ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA
TÉCNICA INDUSTRIAL DE ZARAGOZA

DISEÑO DE ESTRUCTURA DE ANCLAJE PARA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

AUTOR: Alberto Marín Atienza.
DIRECTORA: Paula Canalís Martínez.
ESPECIALIDAD: Mecánica.
CONVOCATORIA: Septiembre de 2010.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN **1**

2. OBJETIVOS **3**

3. DEFINICIÓN DE OPCIONES **5**
- 3.1. Especificaciones del problema 5
- 3.2. Predimensionado analítico 5
- 3.3. Estudio con SolidWorks 18
- 3.4. Comparativa de las opciones 33

4. ANÁLISIS DE LA OPCIÓN SELECCIONADA **35**
- 4.1. Cálculo analítico de los pernos de anclaje 35
- 4.2. Análisis estático con carga distribuida 38
- 4.3. Análisis estático con carga en extremo 41
- 4.4. Análisis de pandeo con carga distribuida 44
- 4.5. Análisis de pandeo con carga en extremo 44
- 4.6. Análisis de frecuencia 45
- 4.7. Optimización de la estructura 48

5. SOLUCIÓN FINAL **52**
- 5.1. Planos 52
- 5.2. Estimación de costes 55

6. CONCLUSIONES **57**

7. ANEXOS **58**
- · Anexo 1. Características de los aerogeneradores 58
- · Anexo 2. Planos y documentos gráficos de la ubicación 62
- · Anexo 3. Pernos de anclaje 64
- · Anexo 4. Guías de análisis de SolidWorks 66

1. INTRODUCCIÓN.

La fundación CIRCE, Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos, colabora con la Universidad de Zaragoza permitiendo unificar las actividades de investigación y de formación de postgrado llevadas a cabo por los investigadores de CIRCE y los profesores de la Universidad de Zaragoza que cooperan de forma estable con ésta.

El Instituto se subdivide en cuatro áreas científicas: Eficiencia Energética, Eléctrica, Térmica y Recursos Naturales.

Con el lema *"saber, saber hacer, hacer y hacer saber"* sus objetivos, entre otros, son: realizar y publicar trabajos de investigación y desarrollo en el campo de las tecnologías y las técnicas que puedan resultar aplicables en materia energética y de su impacto medioambiental; organizar, gestionar e impartir programas de postgrado, master y doctorado en los temas objeto de su actuación; realizar tareas de auditoría, diagnóstico y asesoramiento tecnológico que faciliten la introducción de mejoras e innovaciones en los procesos, productos o servicios de las empresas energéticas, que les ayuden a ser competitivas; llevar a cabo planes de formación permanente y de especialización o actualización profesional en los diversos campos de la actividad energética y servir de centro de información tecnológica y de difusión de los resultados de la investigación.

El edificio CIRCE, ubicado en el Campus Río Ebro de la Universidad de Zaragoza, cuenta con una arquitectura sostenible construido con materiales naturales como ladrillos de termoarcilla, piedras, madera o corcho natural evitando excesivos elementos de cemento, hormigón así como materiales tóxicos. Pretende ser un modelo de construcción bioclimática, un modelo de eficiencia, debido a que el consumo energético del edificio es prácticamente nulo.

Dispone de cubiertas vegetales que actúan de aislamiento térmico y acústico. Además, el invernadero adosado a la fachada principal en la planta baja, funciona a modo de calefacción en invierno incluso durante las horas sin sol.

Los laboratorios constituyen una nave rectangular a 36 grados sobre el eje este-oeste, que actúa como barrera contra los vientos del cierzo. De este modo se evitan los considerables descensos de temperatura no deseados en los meses fríos. Una chimenea solar, aprovecha estos vientos dominantes para refrigerar el edificio de forma natural durante los meses de verano.

La División de Recursos Naturales de CIRCE centra sus actividades de I+D+i en el marco de la eficiencia de la conversión en sistemas energéticos, incidiendo también en la evaluación termodinámica (exergética), técnico-económica y ambiental de los recursos naturales que serán convertidos en energía útil. Entre dichos recursos naturales no se incluyen la energía solar y eólica, energías renovables que son tratadas de forma específica en la División Eléctrica de CIRCE, ni el agua como recurso hidroeléctrico o vector energético para la integración de energías renovables.

Las actividades de la División de Recursos Naturales se organizan en dos áreas:

***BERA**:* Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento, especializada en la evaluación de recursos biomásicos y en su aprovechamiento a pequeña escala, para calderas domésticas.

***TAER**:* Termoeconomía y Análisis Exergético de Recursos naturales y agua, centrada en la Termoeconomía como base teórica para la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones energéticas existentes, así como para la evaluación y análisis de la calidad y la degradación energética de los recursos naturales.

El siguiente proyecto está destinado a la construcción de una estructura de anclaje para un aerogenerador. La instalación será utilizada por el área *BERA* de la división de Recursos Naturales de CIRCE para uno de los proyectos que lleva a cabo.

2. OBJETIVOS.

El proyecto radica en la instalación de dos aeroenfriadores de la marca Alfa Laval, destinados al laboratorio del área de Recursos Naturales, cuyas dimensiones y características se adjuntan en el “Anexo 1”.

Puesto que se trata de un edificio ecológico de cero emisiones, donde la energía que se consume procede de fuentes renovables, surgen varias limitaciones en cuanto al emplazamiento de los aparatos. Además, el impacto visual debe ser mínimo así como el coste total de la estructura.

La particularidad del edificio descarta la posibilidad de una posible ubicación en las cubiertas ya que están dotadas de placas solares para producir electricidad y de cubiertas vegetales como se ha mencionado anteriormente. Asimismo, el impacto visual sería muy elevado.

Se partirá de la base de que todas las sujeciones deben de efectuarse en el pavimento, anulando la opción de practicar anclajes en las fachadas, típicas en estos intercambiadores de calor.

El emplazamiento de la estructura está previsto en la parte trasera del edificio junto al laboratorio de Recursos Naturales de CIRCE. Se dispone de un espacio de 1,45 metros de anchura con una altura máxima de 3,17 metros. El tejado es de un solo faldón con una inclinación de 19º. Se adjuntan planos y documentos gráficos en el “Anexo 2”.

Debido a las limitaciones tanto de emplazamiento como de espacio, el aerogenerador de mayores dimensiones irá colocado a 20 cm del suelo a 90º de su posición natural y el segundo de ellos, estará colocado encima a una separación de 1,7 metros desde el suelo. Según indicaciones del fabricante, los aparatos para dicha posición, deben de tener una separación de 0,5 metros tanto arriba como abajo, pero el espacio disponible no cumple con los requisitos.

Se analizarán tres posibles soluciones, calculadas de manera analítica y a través del software informático SolidWorks. La primera de ellas, está formada por cuatro perfiles que conforman una superficie rectangular, en donde irá apoyado el aerogenerador. Dos pilares situados a los extremos más alejados servirán de apoyo a la misma. La segunda opción cuenta con tres pilares que sustentan tres vigas en voladizo en donde estará apoyado el aerogenerador. La tercera solución la componen tres pórticos rectos eliminando así las vigas en voladizo de la anterior opción.

Posteriormente, con el fin de seleccionar una de las opciones, se elaborará una tabla comparativa con todas ellas, sirviendo de ayuda para decantarse por la estructura definitiva.

Para el análisis dentro del programa SolidWorks se emplearán estudios estáticos, de pandeo, de frecuencia y de optimización. A modo de tutorial, se realizará una guía esquemática de cada uno de los módulos de cálculo utilizados que irá incluida en el “Anexo 4” sirviendo de apoyo docente para futuras consultas.

3. DEFINICIÓN DE OPCIONES.

3.1. ESPECIFICACIONES DEL PROBLEMA.

Tal y como se ha establecido anteriormente, se dispone de dos aerogeneradores con características diferentes.

El de mayor volumen, con 165 kW de potencia, cuyas dimensiones son 4,335 metros de longitud, por 1,034 metros de altura y 0,75 metros de fondo con 351 Kg. de peso estará colocado a 20 cm del suelo.

El de menor tamaño, con 175 kW de potencia, con una longitud total de 3,805 metros, por 0,828 metros de altura, por 0,428 metros de fondo y un peso de 234 Kg. se colocará a 1,7 metros del suelo respetando al máximo posible las indicaciones del fabricante.

A continuación se exponen las diferentes alternativas para la colocación del aerogenerador de 175 kW de potencia.

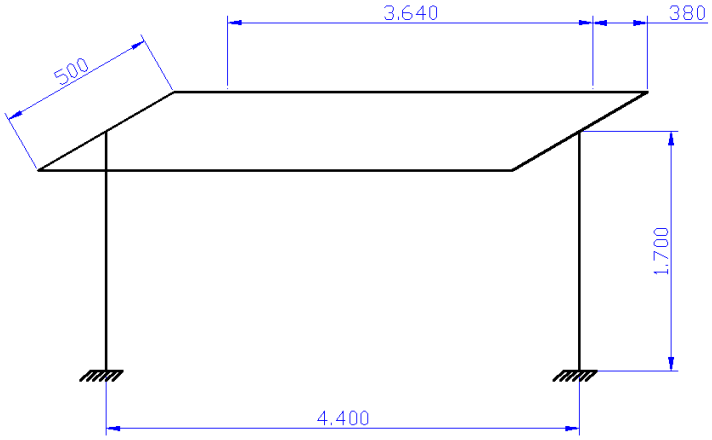
El material empleado será tubo estructural conformado en frío de sección cuadrada o rectangular con las siguientes propiedades:

· Módulo elástico 205.000 MPa.
· Límite elástico 350 MPa.
· Densidad 7.870 kg/m^3.
· El coeficiente de seguridad mínimo será de 3,5.

3.2. PREDIMENSIONADO ANALÍTICO.

- ***OPCIÓN 1.***

Se trata de una mesa compuesta por dos pilares de 1,7 metros, dos travesaños de 4,4 metros y dos vigas de 0,5 metros. La carga del aerogenerador irá repartida a los largo de los dos travesaños con una longitud entre apoyos de 3,64 metros.



· CÁLCULO DE LOS TRAVESAÑOS:

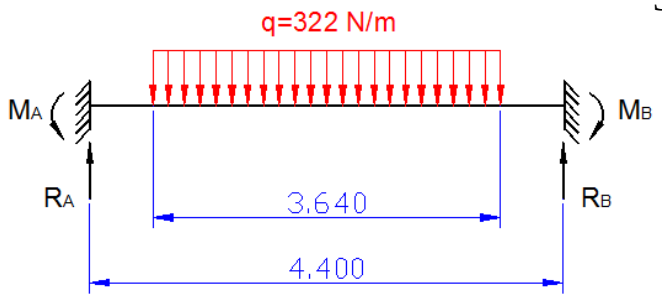
Se analizan en primer lugar los travesaños considerando que se encuentran empotrados en sus extremos utilizando para ello un prontuario de vigas con distintas hipótesis de cargas y apoyos.

La distribución inicial de cargas para cada travesaño es la que se muestra a continuación.

Se ha utilizado una conversión de unidades de 1Kg=10 N con el fin de simplificar el análisis.

El aerogenerador tendrá un peso de 2340 N transmitiendo 1170 N a cada travesaño.

Por lo tanto, la carga repartida será: $\frac{1170N}{3{,}64m} \approx 322\, N/m$

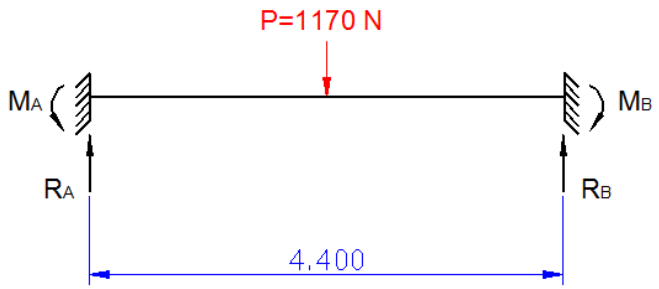


$$M_A = -M_B = \frac{q \cdot c}{24 \cdot L} \cdot \left[3 \cdot L^2 - 4 \cdot \left(\frac{c}{2} \right)^2 \right]$$

$$"c" = longitud\ de\ la\ masa\ distribuida$$

$$R_A = R_B = q \cdot c$$

Dado que el desplazamiento de la flecha máxima será utilizado para el cálculo de la sección del perfil y que el modelo anterior no especifica dicho valor, se considera que toda la carga actúa como una carga puntual en el centro, de valor igual a 1170 N. Utilizando ésta distribución de cargas se tendrá en cuenta que el perfil resultante estará sobredimensionado ya que los momentos en los empotramientos serán mayores que en el caso anterior.



$$M_A = -M_B = \frac{P \cdot L}{8}$$

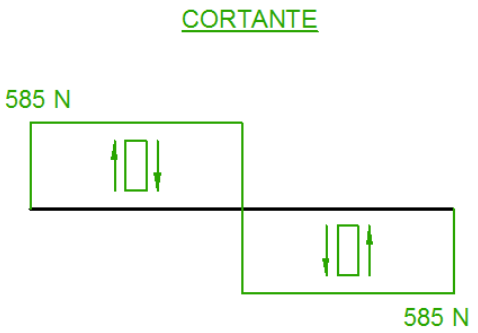
$$R_A = R_B = \frac{P}{2}$$

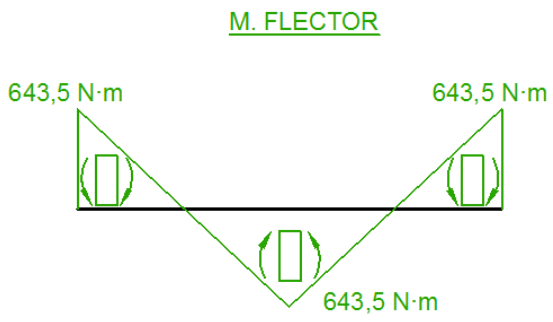
$$f_{max} = -\frac{P \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot I}$$

$$M_A = -M_B = M_{\max} = \frac{P \cdot L}{8} = \frac{1170\,N \cdot 4{,}4m}{8} = 643{,}5\,N \cdot m$$

$$R_A = R_B = \frac{P}{2} = \frac{1170}{2} = 585\,N$$

La distribución de tensiones queda de la siguiente manera:





Para el cálculo de la inercia de la sección transversal se considera una flecha máxima en el centro de la viga igual a 5 milímetros, por lo tanto:

$$f_{\max} = -\frac{P \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot I} = 5mm \qquad I = \frac{P \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot 5} = \frac{1170\,N \cdot 4.400^3\,mm}{192 \cdot 205.000\,MPa \cdot 5mm} = \underline{506.429{,}27\,mm^4}$$

Se calcula a continuación el mínimo módulo elástico de flexión teniendo en cuenta el máximo momento flector.

$$\left.\begin{array}{l} \sigma_{\max,adm} = \dfrac{\sigma_F}{Cs} = \dfrac{350MPa}{3{,}5} = 100MPa \\[2ex] \sigma_x = \dfrac{M_F}{W_x}; \end{array}\right\} \text{Igualando ambas tensiones:}$$

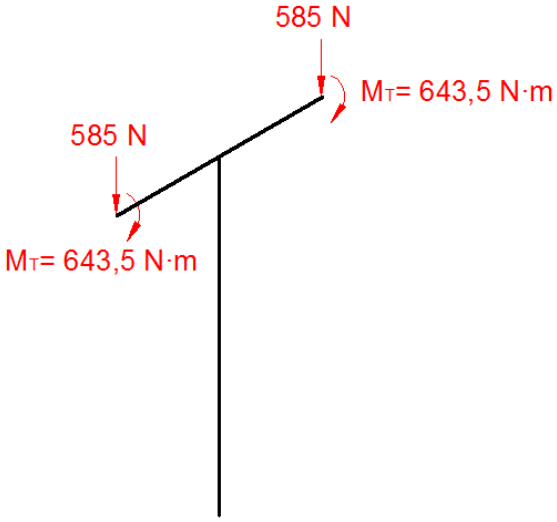
$$W_x = \frac{M_F}{\sigma_{\max,adm}} = \frac{643.500\,N \cdot mm}{100MPa} = \underline{6.435mm^3}$$

Se escoge de un prontuario el perfil comercial que cumple con las dos hipótesis calculadas anteriormente, es decir, la inercia y el módulo elástico en el eje x-x, atendiendo a una sección rectangular con los siguientes parámetros:

$$70x50x4 \begin{cases} A = 8{,}55cm^2 \\ I_x = 54{,}7cm^4; I_y = 32{,}2cm^4 \\ W_x = 15{,}6cm^3; W_y = 12{,}9cm^3 \end{cases}$$

· *CÁLCULO DE LAS VIGAS:*

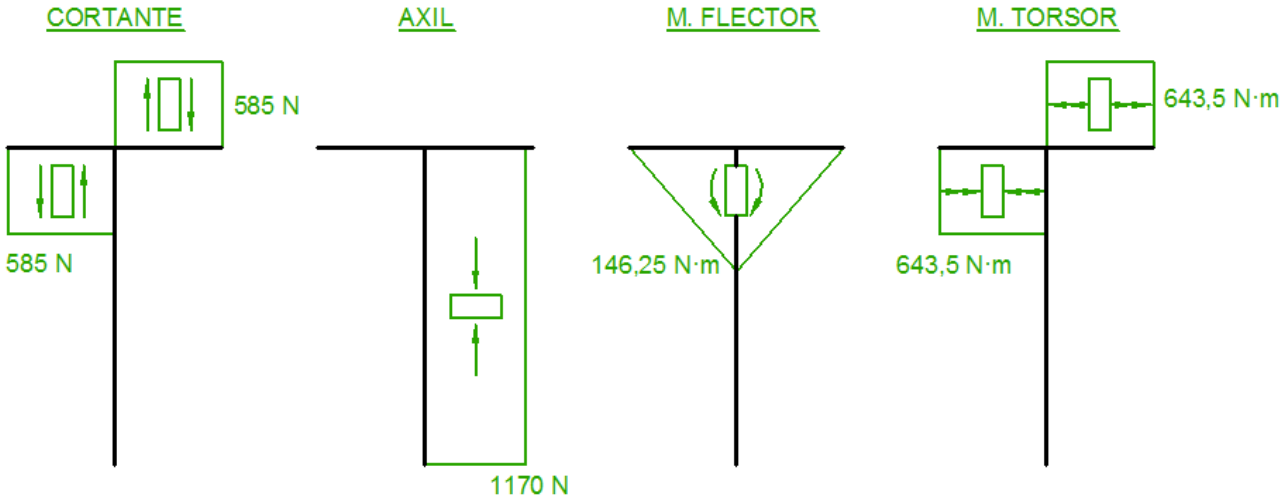
Para el cálculo de las vigas, se transmite tanto los cortantes como los momentos flectores de los travesaños de la siguiente manera:



Se observa que los esfuerzos cortantes se transmiten como una carga puntual de sentido negativo aplicada en los extremos.

