entrando en la tabla siguiente elegiremos el freno según su par necesario:

Tabla 6.14: Frenos tipo NDT según DIN 16.435

Tipo	Par mínimo (Nm)	Par máximo (Nm)	Peso (kg)
160-255	50	100	23
200-255	90	180	29
250-255	110	210	34
200-356	140	280	35
250-256	190	370	40
315-356	240	480	59
315-506	380	750	62
315-806	650	1.300	63
400-506	380	750	85
400-806	660	1.320	87
400-1306	1.000	2.000	107
500-806	700	1.400	125
500-1306	1.100	2.200	145

6.2.8 Reductor

Calculamos la relación de transmisión, que nos determinará el reductor a escoger, mediante la siguiente fórmula:

$$i = \frac{\pi \cdot D_T \cdot n_2 \cdot n_T}{v_{elevacion} \cdot n_r} \quad \text{Ecuación (6.46)}$$

En donde:

- i es la relación de transmisión.
- D_T es el diámetro exterior del tambor en m.
- n_2 es la velocidad que nos proporciona el motor escogido en rpm.
- n_T es el número de salidas de cable del tambor.
- $v_{elevacion}$ es la velocidad de elevación escogida en m/min.
- n_r es el número de ramales en el aparejo.

En la tabla siguiente seleccionaremos un reductor que tenga una relación de transmisión mayor a la obtenida en la ecuación anterior.

Tabla 6.15: Reductores de la serie TH-18 de 3 etapas

i_{nominal}	i_{real}	n_{entrada}	n_{salida}	Par
25/1	24,02	1.500	60	10.600
28/1	29,30		54	11.100
31.5/1	32,52		48	9.900
36.5/1	34,27		42	10.200
40/1	38,03		38	10.200
45/1	43,21		33	9.000
50/1	48,59		30	11.000
56/1	56,82		27	10.400
63/1	60,84		24	10.000
71/1	70,04		21	9.000
80/1	80,57		19	10.300
90/1	94,22		17	10.900
100/1	100,90		15	10.500
112/1	116,75		13	9.300
125/1	128,20		12	8.600

6.2.9 Acoplamiento

En el mecanismo de elevación será necesario colocar un acoplamiento entre el motor y el reductor, sobre este acoplamiento actuará el freno.

Para el acoplamiento motor-freno-reductor la fórmula a usar será:

$$T_{MFR} = K \cdot T_M \quad \text{Ecuación (6.47)}$$

Donde:

- T_{MFR} es el par que ha de soportar el acoplamiento motor-freno-reductor.
- K es un factor de servicio que estimaremos en 2.
- T_M es el par máximo del motor calculado.

Tabla 6.16: Acoplamientos flexibles de dientes abombados

Número	Par (Nm)	Peso (kg)
5	115	0,4
10	200	0,9
20	340	1,2
35	600	2
40	900	3
50	1.700	6
60	2.800	10
70	3.800	15
85	6.600	21
100	9.200	30
120	12.750	38
135	17.600	50
150	24.500	66
165	38.000	100
180	47.000	135
195	63.000	170
210	83.000	260
230	112.000	350

6.3 MECANISMO DE TRASLACION

6.3.1 Motor

Igual que al motor del equipo elevación, lo dotaremos de una protección IP 55, que según DIN 4050, CEI 144 y CEI 525 es una protección absoluta contra contactos, acumulación de polvo y chorros de agua.

La potencia teórica necesitada en el tambor, en CV, es:

$$HP = \frac{(G_1 + G_2) \cdot w \cdot v_{\text{traslacion}}}{4500 \cdot \eta} \quad \text{Ecuación (6.49)}$$

Donde:

- G_1 es el peso muerto del carro en daN.
- G_2 es el peso de la carga útil y los elementos de suspensión en daN.
- $v_{\text{traslacion}}$ es la velocidad que estimemos en m/min.
- w es el coeficiente de rozamiento, aplicaremos el valor de 0,07.
- η es un coeficiente de rendimiento mecánico, que estimaremos en 0,9.
- 4500 es el factor de conversión de las unidades usadas a CV.

Con el valor de la potencia obtenido entraremos en la tabla 6.13 y escogeremos el motor necesario para nuestra grúa.

Una vez escogido el motor, aplicamos otra vez la ecuación 6.49 con el nuevo valor del rendimiento del motor obtenido en la tabla anterior. Así, comprobamos si la potencia del motor escogido es realmente superior a la exigida por nuestra grúa, en caso negativo deberemos tomar un motor más potente.

Además de la potencia de funcionamiento, nuestro motor debe de poder proporcionar un par mayor que el par de arranque necesario. A continuación calcularemos el par de arranque de la grúa, y si el motor previamente elegido o es capaz de proporcionarlo, deberemos tomar un motor de mayor potencia.

$$M_a = M_w + M_b \quad \text{Ecuación (6.50)}$$

Donde:

- M_a es el par de arranque.
- M_w es el par resistente.
- M_b es el par de aceleración.

Y por partes:

$$M_w = \frac{HP \cdot 716}{n_1} \quad \text{Ecuación (6.51)}$$

Donde:

- HP es la potencia del motor en CV.
- n_1 es la velocidad nominal del motor en rpm.
- 4500 es el factor de conversión para las unidades usadas.
- M_w es el par resistente en daNm.

$$M_b = \frac{\sum G D_i^2 \cdot n_1}{375 \cdot t_a} \quad \text{Ecuación (6.52)}$$

Donde:

- ΣGD_i^2 es la suma de los momentos de inercia referidos al eje del motor.
- n_1 es la velocidad nominal del motor en r.p.m.
- t_a es el tiempo de aceleración, se tomará de 4 segundos para traslación.

Y los momentos de inercia se calculan:

$$\left. \begin{aligned} \sum GD_i^2 &= GD_{\text{masas}}^2 + GD_{\text{rotor}}^2 \\ GD_{\text{masas}}^2 &= \frac{G \cdot d^2}{\eta} \\ d &= \frac{v}{\pi \cdot n_1} \\ GD_{\text{rotor}}^2 &= 4 \cdot \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2} \end{aligned} \right\} \text{Ecuación (6.53)}$$

Donde:

- G es el peso de la carga útil, elementos de suspensión y carro en daN.
- η es el rendimiento mecánico del motor.
- v es la velocidad de traslación que hayamos estimado en m/min.
- n_1 es la velocidad nominal del motor en rpm.
- n_2 es la velocidad de funcionamiento del motor en rpm.
- $GD^2/4$ es el momento de inercia del motor.

Si el par máximo del motor escogido no es suficiente para vencer al par de arranque calculado, deberemos tomar un motor con un par máximo mayor, que ya nos cumplirá con todas las especificaciones.

6.3.2 Freno

Para calcular el par necesario en el freno, deberemos tener en cuenta el par máximo que es capaz de ejercer el motor seleccionado. Además, hay que seleccionar un coeficiente de seguridad K , de valor 2 o 2.5, en función de si se usara el mecanismo de elevación para elevar personas o no.

Como con las grúas de nuestro proyecto nunca se elevarán personas, se tomará K de valor 2, con lo que la fórmula para la selección del freno quedará:

$$M_F = K \cdot M_M = 2 \cdot M_M \quad \text{Ecuación (6.54)}$$

Entrando en la tabla 6.14 elegiremos el freno según su par necesario.

6.3.4 Acoplamiento

En el mecanismo de elevación será necesario colocar un acoplamiento a la salida del motor, sobre este acoplamiento actuará el freno. La fórmula a usar será:

$$T_{MF} = K \cdot T_M$$

Ecuación (6.55)

Donde:

- T_{MF} es el par que ha de soportar el acoplamiento motor-freno.
- K es un factor de servicio que estimaremos en 2.
- T_M es el par máximo del motor calculado.

En la tabla 6.16 elegiremos el acoplamiento que pueda soportar un par mayor a T_{MF} .

6.4 MECANISMO DE ORIENTACION

6.4.1 Corona de orientación

Para el cálculo de la corona de orientación habrá que tener en cuenta la carga axial y el momento de vuelco que ha de soportar.

La carga axial será la resultante de la suma de todas las fuerzas de dirección vertical que existen en la pluma y la contrapluma, en total:

$$S_{AXIAL} = S_{Lastre} + S_{CPluma} + S_{Servicio} + S_{Pluma} \quad \text{Ecuación (6.56)}$$

Para calcular el momento de vuelco más desfavorable que producen esas cargas se realizará la suma de los momentos que generan respecto del eje de la torre. Como el lastre se calculó para contrarrestar al resto de las fuerzas, tomando la carga de punta de pluma a medio camino, el momento de vuelco que se originara en la corona en el caso más desfavorable será:

$$M_V = S_{Servicio} \cdot \frac{E}{2} \quad \text{Ecuación (6.57)}$$

En la figura 4.1 puede verse una representación de la carga y la distancia usadas arriba.

Con estos dos datos ya calculados, se entraría en grupos de tablas como la de la figura 6.11 y se seleccionaría una corona que resistiera esos esfuerzos.

Además, deberemos tener en cuenta que el diámetro de la corona no deberá exceder de 1 metro. Ya que esta es la medida del lateral de la torre, la corona irá colocada en la parte superior de ésta, y por medidas de seguridad los elementos de la corona no pueden sobresalir.