Los momentos flectores debidos a los empotramientos de los travesaños crearán unos momentos torsores a la viga.

La distribución de tensiones en este caso es la siguiente:



La viga está solicitada a una combinación de esfuerzos de flexión más torsión. Para evitar el continuo cambio de secciones entre diferentes elementos se parte del perfil seleccionado para los travesaños, sección rectangular 70x50x4, comprobándose que el coeficiente de seguridad obtenido sea mayor que 3,5.

$$70x50x4 \begin{cases} I_x = 54{,}7cm^4; I_y = 32{,}2cm^4 \\ W_x = 15{,}6cm^3; W_y = 12{,}9cm^3 \\ W_o = 21{,}2cm^3 \end{cases}$$

Se emplea la teoría de cortante máximo para el cálculo del coeficiente de seguridad, utilizando la tensión cortante máxima resultante de la combinación de los esfuerzos, es decir:

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \qquad \sigma_x = \frac{M_F}{W_F}$$

$$Cs = \frac{\sigma_F}{2 \cdot \tau_{\max}} \qquad \tau_{xy} = \frac{M_T}{W_o}$$

Siendo el momento flector máximo: $M_F = 585N \cdot 0{,}25m = \underline{146{,}25N \cdot m}$

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{M_F}{W_F} = \frac{146.250N \cdot mm}{15.600mm^3} = 9{,}375MPa \\ \tau_{xy} &= \frac{M_T}{W_o} = \frac{643.500N \cdot mm}{21.200mm^3} = 30{,}35MPa \end{aligned}\right\} \quad \tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{9{,}375}{2}\right)^2 + 30{,}35^2}$$

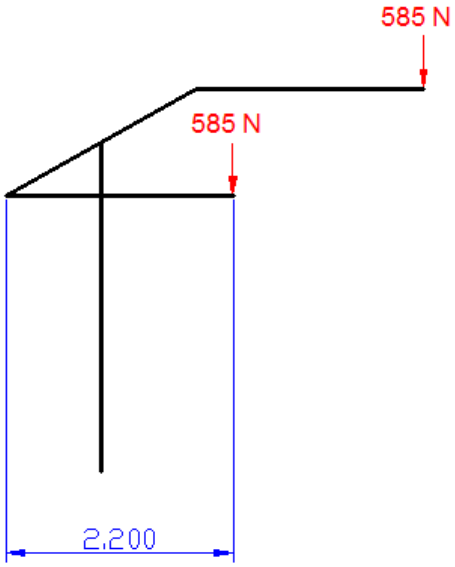
$$\tau_{\max} = 30{,}71MPa$$

$$Cs = \frac{350}{2 \cdot 30{,}71} = \underline{5{,}69}$$

El valor obtenido en el coeficiente de seguridad es mayor de 3,5 por lo tanto el perfil seleccionado es válido.

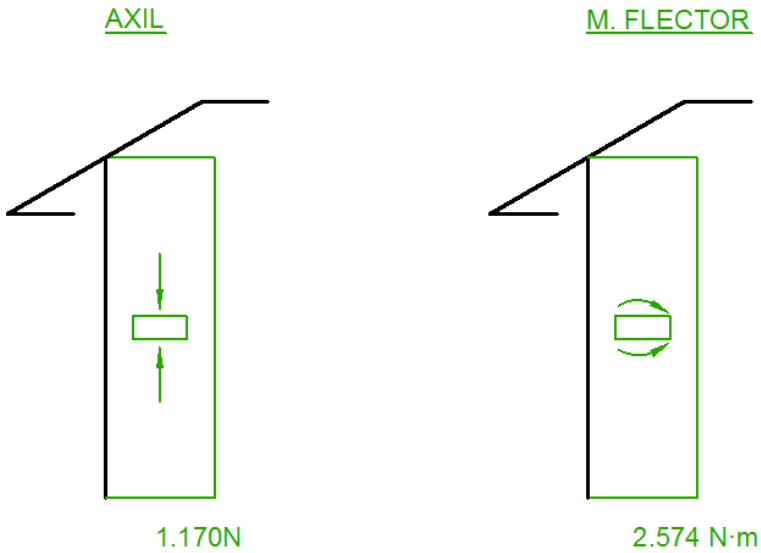
· *CÁLCULO DE LOS PILARES:*

El cálculo del pilar no se realiza transmitiendo esfuerzos de la viga sino que se analiza la mitad de la estructura. Al ser simétrica las cargas puntuales iniciales irán divididas entre dos, así como la longitud de los travesaños.



El momento flector máximo será: $M_F = 1.170N \cdot 2{,}2m = \underline{2.574N \cdot m}$

Los diagramas de distribución de tensiones del pilar serán:



Para el cálculo de la sección del perfil se desprecia el axil respecto de a los momentos flectores puesto que éstos últimos son mas significativos. Posteriormente se comprueba que efectivamente el perfil soporta ambas cargas.

Se calcula el módulo resistente a flexión teniendo en cuenta que la máxima tensión admisible con un coeficiente de seguridad igual a 3,5 es de 100 MPa.

$$\sigma_x = \frac{M_F}{W_F}; \quad W_F = \frac{M_F}{\sigma_{\max,adm.}} = \frac{2.574.000N \cdot mm}{100MPa} = 25.740mm^3 = \underline{25{,}74cm^3}$$

Para este caso el perfil elegido es de sección cuadrada de 70x70x6:

$$70x70x6 \begin{cases} A = 14{,}4cm^2 \\ I = 95{,}2cm^4 \\ W_F = 27{,}2cm^3 \\ i = 2{,}57cm \end{cases}$$

Comprobación:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_F}{W_F} + \frac{N}{A}; \quad \sigma_{\max} = \frac{2.574.000 N \cdot mm}{27.200 mm^3} + \frac{1.170 N}{1.440 mm^2} = 95{,}44 MPa$$

$$Cs = \frac{\sigma_F}{\sigma_{\max}} = \frac{350 MPa}{95{,}44 MPa} = \underline{3{,}66}$$

Dado que el pilar se encuentra sometido a una carga a compresión y debido a su geometría, se procede a comprobar que no existe fallo a pandeo, conocida su sección y la carga de compresión:

Se calcula la longitud equivalente teniendo en cuenta que se encuentra empotrado en el suelo y libre en el extremo. Comparando la esbeltez del pilar con la esbeltez límite se cataloga la columna pudiendo ser corta o larga. En el caso de ser columna larga, la esbeltez del pilar es mayor que la esbeltez límite. Se utilizará el criterio de pandeo de EULER para conocer la fuerza critica a pandeo. Si por el contrario la esbeltez es menor que la límite, se utilizará el criterio de JOHNSON para calcular dicha fuerza crítica de pandeo.

$$L_e = \beta \cdot L; \quad \beta = 2; \quad L_e = 2 \cdot 1.700 = 3.400 mm$$

$$\left.\begin{array}{l} \lambda = \dfrac{L_e}{i} = \dfrac{3.400 mm}{25{,}7 mm} = 132{,}29 \\ \lambda_{\lim} = \sqrt{\dfrac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_F}}; \quad \lambda_{\lim} = \sqrt{\dfrac{2 \cdot \pi^2 \cdot 205.000 MPa}{350 MPa}} = 107 \end{array}\right\} [\lambda > \lambda_{\lim}] \rightarrow EULER$$

Se calcula la fuerza crítica de compresión para determinar el coeficiente de seguridad:

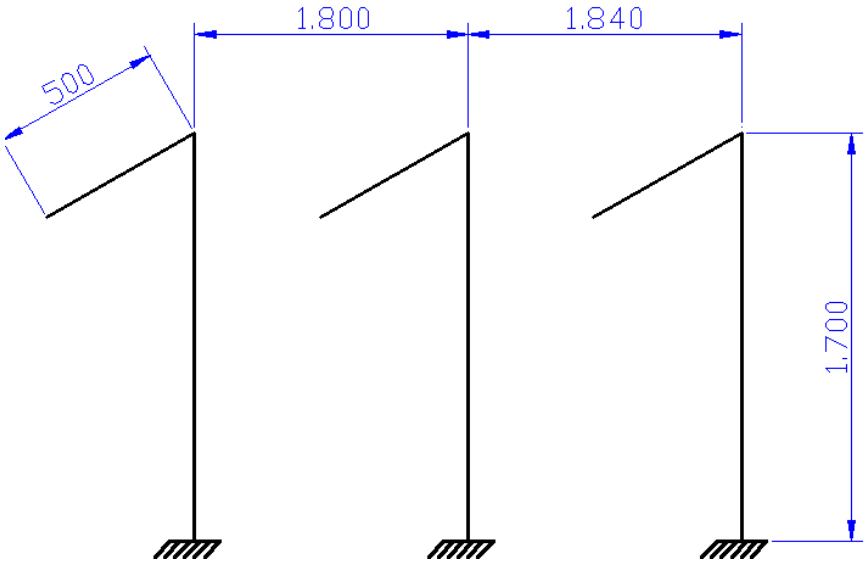
$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_e^2}; \quad F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 205.000 MPa \cdot 95{,}2 \cdot 10^4 mm^4}{3.400^2 mm} = 166.622{,}15 N$$

$$Cs = \frac{F_{cr}}{F_{compresión}}; \quad Cs = \frac{166.622{,}15 N}{1170 N} = \underline{142{,}41}$$

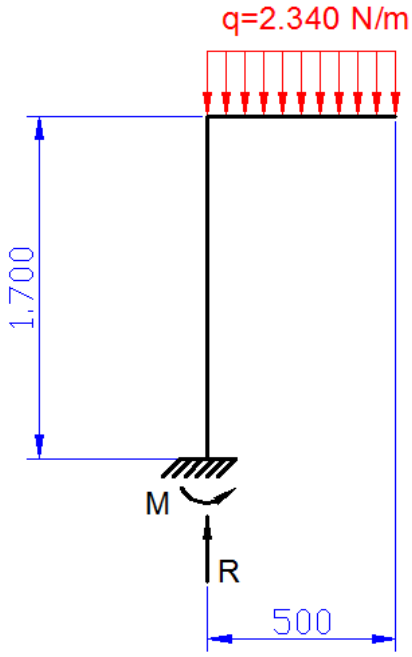
El pilar tiene un coeficiente al pandeo de 142, es decir, se puede aplicar una carga 142 veces mayor antes de sufrir pandeo.

- ***OPCIÓN 2.***

Tres pilares con sus respectivas vigas en voladizo componen ésta segunda estructura. El componente central soportará la mitad del peso del aerogenerador, la otra mitad estará repartida en partes iguales a los elementos de los extremos, así pues, únicamente se calculará el elemento central de la estructura ya que es el más solicitado.

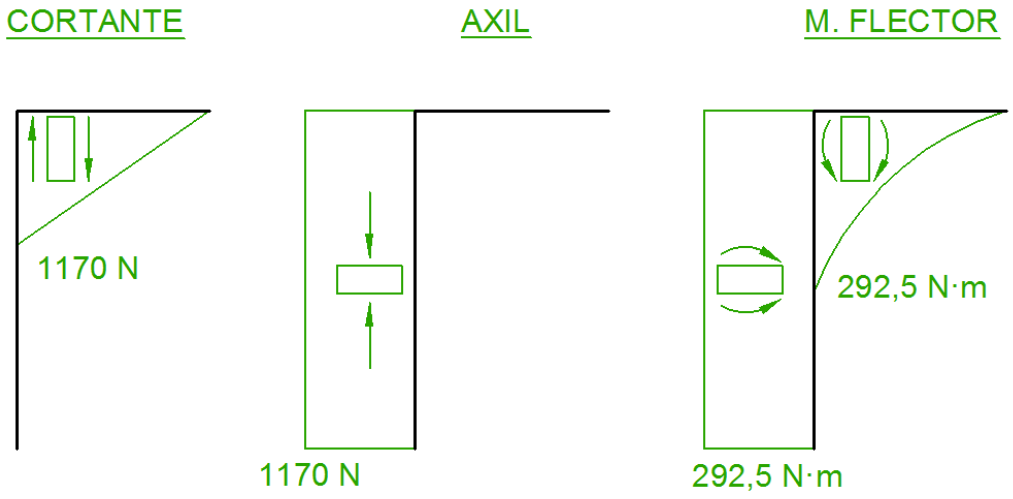


Según se muestra en la siguiente figura, la viga en voladizo deberá soportar una carga distribuida de 2.340 N/m.



$$q = \frac{1.170N}{0{,}5m} = 2.340N/m$$

Se muestran los diagramas de distribución de tensiones:



El momento flector máximo será: $M_F = 2.340N \cdot \frac{0,5^2 m}{2} = \underline{292,5N \cdot m}$

· *CÁLCULO DE LAS VIGAS:*

Se calcula la viga en voladizo considerándola empotrada en su extremo, incluyendo como restricción una flecha máxima en su extremo de 3 milímetros. La tensión máxima admisible, como en la anterior, es de 100 MPa. Se estima en primer lugar el módulo elástico de flexión.

$$\sigma_{\max,adm} = \frac{M_F}{W_F}; \quad W_F = \frac{292.500N \cdot mm}{100MPa} = 2.925mm^3$$

$$\underline{W_F = 2,925cm^3}$$

$$Flecha \quad máxima:$$

$$f_{\max} = \frac{P \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot I}; \quad I_{\min} = \frac{P \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot f_{\max}} = \frac{2,34N/mm \cdot 500^4 mm}{8 \cdot 205.000MPa \cdot 3} = 29.725,6mm^4$$

$$\underline{I_{\min} = 2,97cm^4}$$

A pesar de que son válidos perfiles de menor sección partiendo de los valores obtenidos para inercia y módulo elástico mínimos, se decide emplear un perfil rectangular de 60x40x2 milímetros, con el fin de mejorar el apoyo debido a que los soportes del aerogenerador son perfiles UPN de 40 milímetros.