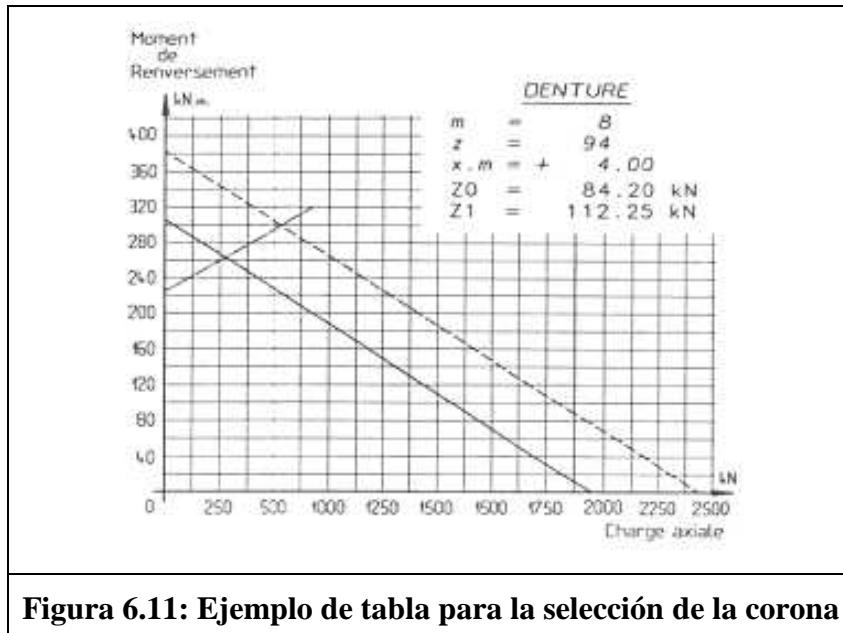


Figura 6.11: Ejemplo de tabla para la selección de la corona

6.4.2 Motor

El accionamiento de este mecanismo es el que se encarga de mover la corona. Está compuesto por un grupo motor-reductor-freno.

El primer paso es calcular la potencia necesaria en el motor:

$$HP_R = \frac{M_R \cdot n \cdot w}{716 \cdot \eta} \quad \text{Ecuación (6.58)}$$

Donde:

- HP_R : Potencia necesaria en el motor del equipo de rotación.
- M_R : Par a efectuar por el equipo de rotación.
- n : velocidad angular.
- w es el coeficiente de rozamiento, aplicaremos el valor de 0,07.
- η : Rendimiento mecánico que estimaremos en 0,9.

Calcularemos M_R como:

$$M_R = I \cdot a_w \left\{ \begin{array}{l} I = \sum \text{inercia cargas} = \sum S \cdot \text{distancia}^2 \\ a_w = \frac{n \cdot 2\pi}{60} \cdot \frac{1}{t_a} \end{array} \right. \quad \text{Ecuación (6.59)}$$

Donde:

- n : velocidad angular.
- t_a es el tiempo de aceleración, se tomará de 15 segundos para rotación.

- La inercia de las cargas se calcula como la suma de cada carga (pluma, contrapluma, lastre y carga máxima en punta de pluma) por su distancia a la corona al cuadrado.

Entrando en la tabla 6.13 elegiremos el motor según su potencia necesaria.

Debemos de tener en cuenta que, según la normativa, la grúa debe de girar tanto a derechas como a izquierdas, por lo que hará falta que, como en todos los otros motores calculados, el sentido de giro sea reversible.

6.4.3 Freno

Para calcular el par necesario en el freno, deberemos tener en cuenta el par máximo que es capaz de ejercer el motor seleccionado. Además, hay que seleccionar un coeficiente de seguridad K , de valor 2 o 2.5, en función de si se usara el mecanismo de elevación para elevar personas o no.

Como con las grúas de nuestro proyecto nunca se elevarán personas, se tomará K de valor 2, con lo que la fórmula para la selección del freno quedará:

$$M_F = K \cdot M_M = 2 \cdot M_M \quad \text{Ecuación (6.60)}$$

Entrando en la tabla 6.14 elegiremos el freno según su par necesario.

6.4.4 Acoplamiento

En el mecanismo de elevación será necesario colocar un acoplamiento a la salida del motor, sobre este acoplamiento actuará el freno. La fórmula a usar será:

$$T_{MF} = K \cdot T_M \quad \text{Ecuación (6.61)}$$

Donde:

- T_{MF} es el par que ha de soportar el acoplamiento motor-freno.
- K es un factor de servicio que estimaremos en 2.
- T_M es el par máximo del motor calculado.

En la tabla 6.16 elegiremos el acoplamiento que pueda soportar un par mayor a T_{MF} .

7. PROGRAMA EN VISUAL BASIC

7.1 INTRODUCCION

7.1.1 Visual Basic

Visual Basic es uno de los principales lenguajes de programación que se pueden encontrar hoy en día.

La palabra "Visual" hace referencia al método que se utiliza para crear la interfaz gráfica de usuario (GUI). En lugar de escribir numerosas líneas de código para describir la apariencia y la ubicación de los elementos de la interfaz, simplemente se pueden agregar objetos prefabricados en su lugar dentro de la pantalla. La utilización es muy similar a los programas clásicos de dibujo, tales como MicroStation o Autocad.

La palabra "Basic" hace referencia al lenguaje BASIC (Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code), que fue creado en su versión original en el Dartmouth College, con el propósito principal de servir a aquellas personas que estaban interesadas en iniciarse en algún lenguaje de programación. Después de sufrir varias modificaciones, en el año 1.978 se estableció el lenguaje BASIC estándar.

7.1.2 Introducción al Visual Basic

Debido a la sencillez inicial del programa, el lenguaje se ganó rápidamente el desprecio de los programadores avanzados, ya que únicamente lo consideraban "un simple lenguaje para principiantes". Sin embargo, al final, contra todo pronóstico, ha demostrado ser un lenguaje utilizado por más programadores que ningún otro lenguaje en la historia de la informática o computación.

Primero fue GW-BASIC, luego se transformó en QuickBASIC y actualmente se lo conoce como Visual Basic.

El programa Visual Basic ha evolucionado a partir del lenguaje BASIC original y hoy en día, contiene centenares de instrucciones, funciones y palabras clave, muchas de las cuales están directamente relacionadas con la interfaz gráfica desarrollada para Windows.

El Visual Basic combina la sencillez del BASIC con un poderoso lenguaje de programación Visual que juntos permiten desarrollar robustos programas de 32 bits para Windows. Esta fusión de gran sencillez y cuidada estética permitió que el monopolio de Microsoft se ampliara mucho más, ya que el lenguaje de Visual Basic únicamente es compatible con las aplicaciones de Windows, y con el sistema operativo de la misma empresa. Esto implica que el programa Visual Basic no puede ser utilizado bajo los sistemas operativos no basados en tecnología Windows, como, por ejemplo, Linux, Unix, Mac Os, etc.

Los programadores principiantes pueden crear aplicaciones útiles únicamente aprendiendo unas pocas palabras clave, pero, al mismo tiempo, la eficacia del lenguaje es tal que permite a los profesionales acometer cualquier objetivo que pueda alcanzarse mediante cualquier otro lenguaje de programación de Windows, como, por ejemplo, C++, Pascal, etc.

Visual Basic ya no es "un lenguaje para principiantes", sino que es una perfecta alternativa para los programadores de cualquier nivel que deseen desarrollar aplicaciones compatibles con Windows.

El lenguaje de programación Visual Basic no es de uso exclusivo del programa Visual Basic. La edición para aplicaciones del sistema de programación de Visual Basic, incluida en Microsoft Excel, Microsoft Access y muchas otras aplicaciones de Windows, utilizan el mismo lenguaje.

El sistema de programación de Visual Basic, Scripting Edition (VBScript) es un lenguaje de secuencias de comandos ampliamente difundido y un subconjunto del lenguaje Visual Basic.

7.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA

7.2.1 Introducción

El programa desarrollado tiene una interfaz muy simple, que se explicará con mayor detenimiento en el manual de usuario. La sencillez de la interfaz va a permitir una comprensión rápida e intuitiva por parte del usuario.

El programa realizado consta de dos partes bien diferenciadas: El cálculo de la grúa propiamente dicho y la visualización de la documentación adjunta. Se puede acceder a cualquiera de las dos desde el menú principal del programa.

7.2.2 Cálculos realizados

El programa realizará internamente las operaciones necesarias para tener en cuenta las hipótesis más desfavorables que se puedan presentar. De esta forma el usuario no tiene por qué conocer la norma al respecto ni las fórmulas y tablas usadas, aunque todas éstas se podrán ver en la sección de documentación.

Tras la introducción de los datos iniciales de la grúa: Altura, longitud de la pluma, carga a elevar en punta de pluma, tipo de trabajo y horas reales de trabajo, el programa va pasando por diferentes pantallas (formularios), calculando en cada uno de ellos varias partes de la grúa, a veces necesitando la introducción de nuevos datos por parte del usuario. Los formularios disponibles son los siguientes:

- 1) Introducción de datos y cálculo de la clasificación de aparato.
- 2) Cálculo del gancho y aparejo.
- 3) Cálculo del cable, introduciendo el número de ramales.
- 4) Cálculo de las poleas, definiendo sus radios y llanta.