Las características del perfil seleccionado son:

$$60x40x2 \begin{cases} A = 3{,}74cm^2 \\ I_x = 18{,}4cm^4; I_y = 9{,}83cm^4 \\ W_x = 6{,}14cm^3; W_y = 4{,}92cm^3 \\ i_x = 2{,}22cm; i_y = 1{,}62cm \end{cases}$$

· *CÁLCULO DE LOS PILARES:*

Para el cálculo de la sección del pilar, se parte del perfil elegido para la viga y únicamente se comprueba que la combinación de esfuerzos cumple con el coeficiente de seguridad mínimo. Posteriormente se hace un estudio a pandeo.

$$\sigma_{\max,adm} = \frac{M_F}{W_F} + \frac{N}{A}; \quad \sigma_{\max,adm} = \frac{292.000N \cdot mm}{6.140mm^3} + \frac{1.170N}{374mm^2} = 50{,}76MPa$$

$$Cs = \frac{\sigma_F}{\sigma_{\max,adm.}} = \frac{350MPa}{50{,}76MPa} = \underline{6{,}89}$$

Estudio a pandeo:

$$L_e = \beta \cdot L; \quad \beta = 2; \quad L_e = 2 \cdot 1.700mm = 3.400mm$$

$$\left.\begin{array}{l} \lambda = \dfrac{L_e}{i} = \dfrac{3.400mm}{22{,}2mm} = 153{,}15 \\ \lambda_{\lim} = \sqrt{\dfrac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_F}}; \quad \lambda_{\lim} = \sqrt{\dfrac{2 \cdot \pi^2 \cdot 205.000MPa}{350MPa}} = 107 \end{array}\right\} [\lambda > \lambda_{\lim}] \rightarrow EULER$$

Fuerza crítica y coeficiente de seguridad a pandeo teniendo en cuenta el eje de menor inercia:

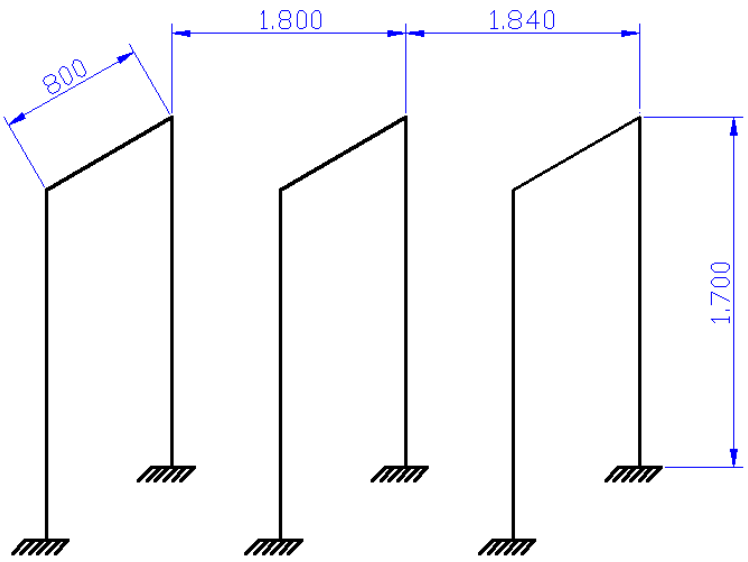
$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_e^2}; \quad F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 205.000MPa \cdot 9{,}83 \cdot 10^4 mm^4}{3.400^2 mm} = 17.204{,}78N$$

$$Cs = \frac{F_{cr}}{F_{compresión}}; \quad Cs = \frac{17.204{,}78N}{1170N} = \underline{14{,}7}$$

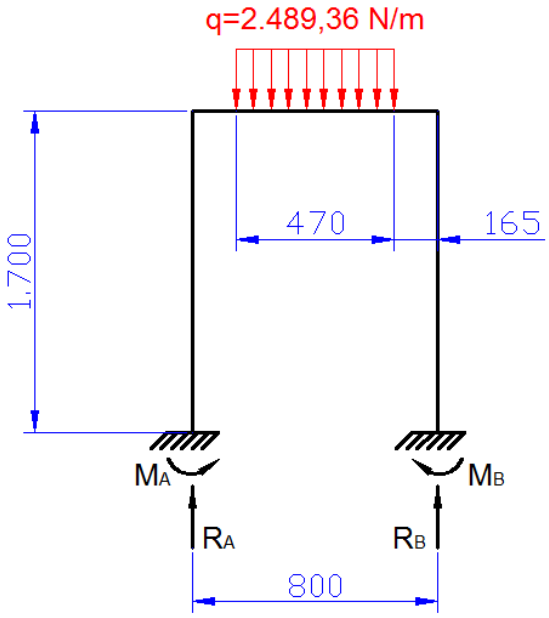
La sección transversal del pilar cumple con los esfuerzos a los que está solicitada.

- ***OPCIÓN 3.***

Para evitar la viga en voladizo de la propuesta anterior, se estudia una estructura compuesta por tres pórticos rectos. La altura del pilar será de 1,7 metros, como en los anteriores casos y la anchura de los pórticos irá definida por el aerogenerador inferior siendo ésta de 0,8 metros dejando así, una pequeña distancia para el montaje o el mantenimiento.



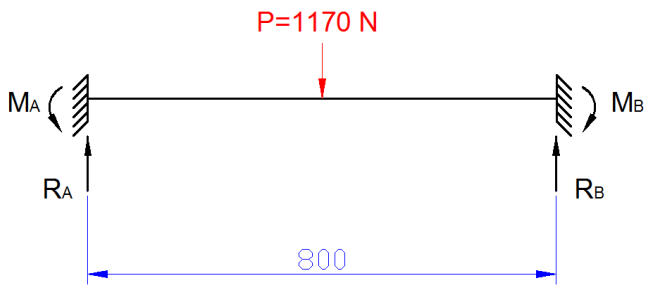
Se analizará el pórtico central siendo éste el más solicitado de los tres. Al igual que en la primera opción, la carga distribuida se sustituirá por una puntual situada en el centro de la viga aplicando como restricción la flecha máxima permitida siendo ésta de 5 milímetros.



$$q = \frac{1.170N}{0,47m} = 2.489,36N/m$$

· *CÁLCULO DE LAS VIGAS:*

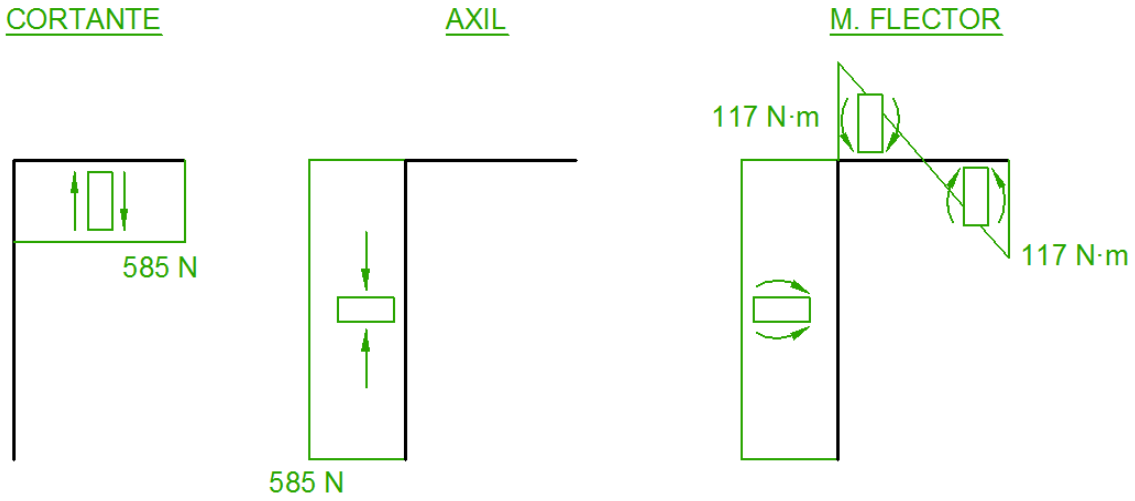
Cálculo de momentos y reacciones:



$$M_A = -M_B = M_{\max} = \frac{P \cdot L}{8} = \frac{1170\,N \cdot 0{,}8m}{8} = 117\,N \cdot m$$

$$R_A = R_B = \frac{P}{2} = \frac{1170}{2} = 585\,N$$

Se muestran los diagramas de distribución de tensiones teniendo en cuenta de que se trata de una estructura simétrica.



Flecha máxima :

$$f_{\max} = -\frac{P \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot I} = 5mm; \quad I = \frac{P \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot 5} = \frac{1170\,N \cdot 800^3\,mm}{192 \cdot 205.000\,MPa \cdot 5mm} = \underline{3.043{,}9mm^4}$$

Módulo elástico de flexión:

$$\sigma_{\max,adm} = \frac{M_F}{W_F}; \quad W_F = \frac{117.000\,N \cdot mm}{100\,MPa} = 117mm^3$$

A pesar de que una sección mas pequeña cumple con los mínimos fijados, se aumenta a propósito dicha sección con el fin de mejorar el apoyo entre el aerogenerador y los pórticos. El perfil seleccionado será:

$$40x40x2 \begin{cases} A = 2{,}94cm^2 \\ I = 6{,}94cm^4 \\ W_F = 3{,}47cm^3 \\ i = 1{,}54cm \end{cases}$$

· *CÁLCULO DE LOS PILARES:*

Partiendo del perfil elegido para la viga se comprueba el pilar a la combinación de esfuerzos al que está sometido verificando que cumple con el coeficiente de seguridad mínimo.

$$\sigma_{\max,adm} = \frac{M_F}{W_F} + \frac{N}{A}; \quad \sigma_{\max,adm} = \frac{171.000N \cdot mm}{3.470mm^3} + \frac{585N}{294mm^2} = 35{,}7MPa$$

$$Cs = \frac{\sigma_F}{\sigma_{\max,adm.}} = \frac{350MPa}{35{,}7MPa} = \underline{9{,}8}$$

Estudio a pandeo:

$$L_e = \beta \cdot L; \quad \beta = 2; \quad L_e = 2 \cdot 1.700mm = 3.400mm$$

$$\left.\begin{array}{l} \lambda = \dfrac{L_e}{i} = \dfrac{3.400mm}{15{,}4mm} = 220{,}78 \\ \lambda_{\lim} = \sqrt{\dfrac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_F}}; \quad \lambda_{\lim} = \sqrt{\dfrac{2 \cdot \pi^2 \cdot 205.000MPa}{350MPa}} = 107 \end{array}\right\} [\lambda > \lambda_{\lim}] \rightarrow EULER$$

Fuerza crítica de compresión y coeficiente de seguridad:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_e^2}; \quad F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 205.000MPa \cdot 6{,}94 \cdot 10^4 mm^4}{3.400^2 mm} = 12.146{,}61N$$

$$Cs = \frac{F_{cr}}{F_{compresión}}; \quad Cs = \frac{12.146{,}61N}{585N} = \underline{20{,}76}$$

El pilar es apto.

3.3. ESTUDIO CON SOLIDWORKS.

Se van a analizar las tres alternativas calculadas analíticamente a través del programa de diseño SolidWorks. Para ello, se abordarán los siguientes estudios:

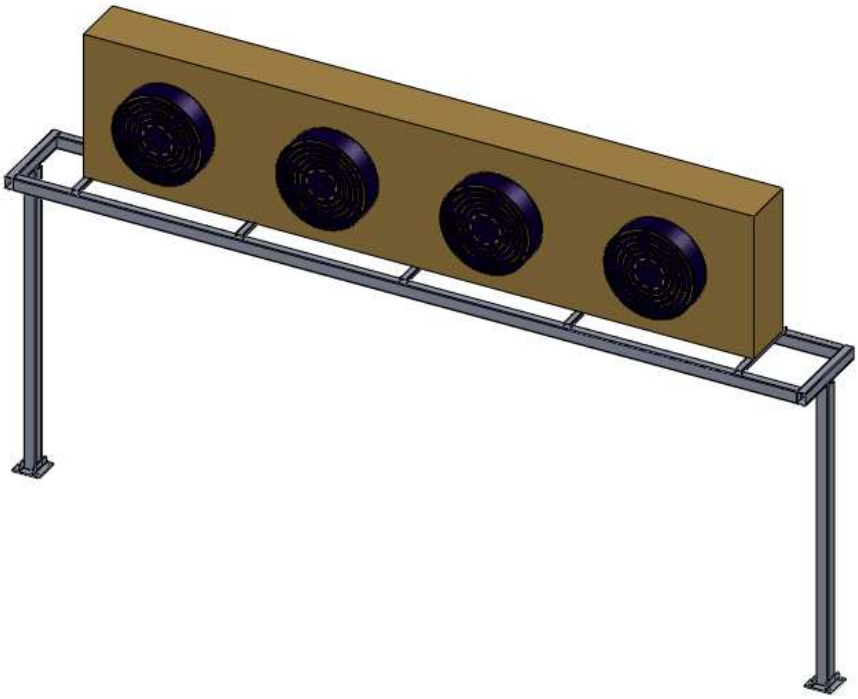
· Estudio estático. A través de éste estudio se obtendrán las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos máximos y el coeficiente de seguridad mínimo de la estructura al igual que en el caso analítico.

· Estudio a pandeo. Se comprobará el coeficiente de seguridad o factor de carga mínimo de la estructura antes de fallar a pandeo.

· Estudio de frecuencia. Debido a que el aerogenerador está solicitado por el peso de la estructura además de la velocidad de giro de cuatro ventiladores, se analizarán las tres opciones ante un posible problema de resonancia del modo más elemental. Posteriormente se ampliará el análisis de frecuencia para la estructura seleccionada dando solución al problema si es necesario.

- ***OPCIÓN 1.***

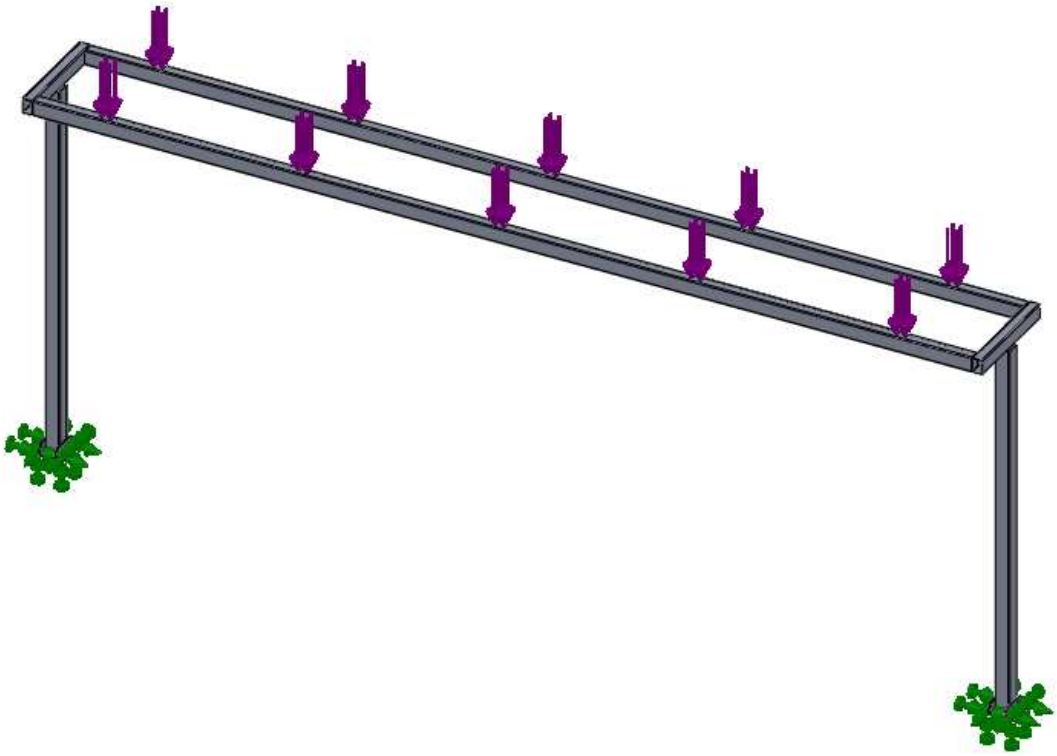
A continuación se muestra la colocación del aerogenerador para la primera opción de las estructuras.



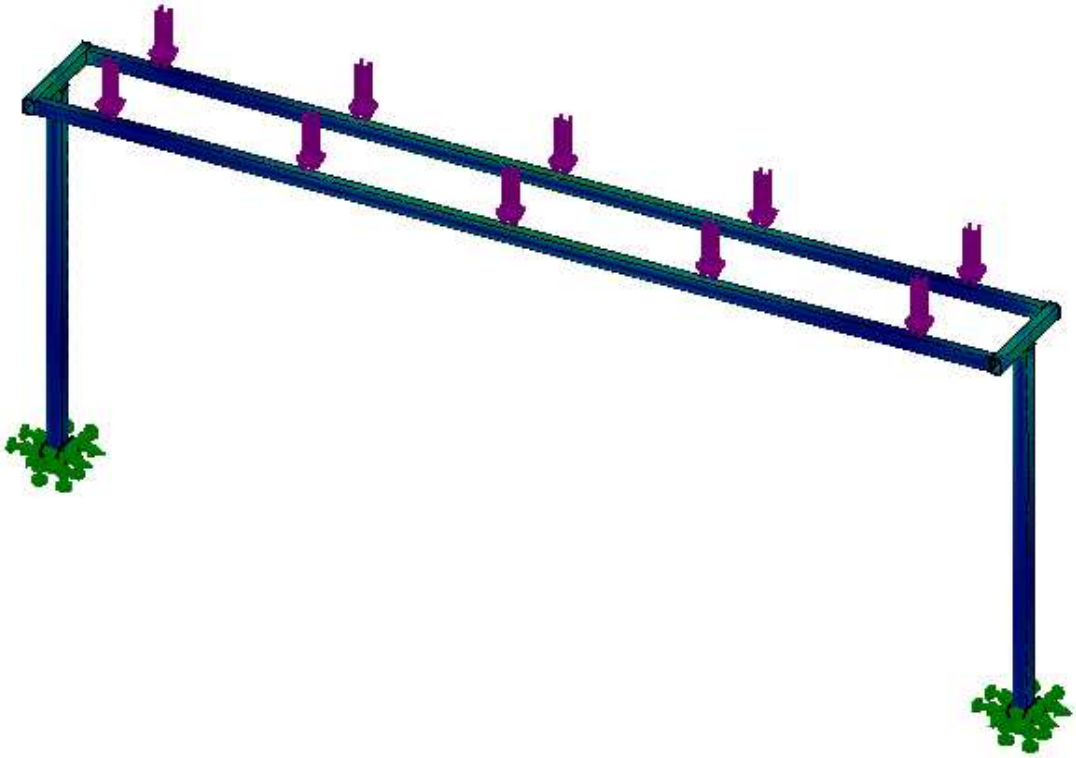
La estructura está formada por dos travesaños de sección rectangular de 70x50x4mm con una longitud de 4,3 metros. Las vigas, de la misma sección tienen una longitud de 0,5 metros. Los dos pilares son de sección cuadrada 70x70x6mm con 1,7 metros de altura. La distancia entre pilares es suficiente para albergar el segundo de los aerogeneradores que irá colocado entre ellos.