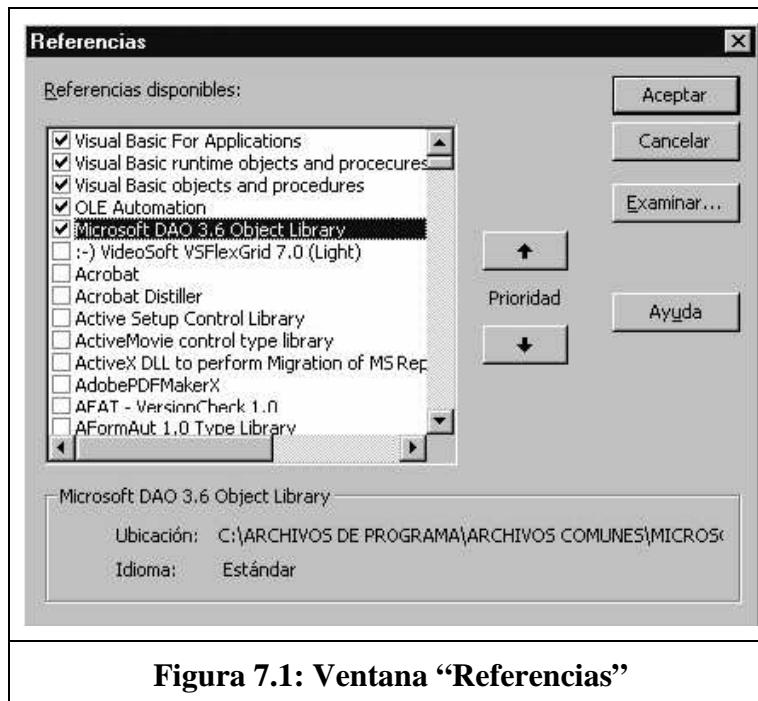
- 5) Cálculo del tambor.
- 6) Cálculo de los accionamientos del equipo de elevación, a partir de la velocidad de elevación.
- 7) Cálculo de los accionamientos del equipo de traslación, a partir de la velocidad de traslación.
- 8) Selección de módulos, llamada a Matlab y cálculo de la estructura de la grúa.
- 9) Generación del código para el dibujo de la deformada de la grúa.
- 10) Cálculo de la corona y accionamientos del equipo de orientación, a partir de la velocidad de giro.
- 11) Generación del documento de Word con los datos anteriormente calculados.

Como ya se ha comentado, el programa realiza internamente todos los cálculos necesarios. Estos, gracias a la simplicidad del lenguaje, son muy sencillos de realizar, y sólo hay que seguir las indicaciones y fórmulas indicadas en el apartado 5 de la presente memoria.

Los únicos formularios que incluyen otros códigos a parte de los puramente matemáticos y de cálculo, son los formularios 8, 9 y 11, que pasamos a comentar a continuación.

7.2.2 Formulario 8 - Llamada a Matlab

Para que Visual Basic pueda interactuar con otros programas ha de haberse activado la siguiente opción: Microsoft DAO 3.6 Object Library.



Dicha librería se puede activar a través de la barra de comandos principales siguiendo la siguiente ruta:

- Proyecto – Referencias...

Esta acción abre la ventana de la figura 6.1, donde se pueden activar y desactivar diferentes librerías incluidas en el programa Visual Basic.

Para poder comunicar Visual Basic con Matlab se ha utilizado el sistema conocido como DDE, Intercambio Dinámico de Datos. Las propiedades de los principales controles relacionadas con el DDE son las siguientes:

- LinkTopic: Indica la aplicación con la que se realizara el intercambio de datos. En nuestro caso usaremos LinkTopic = "matlab|engine"
- LinkMode: Indica el modo de intercambio de datos. En nuestro caso usaremos LinkMode = 2 (modo de intercambio de datos manual)
- LinkTimeout: Define el tiempo de espera en la conversación, nos conviene que sea elevado, porque las funciones pueden tardar mucho en ejecutarse. En nuestro caso usaremos LinkTimeout = 32767 (máximo tiempo permitido)
- LinkExecute: Envío de órdenes al programa con el que hemos realizado la conexión. En nuestro caso usaremos dos órdenes, una para entrar al directorio en el que están instaladas las funciones de Matlab y otra para ejecutar la función del cálculo de la grúa.
- LinkItem: Indica el tipo de elemento de datos que se va a intercambiar durante la operación. En nuestro caso usaremos LinkItem = "engStringResult" (se intercambiarán cadenas de texto)
- LinkRequest: Solicitud de datos al programa con el que se realiza la conexión. Asignaremos estos datos a diferentes cuadros de texto del Visual Basic.

7.2.3 Formulario 9 - Generar el código para el dibujo de la deformada

Al realizar la llamada a Matlab nos encontramos con el siguiente problema: La función que realizamos para dibujar la deformada de la grúa no funciona correctamente.

Esto se debe a que la llamada desde Visual Basic no permite que Matlab abra ningún cuadro de gráficos.

Para solucionar esto y que pueda verse la deformada de la grúa, generaremos unas líneas de código en un cuadro de texto. Estas líneas podrán copiarse y pegarse en la ventana de comandos de Matlab, programa que ya teníamos abierto y minimizado al realizar la llamada DDE en el formulario anterior.

Al utilizar el código generado desde el propio Matlab, se nos abre el cuadro de gráficos cuando es solicitado y se dibujan las deformadas solicitadas. Una vez abierto el cuadro de gráficos, se le puede cambiar el tamaño, la escala de los ejes, girarlo en diferentes posiciones, etc...

7.2.4 Formulario 11 - Generar un documento de Word al final del cálculo

En el último formulario del cálculo, y para obtener todos los datos calculados por el programa, generaremos un documento de Word. Para ello nos valemos de las siguientes líneas de código:

- Dim MSWord As Object: Dimensionamos una variable como un objeto.
- Set MSWord = CreateObject("Word.Basic"): Creamos la variable objeto como un documento de Word desde Visual Basic.
- FileNewDefault: Abrimos un archivo nuevo.
- FontSize xx: Cambiamos el tamaño de letra a xx.
- Insert "texto": Escribimos texto en la línea actual del documento.
- Insert vbCrLf: Insertamos un salto de carro en la línea actual.
- AppMaximize: Maximizamos la ventana con el documento creado.
- FileClose: Cerramos el documento creado. Automáticamente, se nos abrirá un cuadro de texto desde el que podremos guardar el nuevo documento en cualquier lugar del disco duro.

7.2.5 Documentación adjunta al programa

La segunda parte del programa permite que Windows abra cualquier tipo de archivo, siempre que éste tenga algún programa asignado como predeterminado. Para ello nos valemos de una llamada a las propias rutinas DLL de Windows (Dynamic Link Library) mediante el comando siguiente:

```
Shell ("rundll32.exe url.dll,FileProtocolHandler " & ("path"))
```

Donde path indica la dirección del disco duro en la que se encuentra el archivo a abrir.

Este comando permite abrir incluso archivos ejecutables, carpetas de archivos y páginas web.

Si el archivo al que se llama no se encuentra en la dirección disponible, o éste no tiene un programa predeterminado por Windows, nos aparecerá una ventana de error que nos avisará del mismo, y nos permitirá continuar usando el programa sin problemas.

Hemos dividido esta sección en cuatro partes. En cada una de ellas encontramos los siguientes documentos y formatos para visualizar:

MANUALES Y CODIGO FUENTE (en formato .doc y .pdf):

- Manual del programa realizado que se incluye en este proyecto.
- Carpeta con el código fuente de Visual Basic.
- Carpeta con el código fuente de Matlab.

TABLAS Y FORMULARIOS (en formato .doc y .pdf):

- Tablas usadas en los cálculos de este programa.
- Tablas de los perfiles usados en este programa.
- Definiciones de los módulos usados en este programa.
- Fórmulas usadas en el cálculo de las cargas de la grúa.
- Fórmulas usadas en el cálculo matricial de la grúa.
- Fórmulas usadas en el cálculo de los mecanismos

PLANOS (en formato .dft, .dgn .dwg y .pdf):

- Planos de los diversos módulos de la grúa.
- Plano del conjunto de la grúa.
- Plano con vista explosionada del conjunto de la grúa.

PIEZAS EN 3D (en formato .par y .asm):

- Dibujos en 3D de los diversos módulos de la grúa.
- Dibujos en 3D del conjunto de la grúa

7.3 PROCEDIMIENTOS FINALES

7.3.1 Programa de instalación

Para realizar la instalación del programa se ha utilizado el Install Maker Pro. Este programa permite crear instaladores para cualquier tipo de aplicación.

Install Maker Pro comprime la aplicación y crea un archivo ejecutable el cual se encarga de descomprimir e instalar automáticamente cualquier aplicación.

Además este programa tiene muchas opciones seleccionables, como:

- Crear iconos en el escritorio y el menú inicio.
- Permitir ejecutar el programa al acabar la instalación.
- Mostrar un archivo al acabar la instalación.
- Guardar registros del path de instalación.
- Instalar archivos necesarios en los directorios de sistema de Windows.
- Mostrar o no imágenes.
- Mostrar textos de información.
- Crear un archivo para la desinstalación.