· ***Estudio estático.***

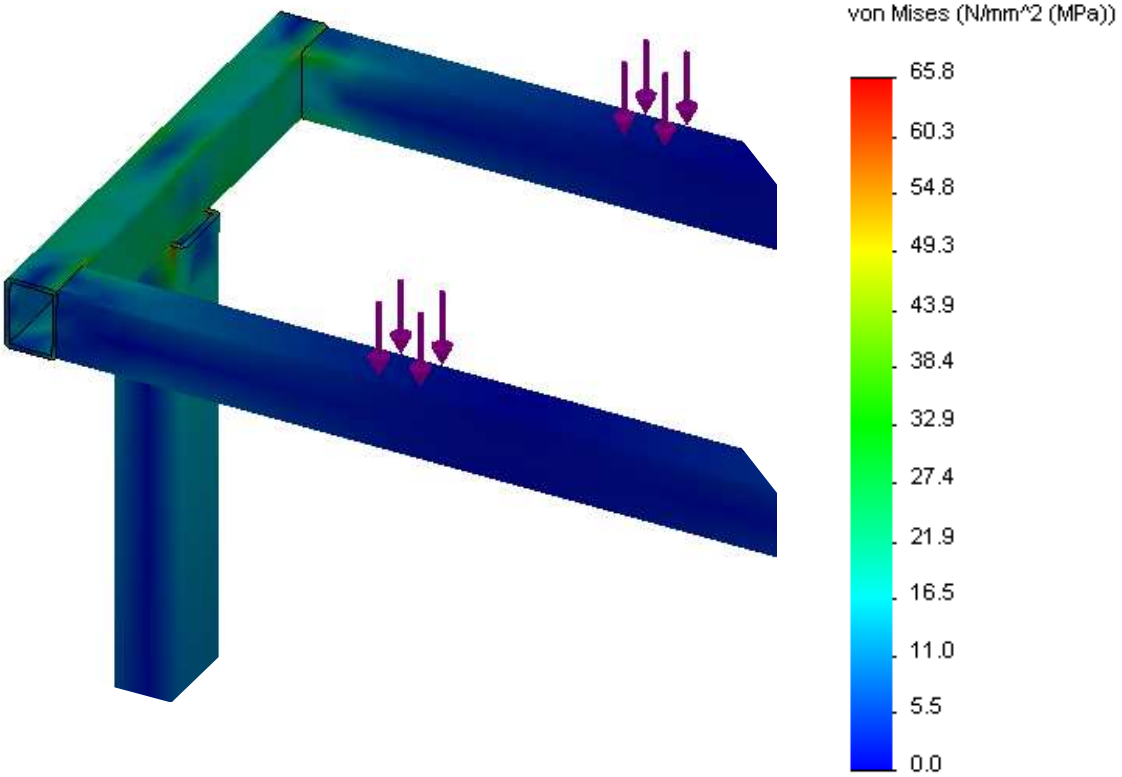
La carga total es de 2340 N aplicada en los puntos de apoyo según la dirección y sentido mostrado en la figura. Ambos pilares se consideran empotrados en la base.



· Distribución de tensiones de Von Mises.



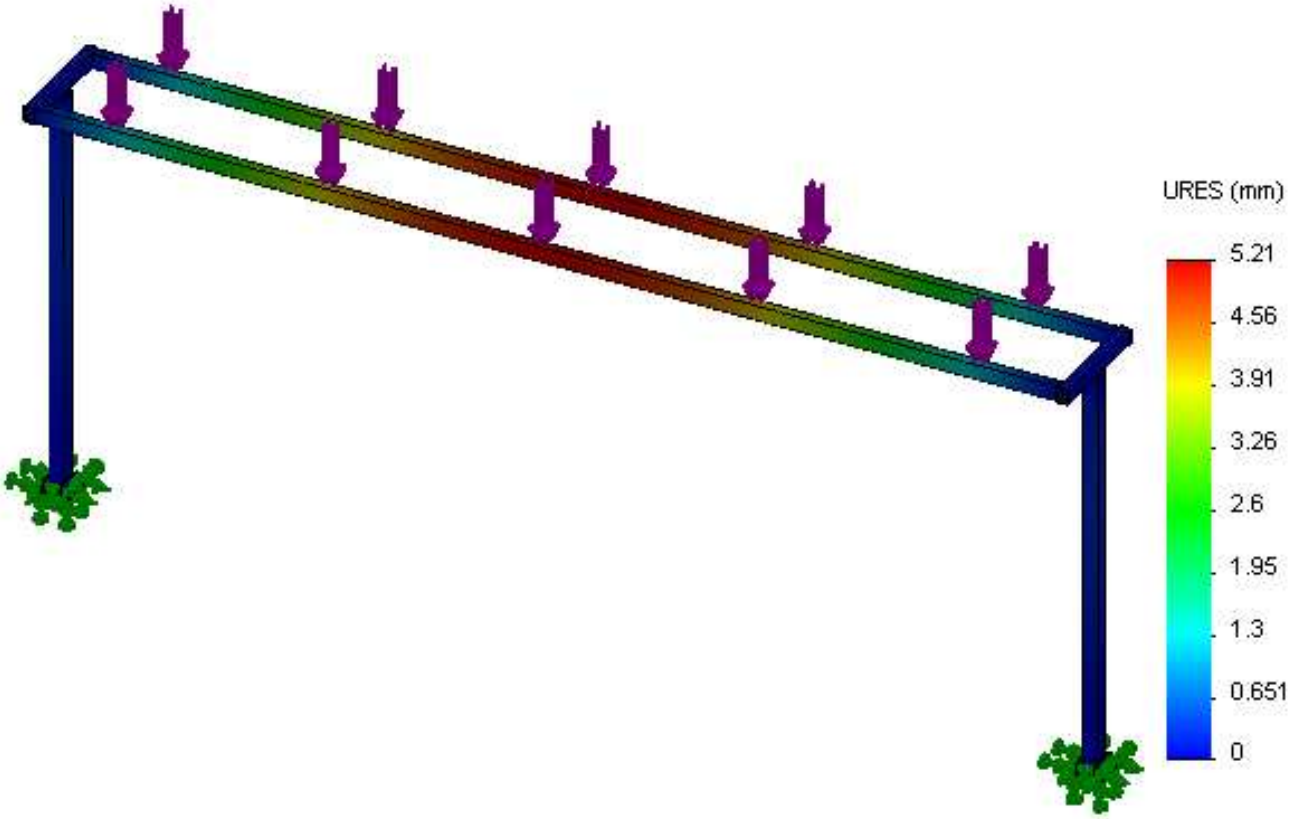
La máxima tensión se obtiene en el contacto entre los pilares y las vigas. Su valor máximo de 65,8 MPa no supone un problema para el diseño ya que, al ser menor de 100 MPa, el coeficiente de seguridad será mayor que 3,5 teniendo en cuenta la teoría del cortante máximo.



· Desplazamientos.

El desplazamiento máximo se obtiene en el punto medio de los travesaños con un valor de 5,21 milímetros. Se observa que el resultado coincide con el dato impuesto como condición de flecha máxima para los cálculos analíticos. Dicha coincidencia es debida a que, tanto en los pilares como en las vigas apenas existe desplazamiento, asemejándose así a unos travesaños con sus extremos empotrados.

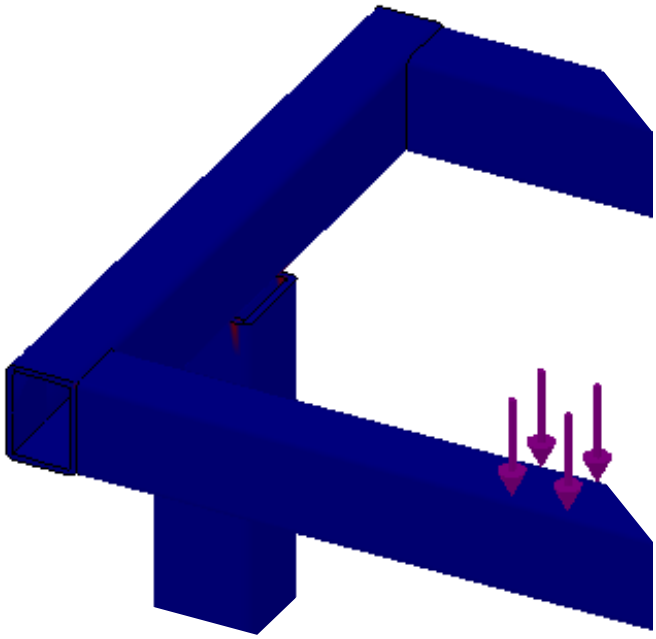
A continuación se muestran los desplazamientos de la estructura:



· Coeficiente de Seguridad.

Para evaluar el coeficiente de seguridad se empleará la teoría del cortante máximo con el fin de comparar la variación que existe respecto al calculado analíticamente.

El mínimo factor de seguridad es de 4,91 localizado en los puntos de contacto entre el pilar y las vigas, lugar donde se hacía máxima la tensión de Von Mises.



Para una mejor apreciación de la posición del mínimo coeficiente de seguridad, la imagen muestra con color azul las partes de la estructura con un coeficiente mayor a 5 y de color rojo, las zonas con un valor inferior al indicado.

· ***Estudio a pandeo.***

El coeficiente de seguridad o factor de carga a pandeo para la estructura es de 94,013. Es decir, la estructura antes de fallar a pandeo podrá soportar una carga de 219.960 N.

Analíticamente se obtuvo un valor aproximado de 142 teniendo en cuenta que toda la carga estaba aplicada en el punto central del travesaño.

Ambos valores reflejan que la estructura tiene un coeficiente de seguridad muy alto respecto al pandeo.

· ***Estudio de frecuencia.***

Puesto que la estructura debe soportar el peso de un aerogenerador de cuatro ventiladores, se analizará desde el modo más elemental un posible problema de frecuencia.

Para comprobar una posible resonancia se consideran cinco modos de frecuencia cercanos a la velocidad de giro de los ventiladores siendo ésta de 23 Hz o de 1.390 rpm. Si alguno de los modos calculados por el programa se acerca al valor de giro de los ventiladores la estructura entrará en resonancia.

A continuación se muestran el listado de frecuencias calculadas:

Estudio de frecuencia		
Nº de modo	Frecuencia (Hz)	Período (segundos)
1	15,572	0,064217
2	19,191	0,052108
3	20,005	0,049989
4	21,468	0,046582
5	23,096	0,043297

A pesar de un buen comportamiento estáticamente y a pandeo, al menos tres de las cinco frecuencias calculadas conllevan un riesgo de resonancia para la estructura.

Con el fin de no extender el estudio de las diferentes estructuras analizadas con SolidWorks, se realizará un apartado detallado del análisis de frecuencia de la opción seleccionada.

- ***OPCIÓN 2.***

La estructura la componen tres pilares y tres vigas de sección rectangular 60x40x2 milímetros. Los pilares tienen una longitud de 1,7 metros y las vigas de 0,5 metros. Puesto que no existe ninguna conexión entre pilares ni entre vigas, el estudio se va a centrar en el conjunto central pilar-viga ya que es el que más carga tiene que soportar.

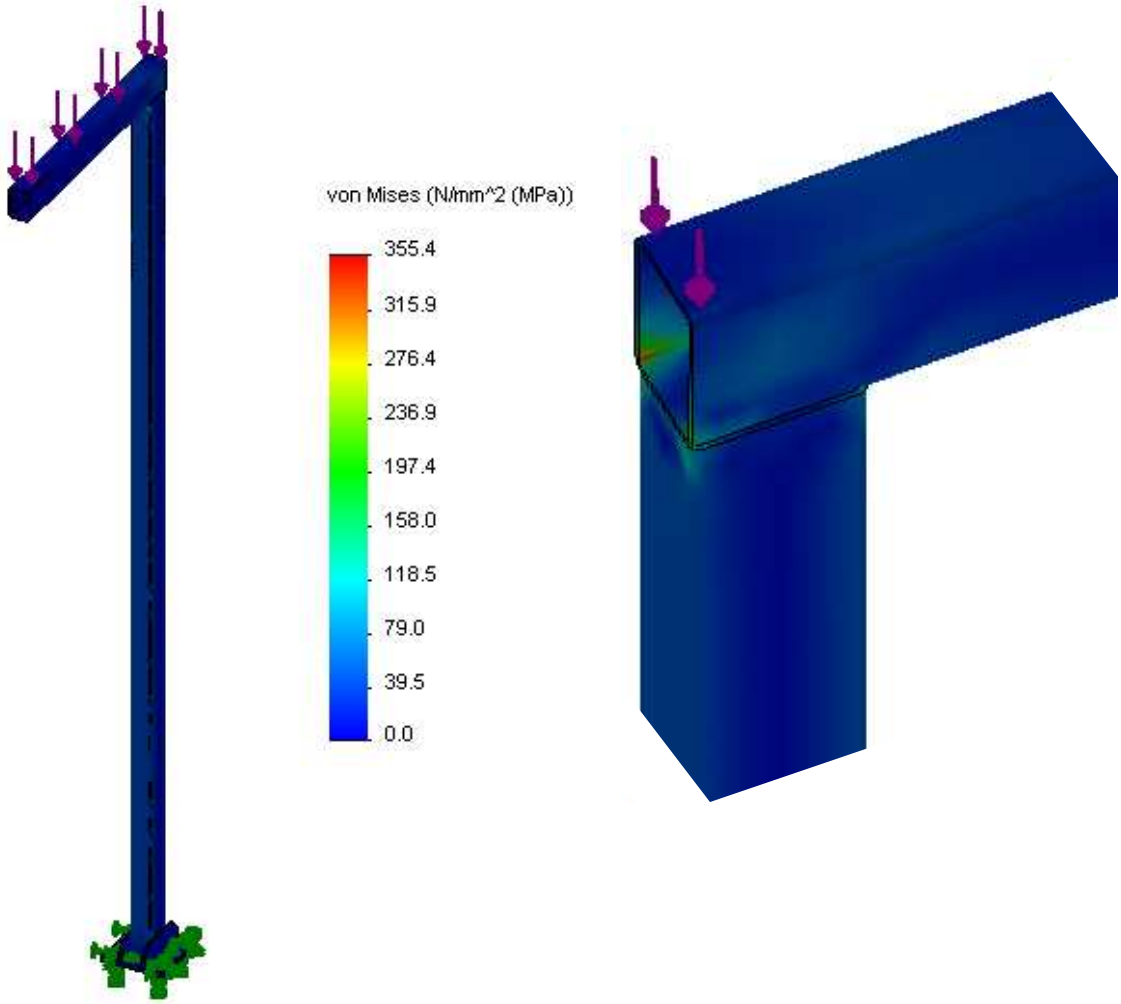
La distancia entre pilares queda definida por el propio aerogenerador siendo de 1,8 metros la distancia entre ejes del pilar central al pilar izquierdo y de 1,84 metros entre el pilar central y el derecho. Cotas según la figura adjunta.

Con esta opción se optimiza el espacio necesario para el montaje debido a que no se tienen en cuenta las dimensiones del aerogenerador inferior.

· ***Estudio estático.***

· Distribución de tensiones de Von Mises.

El conjunto pilar-viga centrales está solicitado por una carga de 1170 N según dirección y sentido indicado en las figuras adjuntas.



La tensión máxima de Von Mises con un valor de 355,4 MPa, es mayor que la tensión máxima a fluencia del material (350 MPa), por lo que a priori, se afirma que el coeficiente de seguridad va a ser menor que la unidad.

En las imágenes anteriores se aprecia que la máxima tensión se encuentra en la unión pilar-viga siendo mínima en el resto de la estructura. Teniendo en cuenta lo anterior, una posible solución al problema sería aumentar el espesor del perfil.