El problema que me encontré al buscar este programa fue encontrar solamente dos versiones: Una shareware en español y otra completa en francés.

La versión shareware mostraba al final de la instalación una pantalla de texto, lo que hacía que quedara muy poco profesional. De manera que tomé la versión completa en francés y creé un parche para que el programa de instalación aparezca completamente en español.

7.3.2 Reproducción automática

Además del programa de instalación, también hemos creado el siguiente archivo:

arranque.inf

Este archivo sirve para hacer que el programa de instalación realizado se ejecute directamente al introducir el CD en el lector en los ordenadores que tengan activada la reproducción automática.

El comando que se incluye en este archivo es el siguiente:

```
[AutoRun]  
OPEN = VULCANO_Setup.exe
```

8. EJEMPLO DE CALCULO

8.1 GENERALIDADES

8.1.1 Introducción

En este apartado de la memoria se realizara un ejemplo de cálculo manual de los mecanismos de una grúa torre. De esta forma, podremos comparar y comprobar que los datos proporcionados por el programa realizado en Visual Basic son correctos. Para ello utilizaremos los siguientes datos iniciales:

- Altura de la torre: 30 m.
- Longitud de la pluma: 50 m.
- Carga máxima en la punta de la pluma: 1.000 kg.
- Vida de funcionamiento real: 40.000 horas
- Tipo de trabajo: Moderado

8.1.2 Clasificación de aparatos y mecanismos

Con un estado de carga Moderado, los coeficientes nominales del espectro de cargas valen:

$$K_m = 0,25$$

Con estos valores entramos a la tabla 4.1 y obtenemos la siguiente clasificación:

Clase de utilización del aparato: T 8
Grupo de clasificación del aparato: M 8

8.2 MECANISMO DE ELEVACION

8.2.1 Gancho

La carga máxima que deberá elevar nuestra grúa es 2.000 kg. Con este dato seleccionamos el gancho y su suspensión de las tablas 6.1 a 6.4:

Elegiremos un gancho simple de número 2,5 con pestillo de seguridad.
Usaremos un rodamiento 51.108.

El número de la traviesa será 2.5 y su diámetro 40 mm.

La rosca de la tuerca será métrica M36.

No será necesario el uso de pieza de aseguramiento.

8.2.2 Aparejo

Como siempre en este tipo de gruas, usaremos un aparejo aligerado. Más adelante decidiremos si usar uno de 2 o 4 ramales.

8.2.3 Cable

Para este ejemplo, supondremos que utilizaremos un aparejo de 4 ramales.

Calculamos el valor de la solicitud del cable a partir de la carga máxima, el coeficiente de rozamiento y el número de ramales. Usaremos 4 ramales y el coeficiente de rozamiento lo obtenemos de la tabla 6.5 entrando con 6 poleas (ver figura 6.6). Obtenemos:

$$S = \frac{2.009}{4 \cdot 0,95} = 528,68 \text{ kg.}$$

Obteniendo K_C de la tabla 6.6 calculamos el diámetro mínimo del cable:

$$d_{\min} = 0,425 \cdot \sqrt{528,68} = 9,77 \text{ mm.}$$

Obteniendo Z_P de la tabla 6.7 calculamos la tensión de rotura efectiva que éste debe de soportar:

$$\sigma_0 = 11,2 \cdot 528,68 = 5921,216 \text{ kg/mm}^2.$$

Elegiremos el primer cable que nos cumpla las dos condiciones anteriores de la tabla 6.8 (cables antigrinatorios 17x7₍₁₊₆₎+1) y calcularemos los esfuerzos a los que está sometido. Las características del cable elegido son las siguientes:

Diámetro del cable: 10,0 mm.

Diámetro del mayor hilo del cable: 0,7 mm.

Sección total del cable: 45,81 mm².

Carga de rotura efectiva del cable: 6900 kg/mm².

Calculamos la tensión de extensión:

$$\sigma_{\text{extension}} = 1,1 \cdot \frac{528,68}{45,81} = 12,69 \text{ kg/mm}^2.$$

La longitud de cable necesaria será:

$$L = (5 \cdot 30 + 50) \cdot 1.000 = 200000 \text{ mm.}$$

8.2.4 Poleas

Debido a la configuración del aparejo, harán falta 6 poleas. Demos tomar un diámetro de polea mayor que el diámetro mínimo calculado mediante la ecuación 6.13:

$$D_{\text{polea}} = 10 \cdot 20 \cdot 1,25 = 250 \text{ mm.}$$

Tomamos, de la tabla 6.12, poleas de las siguientes características:

Diámetro de las poleas: 250 mm.
 Diámetro del cubo de las poleas: 120 mm.
 Anchura del cubo de las poleas: 65 mm.
 Anchura de la garganta de las poleas: 34 mm.

Realizando los cálculos de garganta y radios para diferentes configuraciones, obviados aquí por su extensión, optamos por los valores siguientes:

Espesor de la llanta: 5 mm.
 Número de radios: 4
 Área de los radios: 6 x 35 mm.

Que nos aporta unos coeficientes de seguridad de más de 3,5 para radios y llanta.

Una vez seleccionadas las poleas podemos calcular la vida del cable mediante la fórmula de Niemann:

$$V = \frac{170.000}{1,5} \cdot \left(10 \cdot 1 \cdot 1,04 \cdot \frac{\frac{250}{10} - \frac{9}{1}}{(12,69 \cdot 9,81) + 40} \right)^2 = 165190 \text{ ciclos}$$

8.2.5 Tambor

Se empleará un tambor de una salida.

De la tabla 6.11 se obtienen los valores de las dimensiones que intervienen en el ranurado:

$$s = 12 \quad r = 5,5 \quad a = 1$$

El diámetro mínimo del tambor se calculará aplicando la ecuación 6.13, en la que el valor h_2 vale 1 y obtendremos el valor de h_1 de la tabla 6.9:

$$D_T = 10 \cdot 1 \cdot 28 = 280 \text{ mm.}$$

Entramos en la tabla 6.14, para material de tensión admisible de 16 kg/mm², y elegimos el diámetro y espesor del tambor:

$$D = 300 \text{ mm.} \quad e = 40 \text{ mm.}$$

La longitud de cable a enrollar en el tambor será:

$$L_e = 30.000 \cdot 4 + 50.000 + 3 \cdot \pi \cdot 300 = 173000 \text{ mm.}$$

Por lo que el número de espiras que necesitará el tambor serán:

$$n_{\text{espiras}} = \frac{173000}{\pi \cdot 300} = 184$$

Y por tanto, la longitud útil del tambor, aplicando el factor s y teniendo en cuenta el tramo en ambos extremos sin mecanizar y el espesor de las dos paredes en el extremo del tambor, será:

$$L_{\text{util}} = 184 \cdot 12 + 2 \cdot 30 + 2 \cdot 50 = 2368 \text{ mm.}$$

$$\frac{2368}{300} = 7,89 > 3$$

Según la normativa vigente, la longitud total del tambor partido del diámetro del mismo ha de ser menor de 3 para evitar el pandeo. Como esta condición no se cumple, habrá que aumentar el diámetro del tambor hasta que sea necesario.

Esto nos ocurrirá varias veces. Aquí no incluiremos los cálculos repetitivos y pasaremos directamente al resultado final:

$$D = 500 \text{ mm.} \quad e = 60 \text{ mm.}$$

La longitud de cable a enrollar en el tambor será:

$$L_e = 30.000 \cdot 4 + 50.000 + 3 \cdot \pi \cdot 500 = 175000 \text{ mm.}$$

Por lo que el número de espiras que necesitará el tambor serán:

$$n_{\text{espiras}} = \frac{175000}{\pi \cdot 500} = 111$$

Y por tanto, la longitud útil del tambor, aplicando el factor s y teniendo en cuenta el tramo en ambos extremos sin mecanizar y el espesor de las dos paredes en el extremo del tambor, será:

$$L_{\text{util}} = 112 \cdot 12 + 2 \cdot 30 + 2 \cdot 50 = 1500 \text{ mm.}$$

$$\frac{1500}{500} = 3 = 3$$

Se cumple la normativa vigente. Pasamos a comprobar las tensiones a las que está sometido el tambor:

· Calculamos los momentos que se generan y los módulos resistentes del tambor:

$$M_t = 2 \cdot 520 \cdot \frac{1.200}{2} = 264500 \text{ kgmm.}$$

$$M_f = 2 \cdot 529 \cdot \frac{1500}{2} = 784500 \text{ kgmm.}$$

$$W_t = \frac{\pi \cdot (500^4 - 380^4)}{32 \cdot \frac{500}{2}} = 16355382 \text{ mm}^3.$$

$$W_f = \frac{40888455}{2} = 8177691 \text{ mm}^3.$$

· Cálculo a torsión:

$$\tau = \frac{264500}{16355382} = 0,01617 < 16 \text{ kg/mm}^2.$$

· Cálculo a flexión:

$$\sigma_f = \frac{784500}{8177691} = 0,096 < 16 \text{ kg/mm}^2.$$

· Cálculo a compresión:

$$\sigma_c = 0,85 \cdot \frac{2 \cdot 529}{60 \cdot 12} = 1,249 < 16 \text{ kg/mm}^2$$

· Cálculo teniendo en cuenta el esfuerzo equivalente

$$\sigma_{eq} = \sqrt{0,096^2 + 1,249^2 + 3 \cdot 0,01617^2} = 1,253 < 16 \text{ kg/mm}^2.$$

Como el valor obtenido en los cuatro cálculos es menor que los 16 kg/mm² que puede soportar nuestro material, el tambor estará correctamente seleccionado.