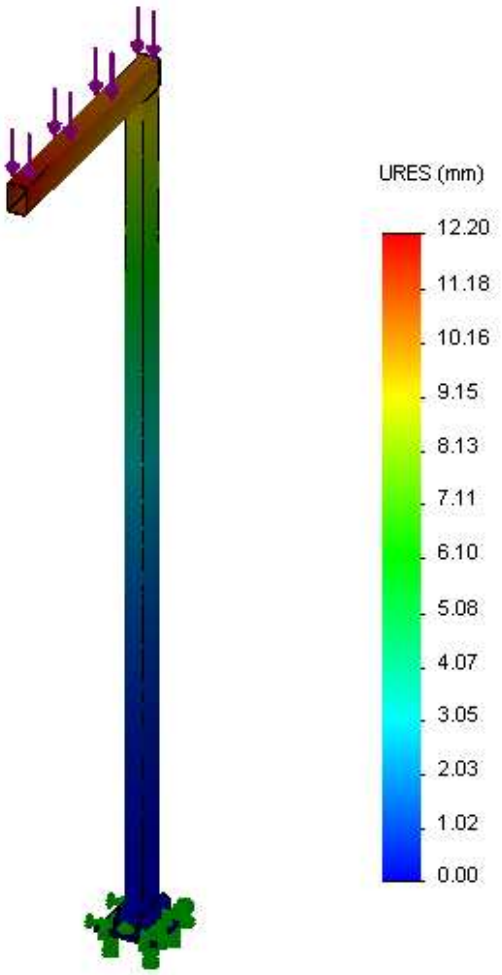
A pesar de que la estructura no va a cumplir con las expectativas, se completará el análisis con el fin de conocer el comportamiento de la misma.

· Desplazamientos.

Los desplazamientos máximos se dan en el extremo de la viga con un valor de 12,2 milímetros. Este dato difiere mucho de los cálculos analíticos debido a que se consideró que la viga estaba empotrada en un extremo y por tanto no existían desplazamientos.

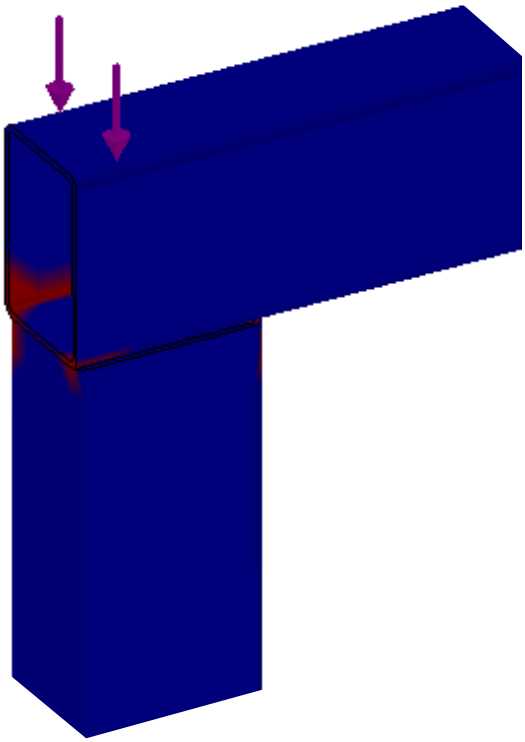
El desplazamiento real en el extremo del pilar toma un valor aproximado de 10 milímetros, por lo tanto, los cálculos analíticos de flecha máxima no son válidos.

Para cumplir con las expectativas, tanto la sección transversal del pilar como la de la viga deben ser mayores a la estimada a través de los cálculos analíticos.



· Coeficiente de seguridad

Se comprueba que, como se había previsto anteriormente, el factor de seguridad es menor que la unidad tomando un valor mínimo de 0,93 en las zonas marcadas de color rojo, en las cuales la tensión de Von Mises se hacía máxima.



Antes de realizar los estudios de pandeo y de frecuencia para la sección actual, se realiza un nuevo estudio estático para el mismo perfil pero con un espesor mayor 60x40x5 milímetros. Los resultados obtenidos son los siguientes:

· Tensión máxima de Von Mises: 62,1 MPa.

· Desplazamiento máximo: 5,77 milímetros.

· Coeficiente de seguridad: 2,75.

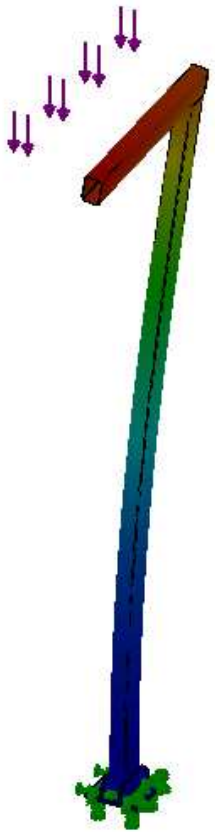
De los datos anteriores se determina que la sección es insuficiente ya que el coeficiente de seguridad es menor del estimado y los desplazamientos son mayores a los previstos.

A pesar de ello se continua con los análisis a pandeo y de frecuencia con la sección inicial 60x40x2 milímetros.

· ***Estudio a pandeo.***

El coeficiente de seguridad o factor de carga para esta estructura es de 13,107 muy similar al calculado analíticamente. La estructura tiene un buen comportamiento a pandeo.

Como se aprecia en la imagen, si la carga de compresión supera la carga crítica, la estructura pandeará por el eje de menor inercia como se supuso para los cálculos analíticos. Para aumentar el coeficiente de seguridad, basta con elegir un perfil con una mayor inercia en el eje "y-y" o eje más desfavorable.



· ***Estudio de frecuencia.***

La estructura no tiene problemas de resonancia ya que todos los modos de frecuencia calculados no están próximos al de la velocidad de giro de los ventiladores.

Se muestra una tabla con los modos de frecuencia calculados por el programa:

Estudio de frecuencia		
Nº de modo	**Frecuencia (Hz)**	**Período (segundos)**
1	1,5081	0,66308
2	2,0637	0,48456
3	10,2020	0,09802
4	14,2600	0,07012
5	63,1350	0,01583

- ***OPCIÓN 3.***

Esta tercera opción está compuesta por tres pórticos rectos, sin contacto directo entre ellos, construidos en su totalidad con un perfil de sección cuadrada 40x40x2 milímetros.

Los pilares tienen una longitud de 1,7 metros y la viga de 0,8 metros. La longitud de la viga es suficiente para alojar el aerogenerador inferior entre los pilares de los pórticos. Al igual que en la opción anterior, la distancia entre pórticos está definida por el propio aerogenerador.

Con esta solución se elimina el voladizo de la viga con el fin de reducir los desplazamientos máximos sin la necesidad de aumentar la sección del perfil.

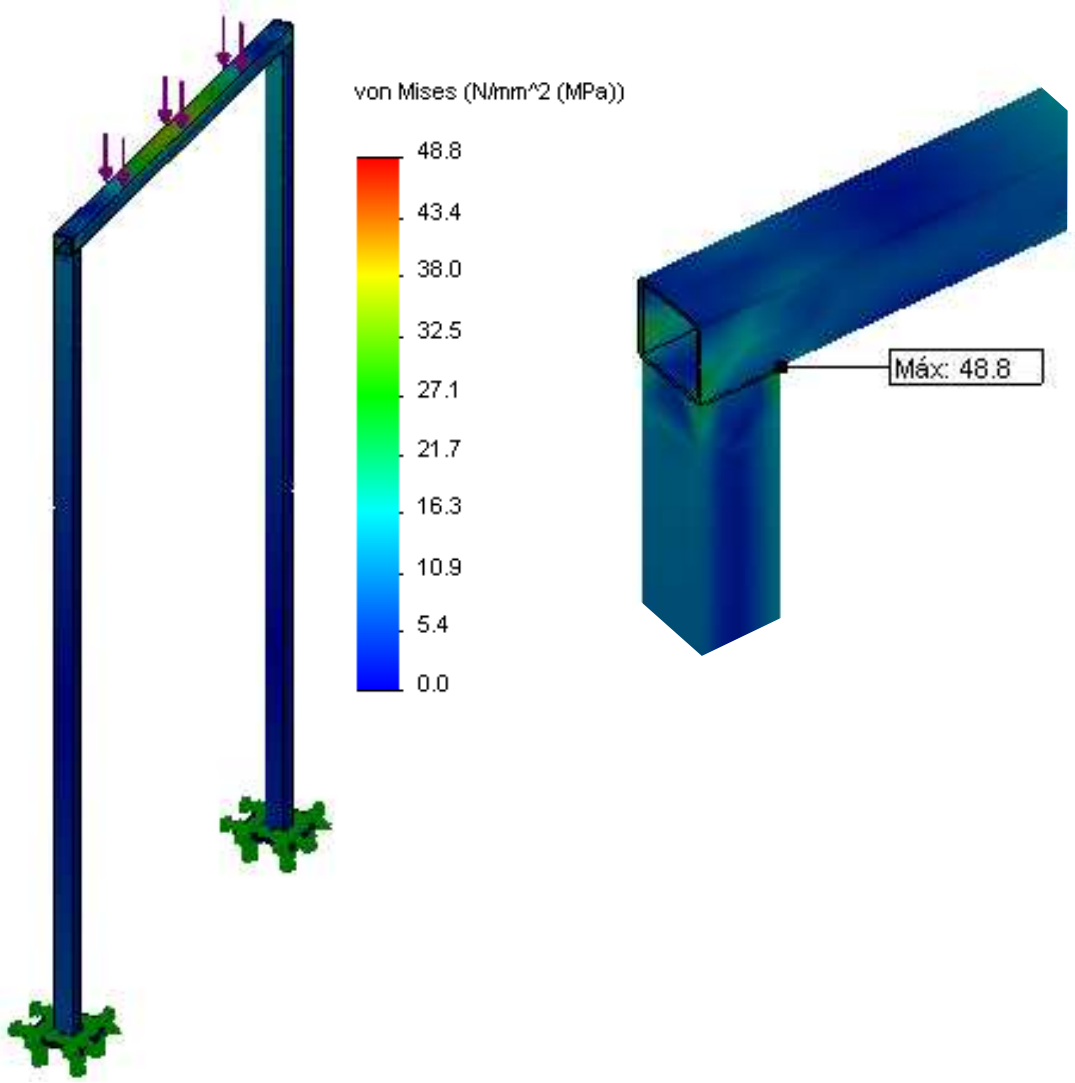
· ***Estudio estático.***

Se estudia el comportamiento del pórtico central debido a que es el más solicitado con una carga de 1.170 N dirección y sentido según la figura adjunta.

· Distribución de tensiones de Von Mises.

El valor máximo de la tensión de Von Mises es de 48,8 MPa situado en el punto de unión entre el pilar y la viga. Teniendo en cuenta dicho valor, el coeficiente de seguridad será mayor que el mínimo establecido, es decir, mayor que 3,5.

Las bajas tensiones de Von Mises y el consiguiente aumento del coeficiente de seguridad se debe a que, por razones de diseño, se partía de un perfil sobredimensionado para que el contacto entre los apoyos del aerogenerador y las vigas fuera los más optimo posible.



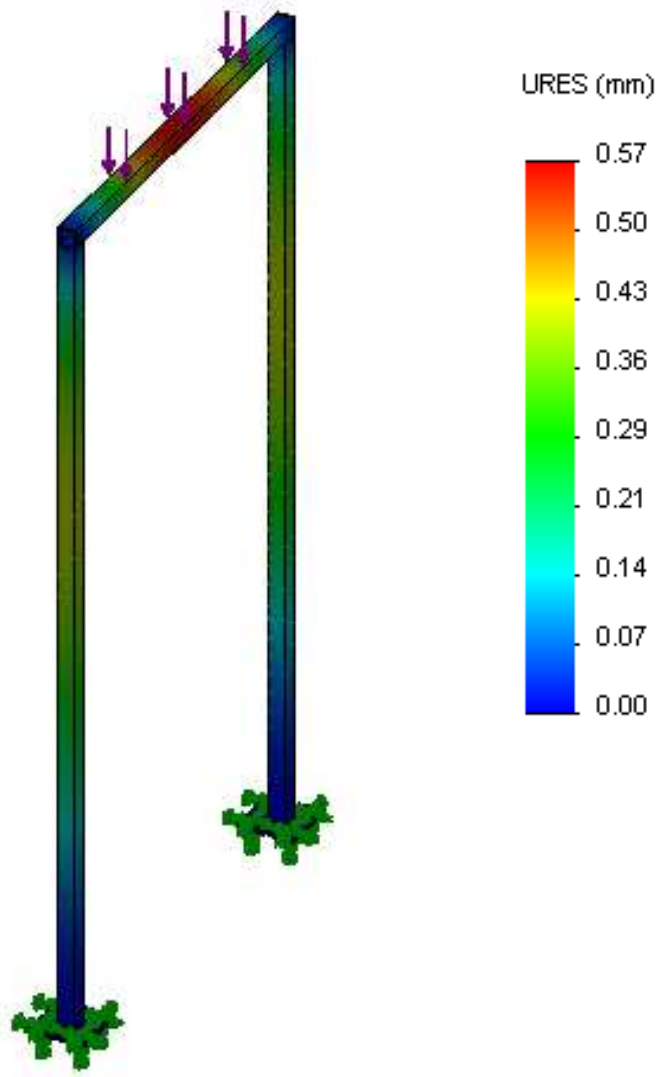
· Desplazamientos.

La carga no se encuentra distribuida a lo largo de toda la viga, sino que está aplicada teniendo en cuenta la longitud de los perfiles de apoyo del aerogenerador de 470 milímetros.

Al igual que ocurre con las tensiones, los desplazamientos son inferiores a los calculados analíticamente puesto que la sección del perfil es mayor a la necesaria, como se ha señalado anteriormente.

El valor máximo se encuentra en el centro de la viga, donde la flecha máxima será de 0,57 milímetros.

Con estos datos se puede afirmar que la estructura se comporta mejor de lo esperado para el estudio estático.



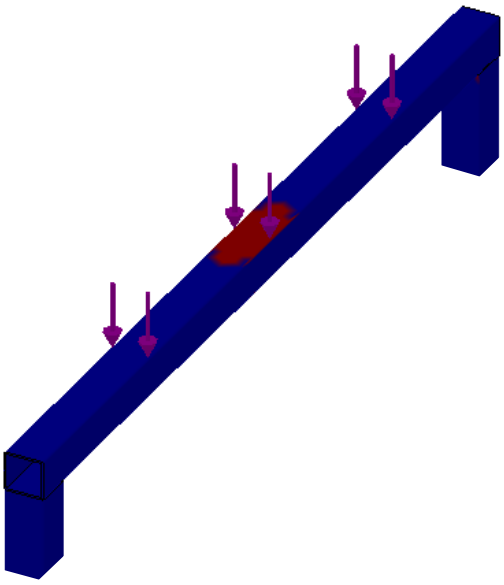
· Coeficiente de seguridad.

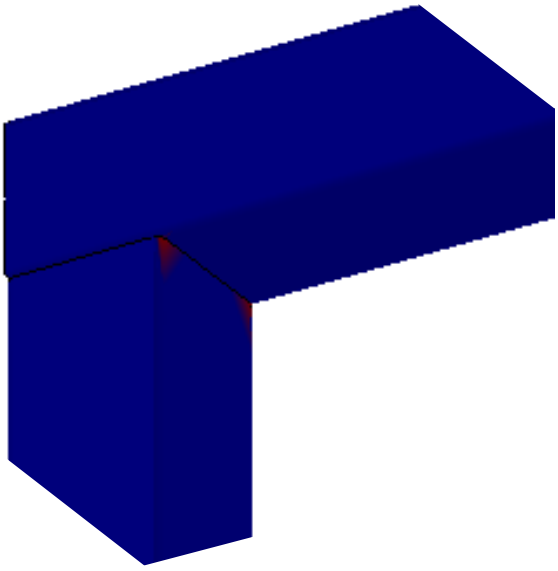
El coeficiente de seguridad mínimo aplicando la teoría de cortante máximo es de 6,1 dándose en el mismo punto donde las tensiones de Von Mises se hacían máximas, en la unión pilar-viga.

Para una mejor apreciación de las zonas más desfavorables de la estructura, se marcan de color rojo las zonas con un coeficiente de seguridad menor que 10 y de color azul las zonas con mayor coeficiente.

La zona central de la viga, tanto en la parte superior como en la inferior tienen un coeficiente de seguridad mayor que 9,5 .

El coeficiente de seguridad es apto para la opción número tres.





· ***Estudio a pandeo.***

El factor de carga para el pórtico central es de 19,427. Valor muy cercano al calculado analíticamente.

La estructura cumple perfectamente los esfuerzos a pandeo. En la figura de la izquierda se muestra el desplazamiento del pórtico si se supera la carga crítica a pandeo, es decir, 22.730 N.

Al tratarse de una sección cuadrada el pilar no pandeará por el eje de menor inercia ya que es la misma para ambos, sino que lo hará por el eje que menos impedimentos tenga para los desplazamientos.

· ***Estudio de frecuencia.***

Calculados cinco modos de frecuencia cercanas a la velocidad de giro de los ventiladores se comprueba que existe riesgo de resonancia según el cuarto modo de frecuencia.

Estudio de frecuencia		
Nº de modo	Frecuencia (Hz)	Período (segundos)
1	1,807	0,5533
2	3,252	0,3075
3	11,809	0,0846
4	22,036	0,0454
5	57,216	0,0175

3.4. COMPARATIVA DE LAS OPCIONES.

A modo de resumen, se comparan las tres opciones estudiadas con SolidWorks analizando algunos puntos importantes como pueden ser:

· Volumen ocupado.
· Peso de la estructura.
· Tensiones máximas.
· Desplazamientos máximos.
· Coeficiente de seguridad.
· Factor de carga a pandeo.
· Estudio de frecuencia.

Para la selección de la estructura, a parte de los puntos enunciados, se tendrán en cuenta factores técnicos para llevar a cabo la instalación como son, facilidad de montaje, transporte y mantenimiento.

Se adjunta la tabla comparativa:

	OPCIÓN Nº 1	OPCIÓN Nº 2	OPCIÓN Nº 3
Volumen total (m3)	3,894	3,238	5,635
Peso total (kg)	102,84	19,34	29,66
Tensiones máximas V.M. (MPa)	65,8	355,4	48,8
Desplazamientos máximos. (mm)	5,21	12,2	0,57
Coeficiente de seguridad	4,91	0,93	6,1
Factor de carga a pandeo	94,013	13,107	19,427
Nº de Frecuencias resonantes	3	0	1
Ventajas	· Anclaje rápido al ser una estructura única. · Apoyo completo del aerogenerador. · Facilidad de mantenimiento de ambos aerogeneradores.	· Peso y volumen mínimo. · Facilidad en el transporte, montaje y anclaje. · Mantenimiento accesible para ambos aerogeneradores. · No sufre efectos resonantes.	· Desplazamientos prácticamente nulos con un peso total mínimo. · Máximo coeficiente de seguridad. · Facilidad en transporte e instalación.
Desventajas	· Peso total muy grande. · Problemas de resonancia. · Transporte y ubicación complicados. · Dimensiones condicionadas por el aerogenerador inferior.	· Sección de perfil insuficiente. · Desplazamientos mayores en el extremo de viga en voladizo.	· Elevado volumen condicionado por el aerogenerador inferior. · Supone un obstáculo para el mantenimiento. · Problemas de resonancia.

Teniendo en cuenta la tabla comparativa anterior, se opta por la opción número dos, para la instalación de la estructura, compuesta por tres pilares con tres vigas en voladizo.

A pesar de que la estructura no cumple con los objetivos previstos, la geometría es la más adecuada para los propósitos a los que está destinada.

Se escoge dicha alternativa ya que sus ventajas son mayores que sus desventajas. Entre sus pros, podemos destacar la facilidad en el transporte, debido a que el volumen que ocupan la estructura sin montar es muy reducido. El montaje es muy rápido y sencillo, pudiendo afrontar diferentes obstáculos in situ y el hecho de que tanto los pilares como las vigas sean de la misma sección, facilita el trabajo a la empresa encargada de su ejecución.

Teniendo en cuenta que el espacio destinado a la instalación es un gran hándicap, ésta opción optimiza el espacio necesario debido a que no se tienen en cuenta las dimensiones del aerogenerador inferior como en los otros dos casos.

Centrándonos en el futuro mantenimiento de los aparatos, la estructura favorece la sustitución y/o reparación de componentes puesto que se mejora el acceso a ambos aerogeneradores sin tener elementos que obstaculicen las operaciones.

Atendiendo al peso total de la estructura, comprobamos que se trata de la opción más ligera de las analizadas. Para cumplir con la finalidad de la estructura, se deberá aumentar la sección de los perfiles con el consiguiente incremento del peso total. Dicha variación se analizará a continuación.

4. ANÁLISIS DE LA OPCIÓN SELECCIONADA.

Para cumplir con sus objetivos, se realizará un nuevo estudio donde se aumentará la sección transversal. Tanto para el pilar como para la viga, se empleará un perfil rectangular de 80x60x5mm con las siguientes propiedades:

$$80x60x5 \begin{cases} A = 12{,}4cm^2 \\ I_x = 103cm^4; I_y = 65{,}7cm^4 \\ W_x = 25{,}8cm^3; W_y = 21{,}9cm^3 \\ i_x = 2{,}89cm; i_y = 2{,}31cm \end{cases}$$

Con la nueva sección el peso total de la estructura será de 64,02 kg por lo que la variación de peso respecto a la inicial es de 44,68 kg. De este modo pasará de ser la opción más ligera a quedar en segundo lugar, teniendo en cuenta el peso total de cada una de las opciones.

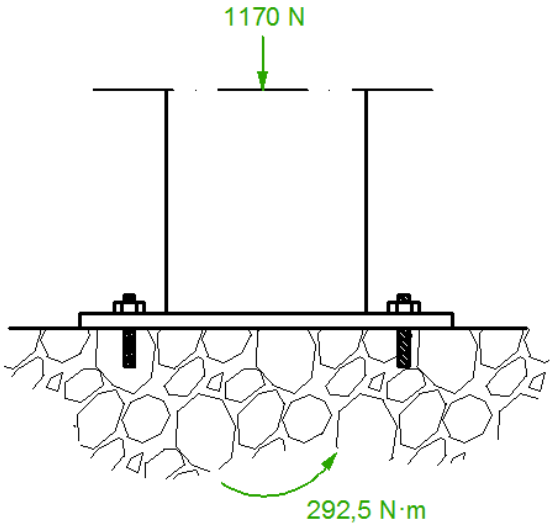
Para un completo análisis de la estructura, se procederá inicialmente al cálculo de los pernos de anclaje para la placa base prevista. Posteriormente, se estudiarán diferentes hipótesis de carga tanto para los estudios analíticos como para los estudios a pandeo, comprobando su comportamiento en los casos más desfavorables. Al tratarse de la opción final, cada una de las vigas dispondrá de dos taladros de diámetro 14mm en los cuales irán alojados los correspondientes silentblocks evitando posibles vibraciones.

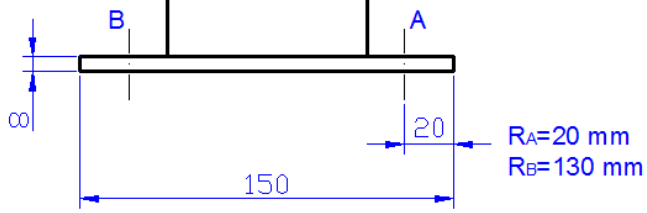
4.1. CÁLCULO ANALÍTICO DE PERNOS DE ANCLAJE.

Para el cálculo de los pernos se tendrán en cuenta los diagramas de distribución de tensiones calculados analíticamente para la opción 2 (Pág. 11).

La placa de apoyo será de sección cuadrada 150x150x8 milímetros con cuatro taladros dispuestos según cotas.

El empotramiento estará solicitado por un axil de 1.170 N a compresión y por un momento flector de 292,5 N·m de sentido antihorario. Debido a que la carga de compresión actúa a favor de los pernos reduciendo la acción del momento flector, se desprecia dicha fuerza para el cálculo de los anclajes, actuando así a favor del coeficiente de seguridad de los mismos. La precarga de los tornillos también se ha desestimado puesto que la selección de los mismos se efectúa por medio de un prontuario donde se detalla la fuerza máxima a tracción.





La unión está solicitada a flexión, siendo nula la fuerza a cortadura. La fuerza a tracción se calcula en base a las siguientes ecuaciones:

$$(1)\quad \boxed{(n_A \cdot F_A \cdot r_A) + (n_B \cdot F_B \cdot r_B) = M}$$

$$(2)\quad \boxed{\frac{F_A}{r_A} = \frac{F_B}{r_B}}$$

A partir de (1) y (2) se calcula la fuerza máxima unitaria a la que están sometidos los anclajes. El diámetro de los tornillos será seleccionado de un catálogo de pernos de anclaje (Anexo 3). El modelo elegido ha sido pernos de expansión de cuña, debido a su facilidad de instalación y a su buena respuesta de sujeción en hormigón.

La fuerza a tracción que pueden soportar dichos pernos está agrupada según diámetro y profundidad de empotramiento así como por el tipo de hormigón. Como a priori se desconoce la composición del mismo, se tomará el menos resistente, H-14.

$$\frac{F_A}{r_A} = \frac{F_B}{r_B}; \quad \frac{F_A}{20} = \frac{F_B}{130}; \quad \underline{F_B = 6{,}5 \cdot F_A}; \quad Sustituyo \quad (1) \quad en \quad (2):$$

$$(n_A \cdot F_A \cdot r_A) + (n_B \cdot F_B \cdot r_B) = M;$$
$$[2 \cdot F_A \cdot 20] + [2 \cdot (6{,}5 \cdot F_A) \cdot 130] = 292.500\, N \cdot mm$$

$$Operando \quad nos \quad queda:$$

$$\underline{F_A = 169{,}08N}$$

$$\underline{F_B = 1098{,}98N}$$

El perno más desfavorable es el B con una carga a tracción de 1098,98 N ó 109,9 Kg.

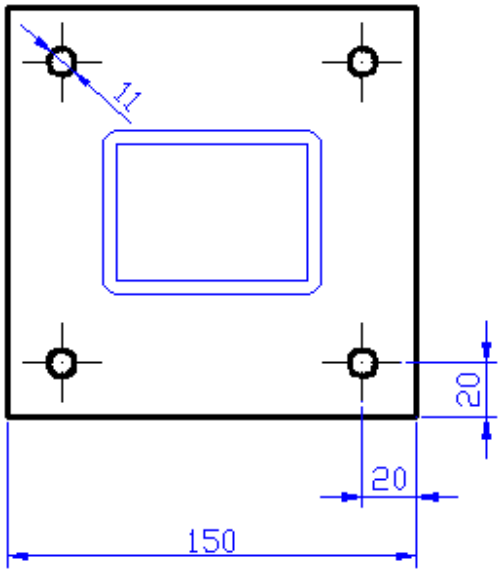
Según el prontuario de sistemas de anclajes mecánicos, la carga máxima a tracción para un perno de expansión de cuña con 3/8 pulgadas de diámetro y 1-1/2 pulgadas de empotramiento, es de 724 Kg.

Para conocer el coeficiente de seguridad de la unión basta con dividir la carga máxima a tracción del tornillo por la carga real a tracción quedando de la siguiente manera:

$$\boxed{Cs = \frac{724Kg}{109{,}9Kg} = \underline{6{,}56}}$$

Así pues, la unión estará compuesta por 4 pernos de anclaje de expansión de cuña con un diámetro de 3/8 pulgadas y una profundidad de empotramiento de 1-1/2 pulgadas. Según especificaciones del prontuario, el diámetro de los orificios de la placa base debe medir 1/16 pulgadas más que el diámetro nominal de los pernos, por lo tanto, el diámetro de los agujeros pasantes de la placa base será de 11 milímetros.

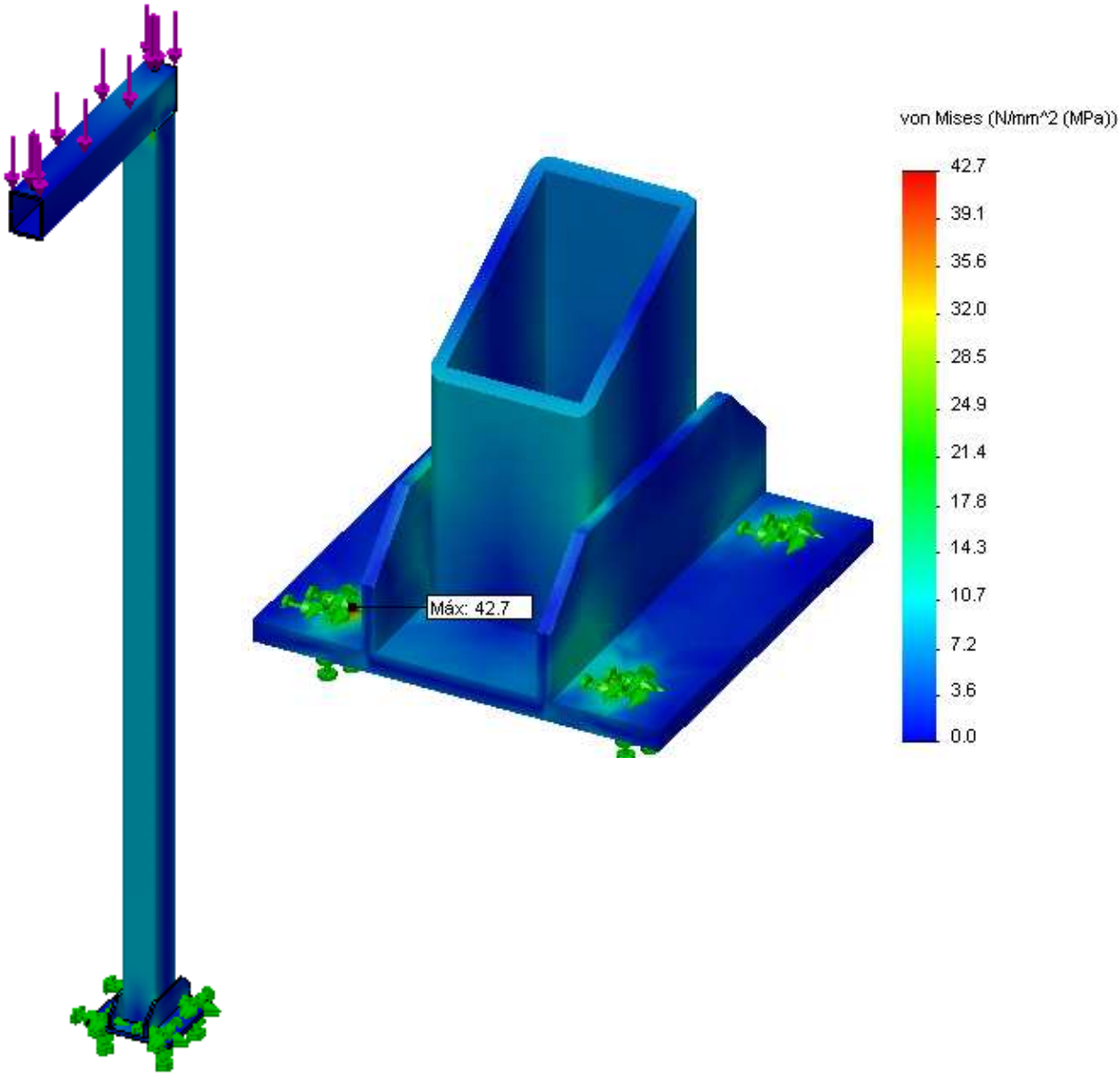
Se muestra la vista en planta de la placa base con la posición final del perfil:



4.2. ANÁLISIS ESTÁTICO CON CARGA DISTRIBUIDA.

· Distribución de tensiones de Von Mises.

El valor máximo de la tensión de Von Mises es de 42,7 MPa localizado en uno de los taladros de la placa base más próximo al extremo de la viga. Las siguientes mayores tensiones se dan en la unión entre el pilar y la viga con unos valores en torno a los 35 MPa. Tanto el pilar como la viga soportan bajas tensiones de Von Mises, por lo que se puede afirmar que el coeficiente de seguridad tendrá un valor mayor al previsto inicialmente.

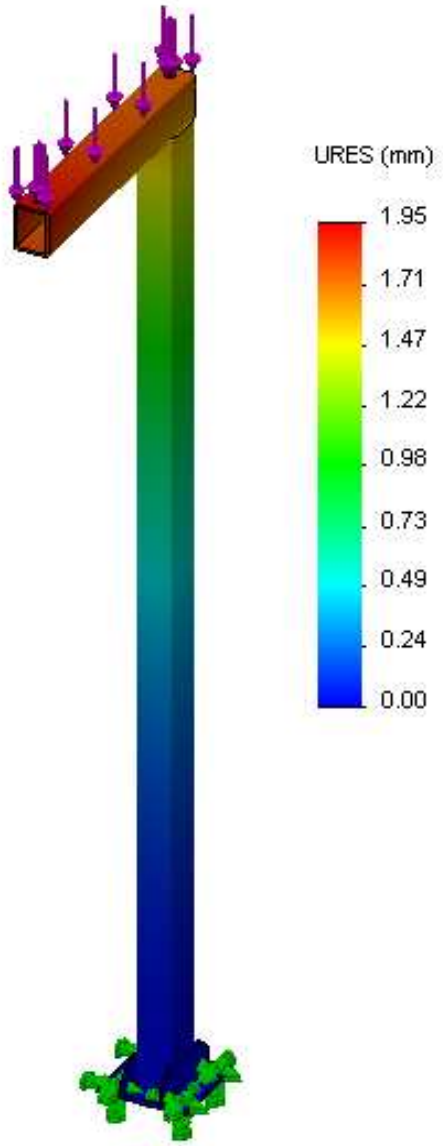


· Desplazamientos.