Calculamos el peso del tambor y el cable enrollado, tomando la densidad del acero $\rho = 7,8 \text{ kg/m}^3$:

$$\text{Peso} = 11 \cdot (1,2^2 \cdot (0,69 + 0,055) - 0,96^2 \cdot 0,69) + 243,62 \cdot 0,55 = 138,8 \text{ kg.}$$

8.2.6 Motor

Como nuestro motor está destinado a una grúa torre al aire libre, lo dotaremos de una protección IP 55, que según DIN 4050, CEI 144 y CEI 525 es una protección absoluta contra contactos, acumulación de polvo y chorros de agua.

Determinamos una velocidad de elevación máxima de 30m/min, con este dato calculamos la potencia necesaria en el motor:

$$HP = \frac{2009 \cdot 30}{4500 \cdot 0.9} = 14,8 \text{ CV.}$$

Seleccionaremos el siguiente motor de la tabla 6.13:

Tipo de motor: 1LS1 - 166
 Potencia del motor: 15 CV.
 Velocidad de giro del motor: 1440 rpm.
 Par máximo del motor: 251,6 Nm.

Una vez seleccionado el motor, y tomando todos los datos necesarios de esa misma tabla, comprobamos que ese motor tiene un par de arranque suficiente:

$$M_w = \frac{15 \cdot 716}{1500} = 7,16$$

$$\sum GD_i^2 = \frac{2009 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{30 \cdot 4}{\pi \cdot 1500} \right)^2}{0,87} + 4 \cdot 0,09 \cdot \frac{1500^2}{1440^2} = 15,097$$

$$M_b = \frac{15,097 \cdot 1500}{375 \cdot 2} = 30,194$$

$$M_a = 7,16 + 30,194 = 37,354 \text{ daN} = 373,54 \text{ N}$$

El motor elegido no es capaz de proporcionar el par necesario, por lo que deberemos tomar uno mayor y repetir los cálculos hasta obtener aquel que los cumpla. Obtenemos un resultado satisfactorio para el motor siguiente:

Tipo de motor: 1LS2 - 155
 Potencia del motor: 25 CV.
 Velocidad de giro del motor: 1450 rpm.
 Par máximo del motor: 471,2 Nm.

8.2.7 Freno

Tomando un factor de seguridad de 2 y el par máximo del motor,

$$T_F = 2 \cdot 471,2 = 942,4 \text{ Nm.}$$

Entrando en la tabla 6.14 elegimos el siguiente freno según el par calculado:

Tipo de freno: 315-806
 Par mínimo del freno: 650 Nm.
 Par máximo del freno: 1300 Nm.

8.2.8 Reductor

Calculamos la relación de transmisión, que nos determinará el reductor a escoger, mediante la ecuación 6.46:

$$i = \frac{\pi \cdot 0,5 \cdot 1450}{30 \cdot 4} = 18,98$$

En la tabla 6.15a y b seleccionaremos un reductor que tenga una relación de transmisión mayor a la obtenida en la ecuación anterior. Las características del reductor elegido son:

Relación de transmisión del reductor: 25/1
Velocidad de giro de salida: $1450 / 25 = 58$ rpm.

8.2.9 Acoplamiento

Tomando un factor de seguridad de 2 y el par máximo del motor,

$$T_{MFR} = 2 \cdot 471,2 = 942,4 \text{ Nm.}$$

Entrando en la tabla 6.16 elegimos el siguiente acoplamiento según el par calculado:

Tipo de acoplamiento: 50
Par: 1700 Nm.

8.3 MECANISMO DE TRASLACION

8.3.1 Motor

Igual que al motor de elevación, lo dotaremos de una protección IP 55, que es una protección absoluta contra contactos, acumulación de polvo y chorros de agua.

Determinamos una velocidad de elevación máxima de 40 m/min, y suponemos que el peso del carro es un 20% del peso máximo a elevar. Con estos datos calculamos la potencia necesaria en el motor:

$$HP = \frac{1,2 \cdot 2009 \cdot 0,07 \cdot 40}{4500 \cdot 0,9} = 1,6 \text{ CV.}$$

Seleccionaremos el siguiente motor de la tabla 6.13:

Tipo de motor: 1LS1 - 133
Potencia del motor: 5,5 CV.
Velocidad de giro del motor: 1410 rpm.
Par máximo del motor: 75,6 Nm.

Una vez seleccionado el motor, y tomando todos los datos necesarios de esa misma tabla, comprobamos que ese motor tiene un par de arranque suficiente:

$$M_w = \frac{5,5 \cdot 716}{1500} = 2,63$$

$$\sum GD_i^2 = \frac{2009 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{40}{\pi \cdot 1500} \right)^2}{0,77} + 4 \cdot 0,03 \cdot \frac{1500^2}{1410^2} = 1,98$$

$$M_b = \frac{1,98 \cdot 1500}{375 \cdot 4} = 1,98$$

$$M_a = 2,63 + 1,98 = 4,61 \text{ daN} = 46,1 \text{ N}$$

El motor elegido nos proporciona el par necesario.

8.3.2 Freno

Tomando un factor de seguridad de 2 y el par máximo del motor,

$$T_F = 2 \cdot 75,6 = 151,2 \text{ Nm.}$$

Entrando en la tabla 6.14 elegimos el siguiente freno según el par calculado:

Tipo de freno: 200-255
 Par mínimo del freno: 90 Nm.
 Par máximo del freno: 180 Nm.

8.3.3 Acoplamiento

Tomando un factor de seguridad de 2 y el par máximo del motor,

$$T_{MF} = 2 \cdot 75,6 = 151,2 \text{ Nm.}$$

Entrando en la tabla 6.16 elegimos el siguiente acoplamiento según el par calculado:

Tipo de acoplamiento: 10
 Par: 200 Nm.

8.4 CALCULO DE LA ESTRUCTURA DE LA GRUA

Utilizando el programa realizado en Matlab obtenemos los resultados de todas las posibles configuraciones de la pluma.

Estudiando los distintos resultados, recogidos en la tabla siguiente, desechamos las dos últimas configuraciones por tener unos desplazamientos demasiado grandes y también las dos primeras por tener unos pesos excesivos.

Tabla 8.1: Resultados del cálculo estructural en mm. y kg.						
Configuración		1,1,1,1,1,5	1,1,1,2,3,6	1,1,2,3,3,6	1,2,3,3,36	2,3,3,3,3,6
Desplazamientos	X	14	14	14	14	15
	Y	1110	1109	1192	1276	1527
	Z	277	266	273	252	250
Peso del lastre		68700	59600	52000	50200	48800
Peso de la pluma		23700	20500	17700	17100	16600
Peso de la c.pluma		4000	3000	3000	3000	3000
Peso de la torre		12000	11000	10000	10000	10000
Perfiles de la pluma		o 250.9 o 60 # 225.8	o 250.8 o 55 # 200.8	o 225.8 o 50 # 200.7	o 200.9 o 50 # 200.7	o 200.9 o 50 # 200.7
Perfiles de la torre		o 300.10 # 80.6	o 275.10 # 80.6	o 275.9 # 80.6	o 275.9 # 80.6	o 275.10 # 80.6

Usaremos una configuración de la pluma como la de la figura siguiente (4,0,1,1,2,3,3,6):

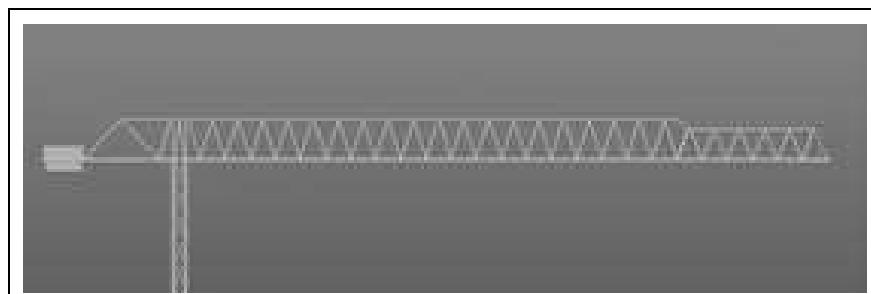
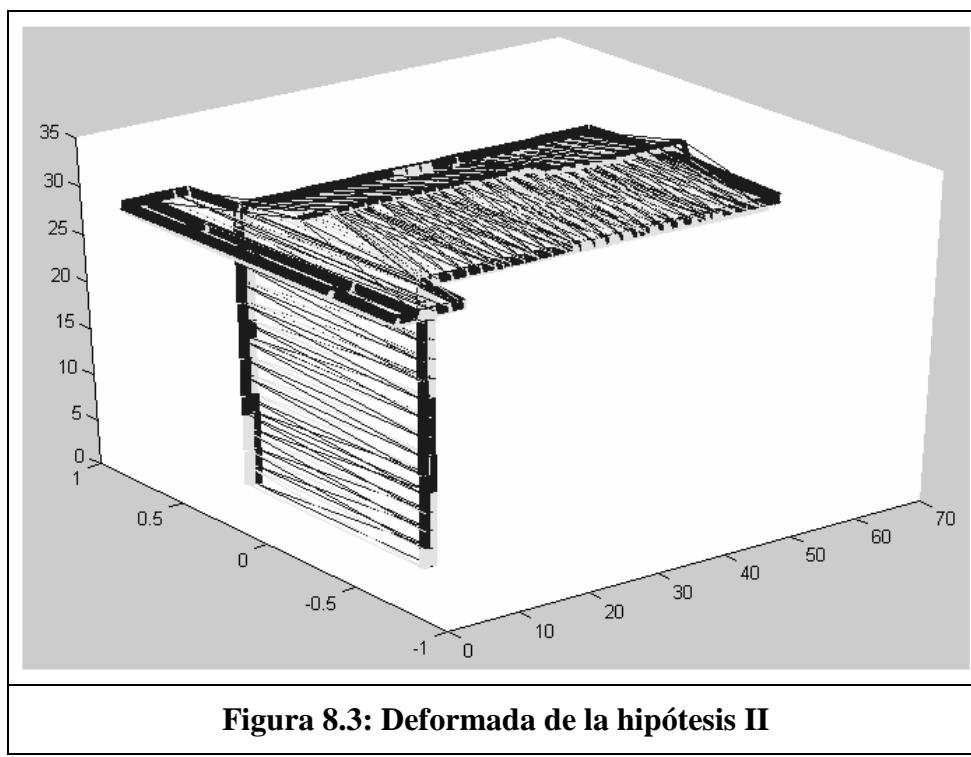
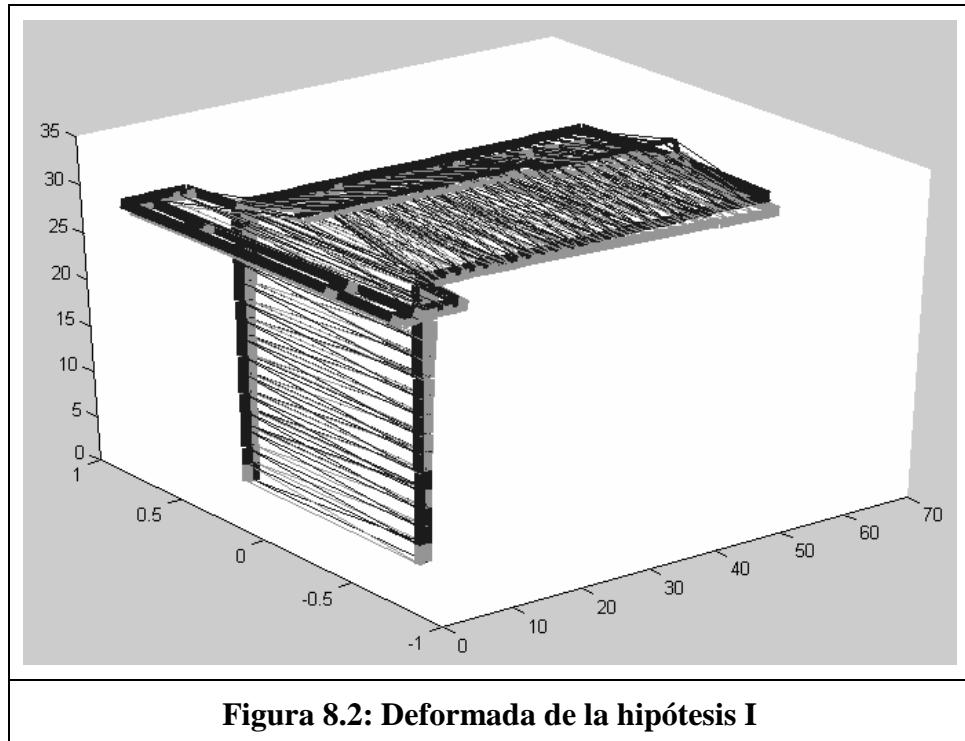


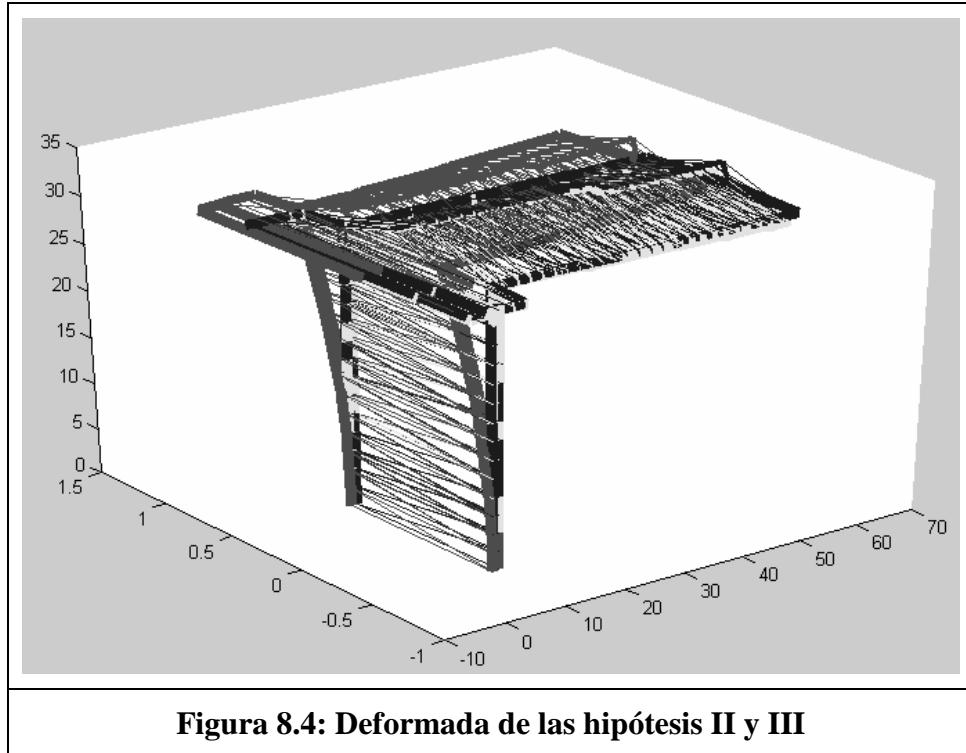
Figura 8.1: Configuración de la pluma usada

Hemos realizado estos cálculos porque hay datos que nos serán necesarios en el cálculo del equipo de orientación.

A continuación, incluimos unas imágenes con las deformadas de la configuración escogida dibujadas por el programa que hemos realizado en Matlab.

Hay que indicar que la escala, asignada automáticamente por Matlab, es diferente en cada uno de los ejes.





8.5 MECANISMO DE ORIENTACION

8.5.1 Corona de orientación

Para el cálculo de la corona de orientación habrá que tener en cuenta la carga axial y el momento de vuelco que ha de soportar.

La carga axial será la resultante de todas las fuerzas de dirección vertical que existen en la pluma y la contrapluma, en total:

$$S_{AXIAL} = 52000 + 2000 + 3000 + 17700 = 74700 \text{ kg.}$$

Para calcular el momento de vuelco más desfavorable que producen esas cargas se realizará la suma de los momentos que generan respecto del eje de la torre. Como el lastre se calculó para contrarrestar al resto de las fuerzas, tomando la carga de punta de pluma a medio camino, el momento de vuelco que se originara en la corona en el caso más desfavorable será:

$$M_v = 1.000 \cdot \frac{50}{2} = 25.000 \text{ kgm.}$$

Con estos dos datos ya calculados, entramos en los grupos de tablas como la de la figura 6.11 y seleccionamos la siguiente corona:

Diámetro exterior: 1.000 mm.
 Número de dientes: 125 dientes
 Módulo: 8

8.5.2 Motor

El accionamiento de este mecanismo es el que se encarga de mover la corona. Está compuesto por un grupo motor-acoplamiento-freno.

Calculamos la potencia necesaria en el motor y elegimos el correspondiente motor en la tabla 6.13:

$$HP_R = \frac{131510 \cdot 1 \cdot 0,07}{716 \cdot 0,9} = 14,28 \text{ CV.}$$

Tipo de motor: 1LS1 - 166

Potencia del motor: 15 CV.

Velocidad de giro del motor: 1440 rpm.

Par máximo del motor: 251,6 Nm.

8.3.2 Freno

Tomando un factor de seguridad de 2 y el par máximo del motor,

$$T_F = 2 \cdot 251,6 = 503,2 \text{ Nm.}$$

Entrando en la tabla 6.14 elegimos el siguiente freno según el par calculado:

Tipo de freno: 315-506

Par mínimo del freno: 380 Nm.

Par máximo del freno: 750 Nm.

8.3.3 Acoplamiento

Tomando un factor de seguridad de 2 y el par máximo del motor,

$$T_{MF} = 2 \cdot 251,6 = 503,2 \text{ Nm.}$$

Entrando en la tabla 6.16 elegimos el siguiente acoplamiento según el par calculado:

Tipo de acoplamiento: 35

Par: 600 Nm.