Los desplazamientos han disminuido drásticamente al aumentar la sección del perfil, siendo ahora los mayores desplazamientos de 1,95 milímetros en el extremo de la viga.

Los desplazamientos que sufre el extremo del pilar están en torno a 1,6 milímetros. Se han reducido considerablemente los desplazamientos obtenidos con la sección inicial del pilar, dado que el dato para el mismo punto rondaba los 10 milímetros.

A continuación se muestra el diagrama de desplazamientos de la estructura:

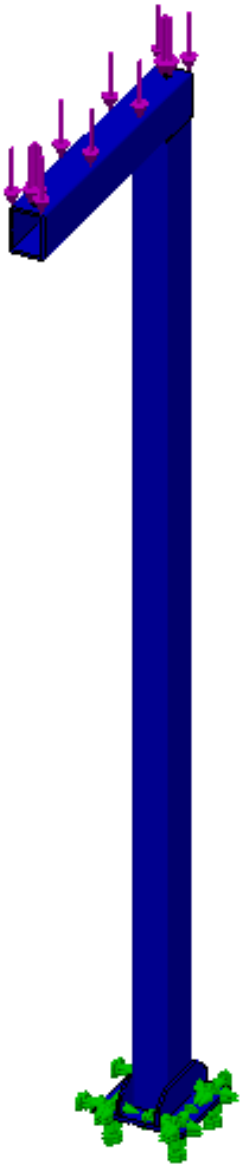


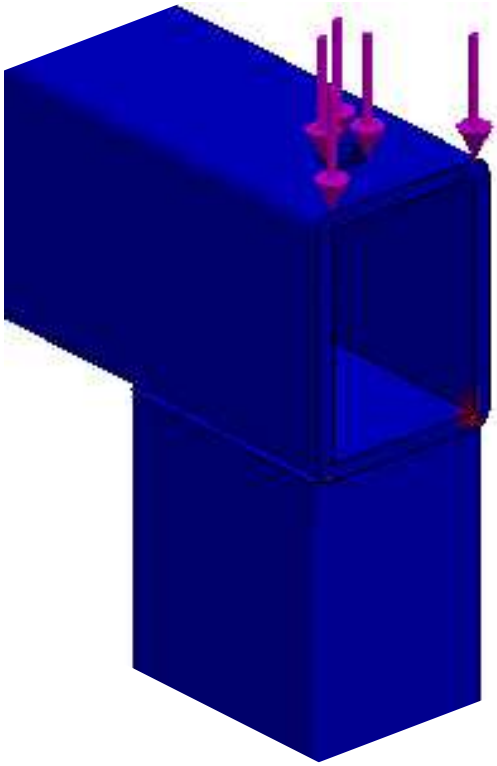
· Coeficiente de seguridad.

El mínimo coeficiente de seguridad se obtiene en el orificio en el cual las tensiones de Von Mises se hacía máximas, tomando un valor de 7,38.

Como se puede contemplar en el detalle de la unión entre el pilar y la viga, se aprecian dos zonas marcadas de color rojo justo donde se localizaban las segundas mayores tensiones. El coeficiente de seguridad en dichos puntos está en torno a 9.

Las zonas marcadas de color azul presentan un factor de seguridad mayor de 10.





4.3. ANÁLISIS ESTÁTICO CON CARGA EN EXTREMO.

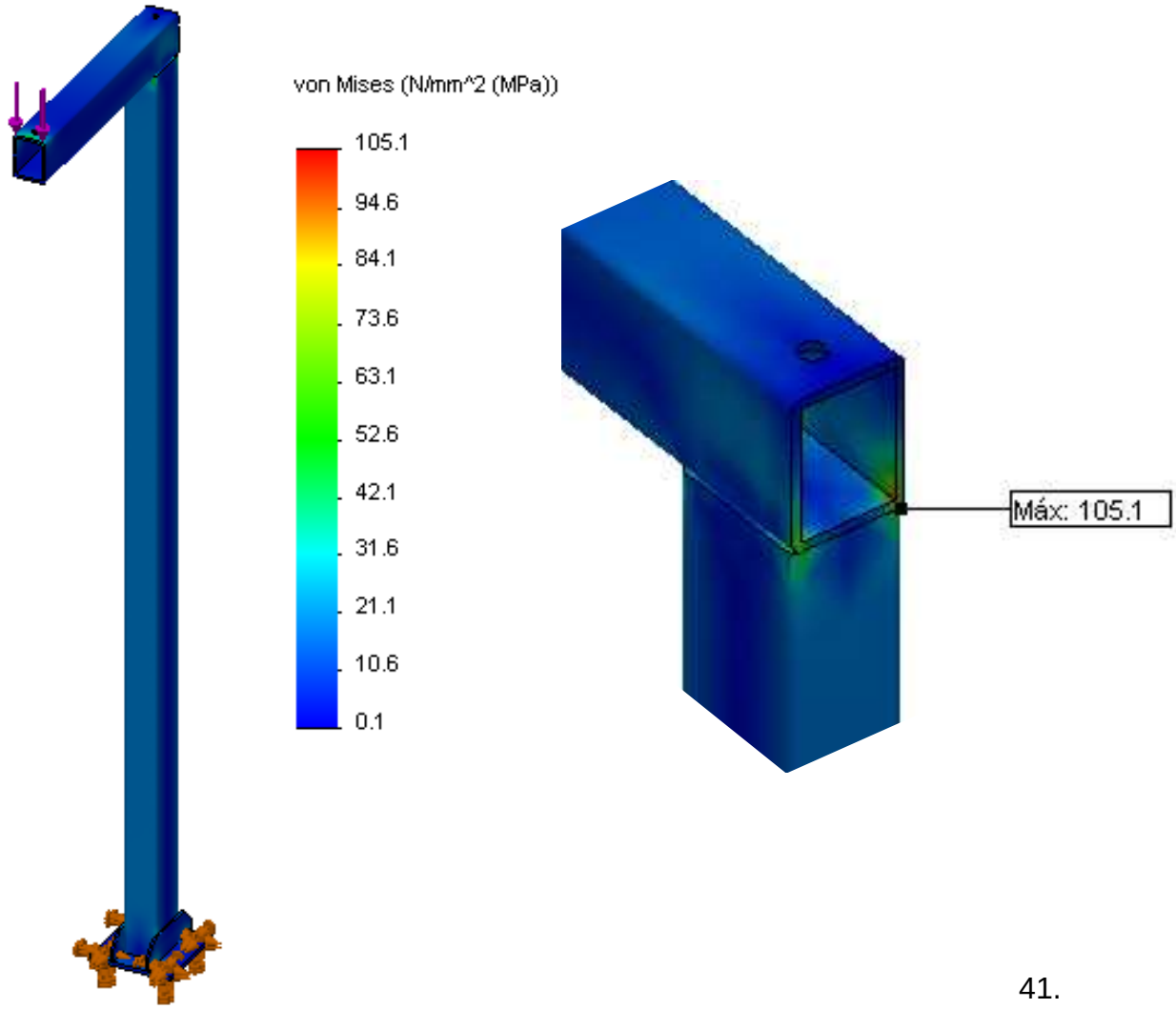
Con el fin de garantizar la seguridad de la estructura bajo cualquier circunstancia, se realiza el análisis estático y de pandeo con una carga de 1.170 N en el extremo de la viga según muestran las figuras.

Con ello, se pretende comprobar la respuesta de la estructura ante las condiciones más desfavorables de carga, tanto en la instalación del aerogenerador, como en su posterior vida útil.

· Distribución de tensiones de Von Mises.

En éste caso, la tensión máxima de Von Mises se encuentra en la unión entre el pilar y la viga tomando un valor de 105,1 MPa. Las tensiones en el resto de la estructura son insignificantes en comparación con las primeras.

La máxima tensión admisible para un coeficiente de seguridad de 3,5 según criterios mínimos establecidos es de 100 MPa. A priori se estima que el coeficiente de seguridad para éstas condiciones de carga será menor que el indicado.

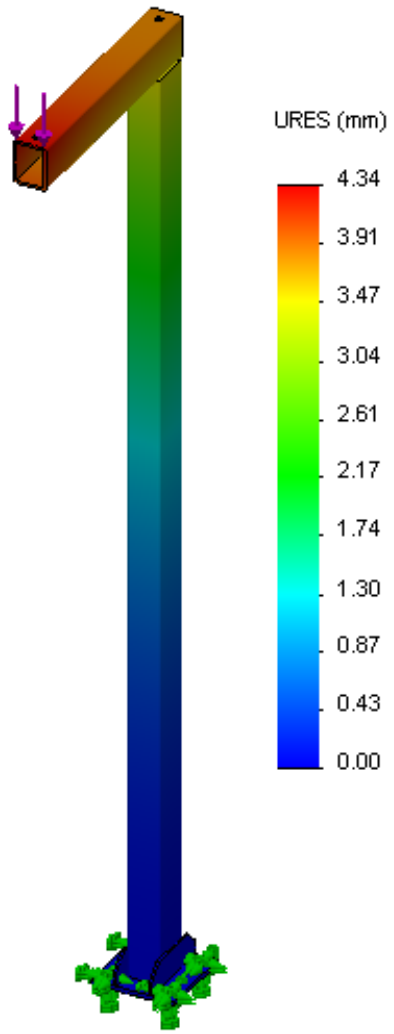


· Desplazamientos.

El desplazamiento máximo es de 4,34 milímetros. Aun con las condiciones mas adversas, los desplazamientos en el extremo del pilar son menores de la mitad que los obtenidos con la sección inicial.

Como comparativa respecto a la primera sección que se analizó, decir que el desplazamiento máximo que sufre el pilar en su extremo libre es tan solo de 3,5 milímetros, aproximadamente la tercera parte.

Para concluir, se puede afirmar que tanto los desplazamientos obtenidos con la carga distribuida, como los evaluados con la carga en el extremo, son aptos y muy próximos a los establecidos analíticamente para la flecha máxima.

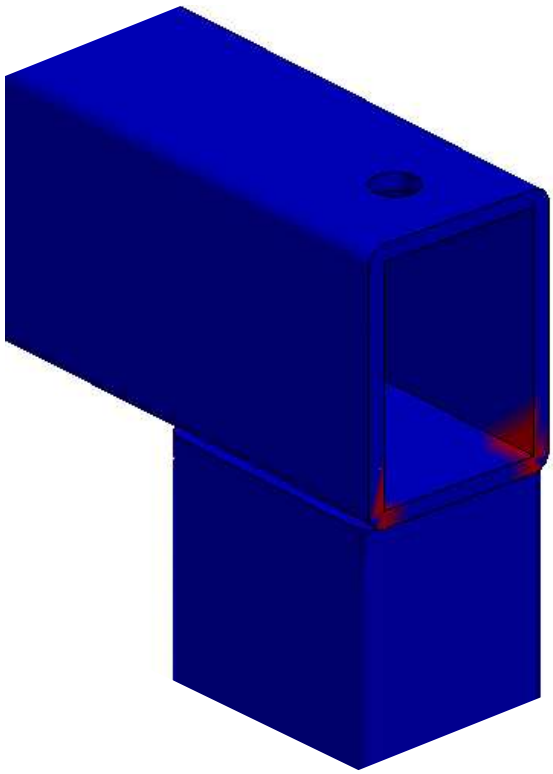


· Coeficiente de seguridad.

Como se había previsto, el coeficiente de seguridad mínimo está por debajo del establecido siendo igual a 3,08. Se comprueba que las zonas donde las tensiones eran máximas disponen del un menor coeficiente de seguridad.

Al tratarse de dos zonas concretas entre la unión del pilar con la viga, se considera suficiente el resultado obtenido, siempre y cuando la unión sea reforzada en su construcción, como mínimo para el pilar central.

Las zonas marcadas con color azul poseen un coeficiente de seguridad mayor que 5.



4.4. ANÁLISIS DE PANDEO CON CARGA DISTRIBUIDA.

Con la nueva sección, la inercia del eje más desfavorable ha aumentado en torno a 6,5 veces. Del mismo modo, el factor de carga también ha crecido con dicha proporción, siendo ahora de 84,593.

Se muestra la deformada de la estructura en caso de alcanzarse una carga a compresión 85 veces mayor de la actual, es decir 99.450 N.

4.5. ANÁLISIS DE PANDEO CON CARGA EN EXTREMO.

Para éste caso, el factor de carga es inferior al anterior tomando un valor de 73,78. Ambos resultados otorgan un buen comportamiento a pandeo ante cualquier condición de carga.

Al igual que para el caso de carga distribuida, la deformada de la estructura tendrá el mismo resultado, pandeará por el eje de menor inercia.

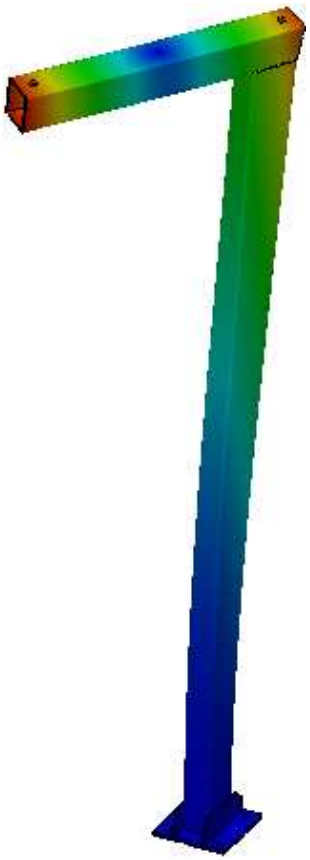
4.6. ANÁLISIS DE FRECUENCIA.

Para el estudio de frecuencia, además de comprobar si la estructura está expuesta a resonancia como en las alternativas anteriores, en caso afirmativo, se dará solución al problema, analizando si fuera preciso la estructura entera, formada por los tres pilares con sus respectivas vigas en voladizo.

Los cinco modos de frecuencia más próximos a la velocidad de giro del ventilador calculados por SolidWorks son los siguientes:

Estudio de frecuencia		
Nº de modo	**Frecuencia (Hz)**	**Período (segundos)**
1	3,658	0,2734
2	4,574	0,2186
3	24,992	0,0400
4	35,877	0,0279
5	84,843	0,0118

Al aumentar la sección nos aparece un riesgo de resonancia según el modo tercero obtenido con el programa. Se muestra el movimiento que sufrirá la estructura en vista isométrica y en vista frontal.



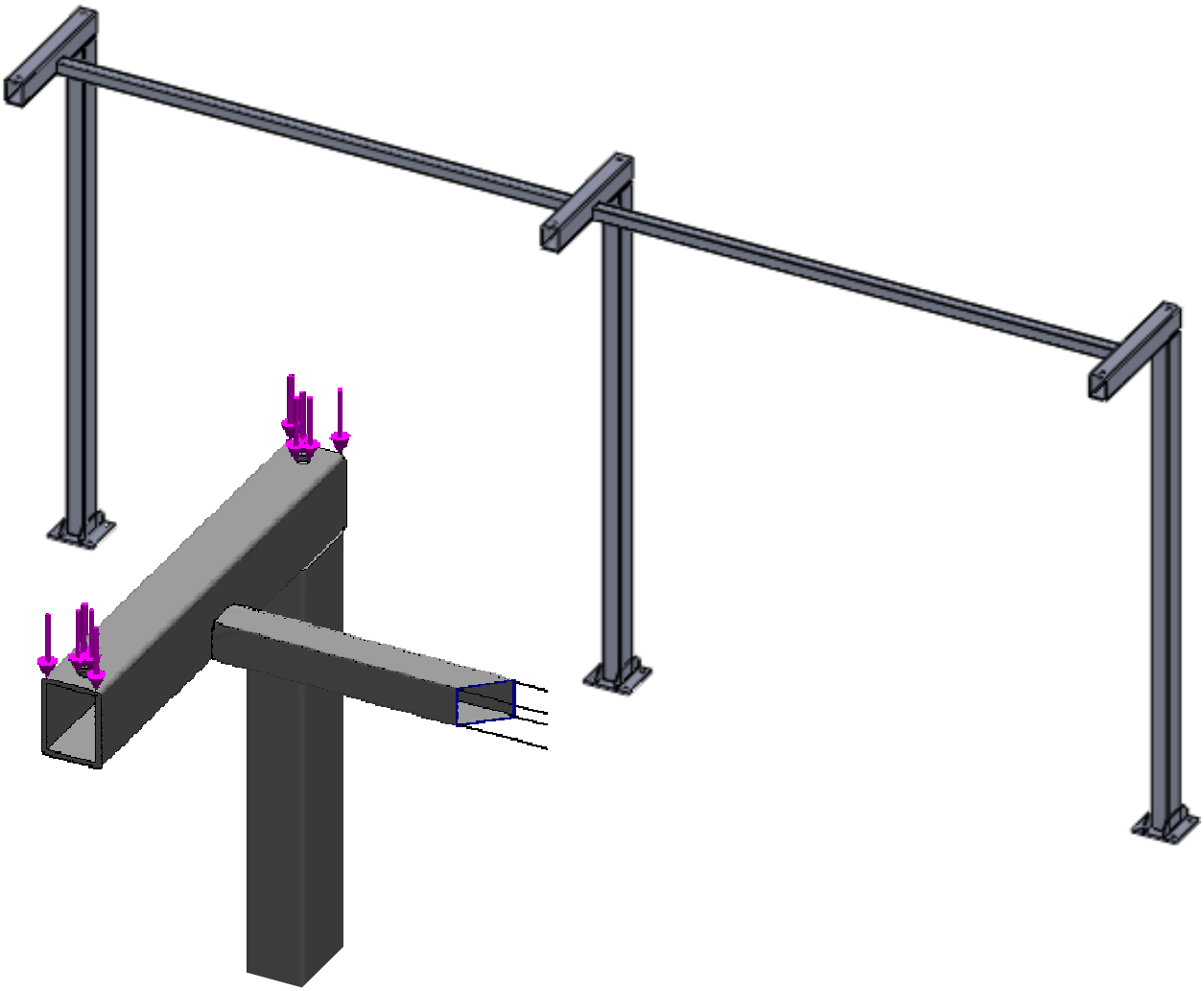
· Solución al problema de resonancia:

Observando las figuras anteriores, se aprecia que tanto la parte central de la viga como el extremo inferior del pilar no sufren desplazamientos.