8.6 RESULTADOS DEL PROGRAMA DE VISUAL BASIC

A continuación incluimos el documento que nos genera el programa que hemos realizado para un cálculo de una grúa de las mismas características.

Se puede comprobar que los resultados son los mismos, salvo pequeñas diferencias debidas a los redondeos en los que el programa siempre tiende al lado de la seguridad.

Esto demuestra el correcto funcionamiento del programa de Visual Basic.

DATOS INICIALES DE LA GRUA:

Altura de la torre: 30 m

Longitud de la pluma: 50 m

Carga máxima en la punta de la pluma: 1000 kg

Vida de funcionamiento real: 40000 horas

Tipo de trabajo: Moderado

CLASIFICACION DE LA GRUA:

Clase de utilización del aparato: T 8

Grupo de clasificación del aparato: M 8

Coeficiente nominal del espectro de cargar (K): 0,25

EQUIPO DE ELEVACION - GANCHO:

Número de gancho: 2.5

Tipo de gancho: simple

Carga máxima que debe soportar el gancho: 2000 kg

Rodamiento necesario: 51108

Pestillo de seguridad: necesario

Número de la traviesa: 2.5

Diámetro de la traviesa: 40 mm

Rosca de la tuerca: métrica M36

Pieza de aseguramiento: no necesaria

EQUIPO DE ELEVACION - APAREJO:

Aparejo de tipo: Aligerado

Para un número de ramales de: 4

EQUIPO DE ELEVACION - CABLE:

Coeficiente Kc: 0,425

Coeficiente Zp: 11,2

Solicitud máxima del cable: 528,68 kg

Tipo de cable: antigratorio 17x7+1

Diámetro del cable: 10 mm

Diámetro del mayor hilo del cable: 0,7 mm

Sección total del cable: 45,81 mm²

Carga de rotura efectiva del cable: 6900 kg

Tensión de extensión que ha de soportar el cable: 13 kg

Tensión de encurvación que ha de soportar el cable: 28 kg

Coeficiente de seguridad del cable: 2,9

Vida estimada del cable: 165190 ciclos

Longitud de cable necesaria: 200000 mm

EQUIPO DE ELEVACION - POLEAS:

Coeficiente h1: 20
Coeficiente h2: 1,25
Número de poleas necesarias: 6
Diámetro de las poleas: 250 mm
Diámetro exterior de las poleas: 285 mm
Diámetro del cubo de las poleas: 120 mm
Anchura del cubo de las poleas: 65 mm
Anchura de la garganta de las poleas: 34 mm
Espesor de la garganta: 5 mm
Número de radios: 4
Área de los radios: 6 mm x 35 mm
Coeficiente de seguridad de la garganta: 3,64
Coeficiente de seguridad de los radios: 3,54

EQUIPO DE ELEVACION - TAMBOR:

Coeficiente h1 del tambor: 28
Coeficiente h2 del tambor: 1
Diámetro del tambor: 500 mm
Longitud del tambor: 1500 mm
Espesor del tambor: 60 mm
Número de espiras: 111
Separación entre ranuras: 12 mm
Radio de las ranuras: 5,5 mm
Separación entre el eje del cable y la superficie del tambor: 1 mm
Tensión cortante soportada: 0,016 kg/mm²
Tensión de compresión soportada: 1,248 kg/mm²
Tensión de flexión soportada: 0,097 kg/mm²
Tensión compuesta soportada: 1,252 kg/mm²
Longitud de cable a enrollar: 174400 mm
Coeficiente de seguridad mínimo del tambor: 12,78

EQUIPO DE ELEVACION - MOTOR:

Velocidad máxima de elevación: 30 m/min
Número de motor: 1LS2 - 155
Potencia del motor: 25 CV
Velocidad de trabajo del motor: 1450 rpm
Par nominal del motor: 124 Nm
Par máximo del motor: 471,2 Nm

EQUIPO DE ELEVACION - FRENO:

Número de freno: 315 - 806
Par mínimo del freno: 650 Nm
Par máximo del freno: 1300 Nm

EQUIPO DE ELEVACION - REDUCTOR:

Relación de transmisión del reductor: 25/1
Velocidad de giro de salida: 58 rpm

EQUIPO DE ELEVACION - ACOPLAMIENTO:

Número de acoplamiento: 50

Par soportable por el acoplamiento: 1700 Nm

EQUIPO DE TRASLACION - ACCIONAMIENTOS:

Velocidad máxima de traslación: 40 m/min

Número de motor: 1LS1 - 133

Potencia del motor: 5,5 CV

Velocidad de trabajo del motor: 1410 rpm

Par nominal del motor: 27 Nm

Par máximo del motor: 75,6 Nm

Número de freno: 200 - 255

Par mínimo del freno: 90 Nm

Par máximo del freno: 180 Nm

Número de acoplamiento: 10

Par soportable por el acoplamiento: 200 Nm

ESTRUCTURA - MODULOS USADOS:

Número de módulos del tipo 4: 1

Número de módulos del tipo 1(contrapluma): 0

Número de módulos del tipo 0: 1

Número de módulos del tipo 1(pluma): 2

Número de módulos del tipo 2: 1

Número de módulos del tipo 3: 2

Número de módulos del tipo 5(punta de la pluma): 0

Número de módulos del tipo 6(punta de la pluma): 1

Longitud total de todos los módulos usados en la pluma: 50

ESTRUCTURA - RESULTADOS DEL CALCULO MATRICIAL:

Coeficiente dinámico de elevación: 1,15

Coeficiente de mayoración de cargas: 1,2

Perfil circular hueco usado en la pluma: o 225. 8

Perfil circular macizo usado en la pluma: o 50

Perfil cuadrado hueco usado en la pluma: # 200. 7

Perfil circular hueco usado en la torre: o 275. 9

Perfil cuadrado hueco usado en la torre: # 80. 6

Desplazamiento máximo de la punta de la pluma en el eje X: 14 mm

Desplazamiento máximo de la punta de la pluma en el eje Y: 1192 mm

Desplazamiento máximo de la punta de la pluma en el eje Z: 273 mm

Peso del lastre necesario: 52000 kg

Peso total de la pluma: 17700 kg

Peso total de la contrapluma: 3000 kg

Peso total de la torre: 10000 kg

EQUIPO DE ORIENTACION - CORONA:

Carga axial que debe soportar: 74700 kg

Momento que debe soportar: 2500000 kgcm

Diámetro exterior: 1000 mm

Número de dientes: 125 dientes

Módulo: 8

EQUIPO DE ORIENTACION - ACCIONAMIENTOS:

Velocidad máxima de rotación: 1 m/min

Número de motor: 1LS1 - 166

Potencia del motor: 15 CV

Velocidad de trabajo del motor: 1440 rpm

Par nominal del motor: 74 Nm

Par máximo del motor: 251,6 Nm

Número de freno: 315 - 506

Par mínimo del freno: 380 Nm

Par máximo del freno: 750 Nm

Número de acoplamiento: 35

Par soportable por el acoplamiento: 600 Nm

PLIEGO DE CONDICIONES

1. CONDICIONES GENERALES

1.1 INTRODUCCION

La realización del presente proyecto titulado “Calculo de la estructura de una gama de grúas torre sin pináculo con una capacidad de carga de 3 toneladas, alcance de 70 metros y altura de la pluma de hasta 3.20 metros mediante un programa de cálculo matricial en 3D y elaboración de otro para la elección de su mecanismo principal”, se enmarca bajo la designación de proyecto fin de carrera y tiene como propósito culminar con éxito los estudios de Ingeniería Industrial especialidad en Mecánica.

El autor del presente proyecto ha cursado estos estudios en la Universidad de La Rioja, cumpliendo en su elaboración las directrices especificadas por dicho centro en la normativa del Proyecto Fin de Carrera.

1.2 CONDICIONES DE DESARROLLO

El proyecto desarrollado presenta una parte importante de trabajo en aspectos concretos de la realización e implementación de aplicaciones informáticas para el cálculo de la estructura y mecanismos de un tipo concreto de grúas torre. Así como la comunicación para el intercambio de información entre diferentes aplicaciones informáticas, como son Matlab y Visual Basic.

Actualmente no existe una normativa específica para la elaboración de programas por ordenador, así que resulta imposible referirse a condiciones legales o administrativas. Sin embargo, todo software debe ofrecer al usuario las condiciones mínimas que se expondrán a continuación:

- La instalación del software no debe alterar el normal funcionamiento del sistema operativo ni del resto de los programas instalados. Durante la programación se ha de prestar especial atención a no modificar, ni durante la instalación ni durante la ejecución, ningún aspecto de la configuración del sistema.
- Siempre se debe buscar la máxima compatibilidad posible: El software ha de poder ser utilizado por el mayor número de usuarios posibles. Los requerimientos mínimos del sistema para el software desarrollado se detallarán en el apartado 3 del presente pliego de condiciones.
- En el momento en el que el usuario abandone la aplicación, el programa debe liberar automáticamente todos los recursos de memoria utilizada durante su ejecución.

En el desarrollo del software se ha de tener en cuenta que las versiones utilizadas de los distintos programas han sido:

- Matlab 6.5.
- Visual Basic 6.0.
- Install Maker Pro 1.3h (con un parche para la traducción al español)

Es conveniente la utilización por lo menos de estas versiones o superiores, para poder estar seguro de que todas las funciones y aplicaciones utilizadas por los distintos programas puedan ser localizadas.

1.3 PROPIEDAD INTELECTUAL

La propiedad intelectual del autor y el director del proyecto fin de carrera se rige por la normativa sobre propiedad intelectual de trabajos docentes realizados por alumnos. Esta normativa ha sido aprobada por la Junta de Gobierno así como por el Real Decreto legislativo 1/1996 del 12 de abril.

2. CONDICIONES DE MATERIALES Y EQUIPOS

Para cumplir los objetivos inicialmente planteados en el presente proyecto se han utilizado diversos recursos hardware y software. En este apartado se detallan las especificaciones de los materiales y equipos incluidos en cada uno de estos apartados.

Los recursos descritos a continuación son los utilizados para la solución final y se consideran los más apropiados para el cumplimiento con éxito del presente proyecto en el momento de su realización.

Esta afirmación no implica que sean las más adecuadas para la realización de las tareas. Son los que se han considerado mejores entre todos los disponibles durante la realización del presente proyecto, y en algunos casos, la ausencia física de los mismos se ha subsanado del mejor modo posible.

2.1 RECURSOS HARDWARE

La presente aplicación, dado su grado de complejidad y volumen de cálculo, precisa de unos requerimientos hardware para desarrollar sus funciones de forma rápida y adecuada.

Dado que el programa no requiere más que potencia de cálculo, para la realización de las operaciones, la memoria y capacidad del ordenador únicamente ahorrará tiempo en la presentación de los resultados.

Siendo necesario, como mínimo para que el programa funcione correctamente, el siguiente equipo:

- Pentium II a 400MHz.
- 64 Mb de memoria RAM.
- 50 Mb de espacio en el disco duro.
- Lector CD-ROM 8x.
- Monitor con capacidad para una resolución mínima de 800x600.

Para un funcionamiento más dinámico del programa sería aconsejable el siguiente ordenador:

- Pentium IV o AMD a 1 GHz.
- 256 Mb de memoria RAM.
- 50 Mb de espacio en el disco duro.
- Lector CD-ROM 8x.
- Monitor con capacidad para una resolución de 1024x768.

2.2 RECURSOS SOFTWARE

Debido a las características intrínsecas de programas como Visual Basic, se hace imprescindible la utilización como sistema operativo para el ordenador Windows 95 o superior.

Además, debe tenerse instalado en el ordenador Matlab 6.5 o superior.

3. CONDICIONES DE MONTAJE Y EJECUCION

3.1 REQUERIMIENTOS MINIMOS

Los requerimientos mínimos para la ejecución de la aplicación son los siguientes:

- Pentium II a 400MHz.
- 64 Mb de memoria RAM.
- 50 Mb de espacio en el disco duro.
- Lector CD-ROM 8x.
- Monitor con capacidad para una resolución mínima de 800x600.
- Windows 98.
- Matlab 6.5

El sistema mínimo detallado mediante la enumeración anterior, representa la configuración mínima necesaria para que el sistema sea capaz de iniciar el programa.

En ningún momento se garantiza que esta configuración pueda ejecutar de forma satisfactoria para el usuario la presente aplicación.

3.2 INSTALACION

La instalación adecuada de la presente aplicación en el sistema se detalla en el Manual de Usuario. Dicho manual se recoge en el Anexo de la memoria del presente documento.

Para la instalación adecuada de la presente aplicación se remite al usuario a la documentación citada.

4. CONDICIONES ECONOMICAS

En el presente proyecto se prescinde de establecer condiciones económicas contractuales al no estar sujeto a un contrato de ejecución.

Puesto que la aplicación desarrollada no tiene un fin comercial, no se ha elaborado el presupuesto pensando en el precio final de una licencia. El precio se ha estimado conforme a las horas de trabajo empleadas y a todos los materiales y equipos utilizados.

El precio final hace referencia, por tanto, al coste global que supondría desarrollar este proyecto en su totalidad.

PRESUPUESTO

1. MEDICIONES

1.1 EQUIPOS - CANTIDAD

PC COMPATIBLE	1 Unidad
<ul style="list-style-type: none"> · MICROPROCESADOR AMD K8 ATHLON 64 3400+ SK754 · PLACA K8 AOPEN AK89MAX NFORCE 3 · DISCO 300 GB SATA SEAGATE 7200 · 2x512 KINGOSTON HYPERX DDR400 · SVGA 256MB ATI RADEON 9600 XT – SOUND BLASTER LIVE 24-BIT · MONITOR 19" LG 900P FLATRON USB · REGRABADORA 52x24x52x + DVD16X LG 	

1.2 PROGRAMACION

1.2.1 Programación en Matlab

Requisitos	150 h.
Diseño	250 h.
Codificación	600 h.
Depuración	500 h.
Recepción con usuario	10 h.
TOTAL	1510 h.
Software y licencia Matlab 6.5	1 Unidad

1.2.2 Programación en Visual Basic

Requisitos	100 h.
Diseño	150 h.
Codificación	300 h.
Depuración	250 h.
Recepción con usuario	10 h.
TOTAL	810 h.
Software y licencia Visual Basic 6.0	1 Unidad

2. Cuadros de precios

2.1 Equipos - Precios

PC COMPATIBLE	1000 euros.
TOTAL	1000 euros.

2.2 Programación

2.2.1 Programación en Matlab

Requisitos	1200 euros.
Diseño	2000 euros.
Codificación	4800 euros.
Depuración	4000 euros.
Recepción con usuario	80 euros.
Software Matlab 6.5	2000 euros.
TOTAL	14080 euros.

2.2.2 Programación en Visual Basic

Requisitos	800 euros.
Diseño	1200 euros.
Codificación	2400 euros.
Depuración	2000 euros.
Recepción con usuario	80 euros.
Software Visual Basic 6.0	750 euros.
TOTAL	7230 euros.

3. Presupuestos

3.1 *Equipos*

PC COMPATIBLE	1000 euros.
---------------	-------------

3.2 *Programación*

PROGRAMACIÓN EN MATLAB	14080 euros.
PROGRAMACIÓN EN VISUAL BASIC	7230 euros.

3.3 **PRESUPUESTO TOTAL**

PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN	22310,0 euros.
--------------------------------	----------------

+ 6 % BENEFICIO INDUSTRIAL	1338,6 euros.
----------------------------	---------------

PRESUPUESTO PARCIAL	23648,6 euros.
---------------------	----------------

+ 18 % I. V. A.	4256,8 euros.
-----------------	---------------

PRESUPUESTO TOTAL	27905,4 euros.
--------------------------	-----------------------

El Presupuesto Total asciende a veintisiete mil novecientos cinco euros y cuarenta céntimos.

NORMATIVA

- UNE 50512:** Ganchos de elevación simples con espiga. Capacidad hasta 25 T.
- UNE 58104:** Aparatos de elevación. Terminología.
- UNE 58112 – 1:** Grúas y aparatos de elevación. Clasificación. Generalidades.
- UNE 58112 – 3:** Grúas y aparatos de elevación. Clasificación. Grúas torre.
- UNE 58113:** Grúas. Acción del viento.
- UNE 58120 – 1:** Grúas. Selección de cables. Generalidades.
- UNE 58121:** Aparatos pesados de elevación. Exigencias de estabilidad.
- UNE 58132 – 2:** Aparatos de elevación. Reglas de cálculo. Solicitaciones y casos.
- UNE 58132 – 3:** Cálculo de las estructuras.
- UNE 58132 – 4:** Aparatos de elevación. Cálculo de elementos mecánicos.
- UNE 58132 – 6:** Aparatos de elevación. Reglas de seguridad.
- UNE 58509:** Ganchos de elevación
- UNE 58915 – 2:** Clasificación de los mecanismos
- UNE 58915 – 5:** Elección de los motores de translación
- UNE 58915 – 6:** Elección de los motores de elevación
- DIN 6890:** Sentidos de torsión en cables.
- DIN 15020:** Grupo del mecanismo.
- DIN 15061:** Normalización y definición de los perfiles de garganta.
- DIN 15144:** Piezas de aseguramiento para ganchos.
- DIN 15401:** Dimensiones de ganchos simples.
- DIN 15411:** Suspensiones para ganchos.
- DIN 15412:** Dimensiones de traviesas.
- DIN 15413:** Dimensiones de tuercas para ganchos.
- EA – 95:** Estructuras de acero en edificación.

BIBLIOGRAFIA

GRUAS

Emilio Larrodé & Antonio Miravete

INGENIERIA DE PROYECTOS

Fernando Santos

APARATOS DE ELEVACION Y TRANSPORTE

Hellmut Ernest

DISEÑO DE MAQUINAS

Eduard Shigley

RESISTENCIA DE MATERIALES

Berrocal

CALCULO MATRICIAL DE ESTRUCTURAS

Manuel Vazquez

APRENDA MATLAB 6.1 COMO SI ESTUVIESE EN PRIMERO

Javier García de Jalón, José Ignacio Rodríguez & Alfonso Brazález

APRENDA VISUAL BASIC 6.0 COMO SI ESTUVIESE EN PRIMERO

Javier García de Jalón, José Ignacio Rodríguez & Alfonso Brazález

NORMATIVA

CATALOGOS DIVERSOS

En papel y soporte magnético