En el tercer modo de resonancia a 24,992 Hz, la viga experimenta un giro alrededor de un imaginario eje central de dirección vertical, a su vez, este giro transmite al pilar un momento torsor. Para impedir dicho movimiento, se analizará la estructura completa colocando dos tirantes de sección cuadrada 40x40x2 milímetros, de longitudes diferentes, 1740 y 1780 milímetros.

Los tirantes estarán colocados en la parte central de la viga, a una distancia de 230 milímetros del extremo. Las caras inferiores de los tirantes irán enrasadas con las caras inferiores de las vigas con el fin de no servir de apoyo a las patas del aerogenerador, solamente actuando para evitar el problema de resonancia.

Se muestra la estructura completa y el detalle de unión de los tirantes.



Además del problema de resonancia, se ha analizado la estructura completa para los estudios estáticos y de pandeo con diferentes modos de carga.

Los resultados obtenidos han sido muy favorables. Todos los coeficientes de seguridad tanto a pandeo como estáticos han aumentado notablemente con los nuevos tirantes, a su vez, las tensiones máximas de Von Mises y los desplazamientos máximos han disminuido.

Como se puede comprobar en la tabla adjunta, el problema de resonancia a desaparecido ya que ninguno de los modos analizados está cercano a la velocidad de giro del ventilador.

ESTÁTICO CON CARGA DISTRIBUIDA		
Tensión máx. V.M. (MPa)	Desplazamiento máx. (mm)	Coeficiente de seguridad
30,1	1,29	10,69
ESTÁTICO CON CARGA EN EL EXTREMO		
Tensión máx. V.M. (MPa)	Desplazamiento máx. (mm)	Coeficiente de seguridad
73,4	3,75	4,39
PANDEO CON CARGA DISTRIBUIDA		
Factor de carga: 180,2		
PANDEO CON CARGA EN EL EXTREMO		
Factor de carga: 153,23		
ANÁLISIS DE FRECUENCIA		
Nº de Modo	Frecuencia (Hz)	Período (Segundos)
1	5,0821	0,1968
2	5,1253	0,1951
3	6,6666	0,1500
4	7,1348	0,1402
5	30,7240	0,0325

Tras la última modificación, al incorporar los dos tirantes, el peso total de la estructura será de 72,15 Kg. Sigue siendo la opción intermedia en peso debido a que es 30 Kg más liviana que la primera de ellas. Además, es la estructura con los resultados más favorables.

4.7. OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA.

Partiendo de la opción inicial segunda, es decir, perfiles de sección rectangular 60x40x2 milímetros se pretende optimizar la estructura por medio de un nuevo estudio llevado a cabo con el programa SolidWorks.

El objetivo del estudio irá destinado a minimizar la masa del conjunto formado por el pilar y la viga. Para ello, todas las dimensiones de la sección transversal de los perfiles (anchura, altura y espesor) quedan como variables de diseño, quedando fijas las longitudes de los perfiles. Utilizando los resultados calculados en el estudio analítico, se imponen conjuntamente dos restricciones, un desplazamiento máximo en el extremo de la viga de 5 milímetros y un valor máximo en las tensiones de Von Mises de 100 MPa al igual que en caso del cálculo analítico. Los resultados obtenidos son los siguientes:

SECCIÓN INICIAL (mm)		SECCIÓN FINAL (mm)	
Pilar	Viga	Pilar	Viga
60x40x2	60x40x2	82,01x42,47x2,03	62,82x41,36x2,35

SECCIÓN DE PERFIL COMERCIAL (mm)	
Pilar	Viga
80x40x2,5	60x40x2,5

El programa devuelve la sección optimizada condicionado por las pautas anteriores. Posteriormente, habrá que seleccionar el perfil comercial más cercano con ayuda de un prontuario.

Para poder hacer una comparativa entre la estructura compuesta por perfiles 80x60x5 milímetros con sus respectivos tirantes y la obtenida a partir del análisis de optimización, se va a realizar una tabla con diferentes tipos de estudios y distintas opciones de carga al igual que la anterior.

Se adjunta la tabla con los perfiles comerciales utilizados en las distintas combinaciones de la estructura tipo 2.

Sección del perfil	Masa por unidad de longitud (Kg/m)
60x40x2	2,93
80x60x5	9,70
40x40x2	2,31
80x40x2,5	4,39
60x40x2,5	3,60

Los resultados de los análisis de la estructura optimizada son:

ESTÁTICO CON CARGA DISTRIBUIDA		
Tensión máx. V.M. (MPa)	Desplazamiento máx. (mm)	Coeficiente de seguridad
70,8	4,21	4,79
ESTÁTICO CON CARGA EN EL EXTREMO		
Tensión máx. V.M. (MPa)	Desplazamiento máx. (mm)	Coeficiente de seguridad
150,9	9,39	2,26
PANDEO CON CARGA DISTRIBUIDA		
Factor de carga: 21,09		
PANDEO CON CARGA EN EL EXTREMO		
Factor de carga: 18,67		
ANÁLISIS DE FRECUENCIA		
Nº de Modo	Frecuencia (Hz)	Período (Segundos)
1	1,8936	0,5281
2	3,2748	0,3054
3	13,555	0,0737
4	23,944	0,0417
5	64,868	0,0154

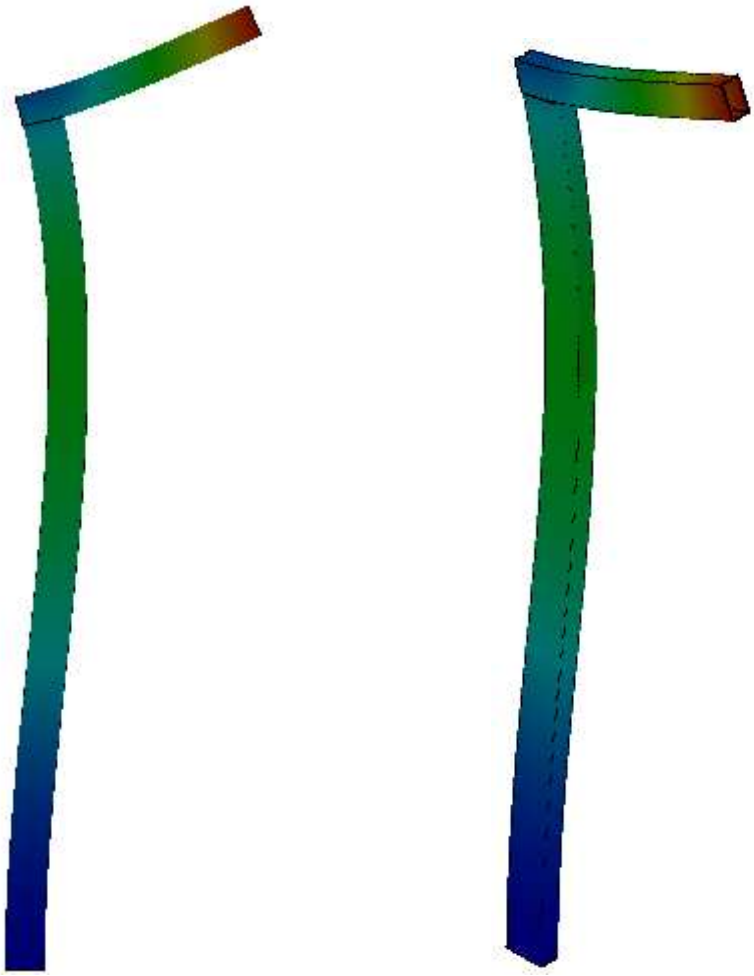
El objetivo final del presente estudio era optimizar la masa total de la estructura. El peso total de la estructura optimizada es de 27,79 Kg con una diferencia respecto de la anterior de 44,36 Kg, lo que supone una reducción del 38,52% en peso.

Dicha diferencia resulta muy interesante puesto que si analizamos la variación de peso respecto a la estructura de partida compuesta por perfiles rectangulares de 60x40x2mm, tan solo se ha incrementado el peso en 8,45 Kg situándola otra vez en la estructura más ligera.

Los resultados obtenidos tras la optimización son aceptables incluso para las condiciones más desfavorables de carga. Aunque el coeficiente de seguridad ha disminuido en un 45% para el análisis de pandeo con carga distribuida, sigue siendo mayor del establecido, por el contrario, el coeficiente de seguridad con carga en el extremo incumple el mínimo fijado, pero al ser mayor que la unidad, se considera apto ya que se trata de un caso extremo.

Los coeficientes de seguridad a pandeo para ambas hipótesis de carga, revelan que la estructura tendrá un buen comportamiento para las fuerzas de compresión a las que está solicitada.

En el análisis de frecuencia se aprecia un problema de resonancia según el modo cuarto obtenido en SolidWorks. En las siguientes figuras, se muestra el movimiento que sufrirá el conjunto formado por el pilar y la viga.



Observando las figuras anteriores, se aprecia que tanto el pilar como la viga se encuentran sometidos por un esfuerzo flector. Para paliar dicho efecto, se ha comprobado por medio de un nuevo estudio que el problema desaparece colocando un tirante de 500 milímetros de longitud de sección cuadrada 40x40x2mm desde el extremo de la viga hasta el pilar, con una inclinación de 40º.

Con ésta nueva composición mejoran notablemente los resultados obtenidos para la estructura optimizada con un peso total resultante de 26,25 Kg. Aun así sigue siendo la estructura más liviana.

Tras evaluar los resultados reflejados en el análisis de optimización, se concluye que el estudio resulta muy útil puesto que se ha obtenido una estructura muy ligera con un buen comportamiento para los análisis estáticos, análisis a pandeo y análisis de frecuencia ante distintas hipótesis de carga. A pesar de ello, se opta por la opción formada por perfiles rectangulares 80x60x5 milímetros con dos tirantes de sección cuadrada 40x40x2 milímetros.

La estructura obtenida con el análisis de optimización es descartada puesto que, para facilitar la construcción de la misma, se estima conveniente que todos los perfiles que la componen sean de la misma sección favoreciendo así tanto la compra y el transporte de la materia prima como su futura construcción.

Además, la estructura formada por perfiles rectangulares 80x60x5mm, tiene un comportamiento mucho mejor ante cualquier condición de carga para todos los análisis a los que ha sido sometida obteniendo los mayores coeficientes de seguridad.

En un principio se estudio la alternativa de trabajar con secciones variables compuestas por chapas soldadas. Se analizaron dos composiciones. La primera de ellas la formaban chapas de 10mm de espesor colocadas en forma de “T” pero rápidamente quedo descartada puesto que los taladros en los cuales irán alojados los silentblocks coincidían con el alma de la viga y en el caso de desplazarlos, la carga también estaría desplazada transmitiendo un momento torsor. La segunda opción compuesta por tres chapas del mismo espesor soldadas en forma de “U” solucionaba el problema de los taladros. Ambas opciones fueron descartadas por su elevado coste para la construcción, además los resultados obtenidos en los análisis reflejaban grandes desplazamientos con coeficientes de seguridad bajos.

5. SOLUCIÓN FINAL.

5.1. PLANOS.

Para el perfecto desarrollo del proyecto, se adjuntan los planos de montaje de la instalación así como el despiece de los elementos que componen la estructura.

El “Plano de montaje 01” incluye una lista completa de materiales detallando sus dimensiones, cantidad y tipo de material. Se compone de las tres vistas básicas, alzado, planta y perfil y de una vista extra en isométrica. Está provisto exclusivamente de las cotas necesarias para el montaje para servir de ayuda en un futuro montaje en obra.

En el plano “Despiece del pilar 02” quedan reflejadas todas las piezas necesarias para el montaje de la estructura siempre y cuando sea necesario algún tipo de operación además del tronzado, es decir, cuando posean taladros o cortes a inglete o elementos no comerciales. Para las piezas no representadas en el plano, se considera que al tratarse de perfiles comerciales, sus características quedan perfectamente definidas en la lista de materiales.

5.2. ESTIMACIÓN DE COSTES.

Para concluir el proyecto se hará una valoración del coste total que supone la instalación de la estructura, detallando por separado el coste del material, coste de horas de trabajo en taller y coste de horas de trabajo de montaje.

LISTA DE MATERIALES

Artículo	Cantidad	Cantidad mínima	Coste
Tubo rectangular 80x60x5	6,6 metros	12 metros	9,43 €/m
Tubo cuadrado 40x40x2	3,52 metros	6 metros	2,01 €/m
Chapa 150x150x8 mm	4,239 Kg	Precio por kilo	1,15 €/Kg
Chapa 150x50x5 mm	0,29 Kg	Precio por kilo	1,15 €/Kg
Pernos de expansión de cuña	12 unidades	1 unidad	0,4 €/unidad
		Total	**135,23 €**

HORAS DE TRABAJO EN TALLER

Operación	Duración
Corte de perfiles (Pilares, vigas y tirantes)	35 minutos
Marcado y taladrado de vigas	15 minutos
Unión por soldadura de pilares y vigas	30 minutos
Unión por soldadura de pilares con placa base-chapas refuerzo	80 minutos
Preparación de las superficies a pintar	25 minutos
Pintado de imprimación antioxidante de los componentes	45 minutos
Total	**3 h. 50 min.**

HORAS DE TRABAJO EN OBRA

Operación	Duración
Presentación y nivelación de la estructura	30 minutos
Anclaje de los pilares	50 minutos
Unión por soldadura de los tirantes	30 minutos
Repintado de las uniones soldadas en obra	10 minutos
Total	**2 h.**

RESUMEN

Horas totales empleadas	Precio hora		Total
5horas 50 minutos	25 €/h.		145,83 €
Material			135,23 €
		Total	**281,06 €**
		6% Gastos generales	16,86 €
		8% Beneficio	22,48 €
		18 % de IVA	50,59 €
		PRESUPUESTO TOTAL	**370,99 €**

El presupuesto total asciende a una cantidad de **TRESCIENTOS SETENTA EUROS CON NOVENTA Y NUEVE CÉNTIMOS** (370,99 €) I.V.A. incluido.

6. CONCLUSIONES.

La finalidad del proyecto era encontrar la solución optima de una estructura de anclaje para un aerogenerador cumpliendo como limitaciones principales el mínimo impacto visual, problemas de ubicación y un coste reducido.

La opción seleccionada cumple con los objetivos iniciales así como los establecidos para la propia estructura como pueden ser desplazamientos, tensiones máximas y coeficientes de seguridad entre otros.

El hecho de que los pilares y las vigas sean de la misma sección facilita al responsable de su ejecución la compra del material, el transporte, la manipulación en taller y en obra. Según se ha podido comprobar en los planos, las vigas disponen de dos taladros de diámetro 14 milímetros situados en la cara superior de la misma. Dichos taladros coinciden con las cotas de los apoyos del aerogenerador respetando una separación de 470 milímetros entre ellos, en los cuales irán alojados los correspondientes silentblocks para absorber las vibraciones producidas por los ventiladores.

A pesar de que la estructura obtenida por medio del análisis de optimización cumple con los objetivos mínimos establecidos, se descarta dicha alternativa debido a que al estar constituida por perfiles de diferentes secciones transversales, supone un aumento de las horas empleadas en su construcción y por tanto el coste final de la misma. A su vez, los resultados para los desplazamientos y coeficientes de seguridad son más desfavorables que los de la estructura final seleccionada.

Para terminar, mencionar que las guías elaboradas a partir de los análisis utilizados en los cálculos de las estructuras, servirán como apoyo docente para futuras consultas del procedimiento a seguir en los distintos módulos de análisis de SolidWorks, ayudando a la ejecución y valoración de resultados.

ANEXOS.

ANEXO 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS AEROGENERADORES

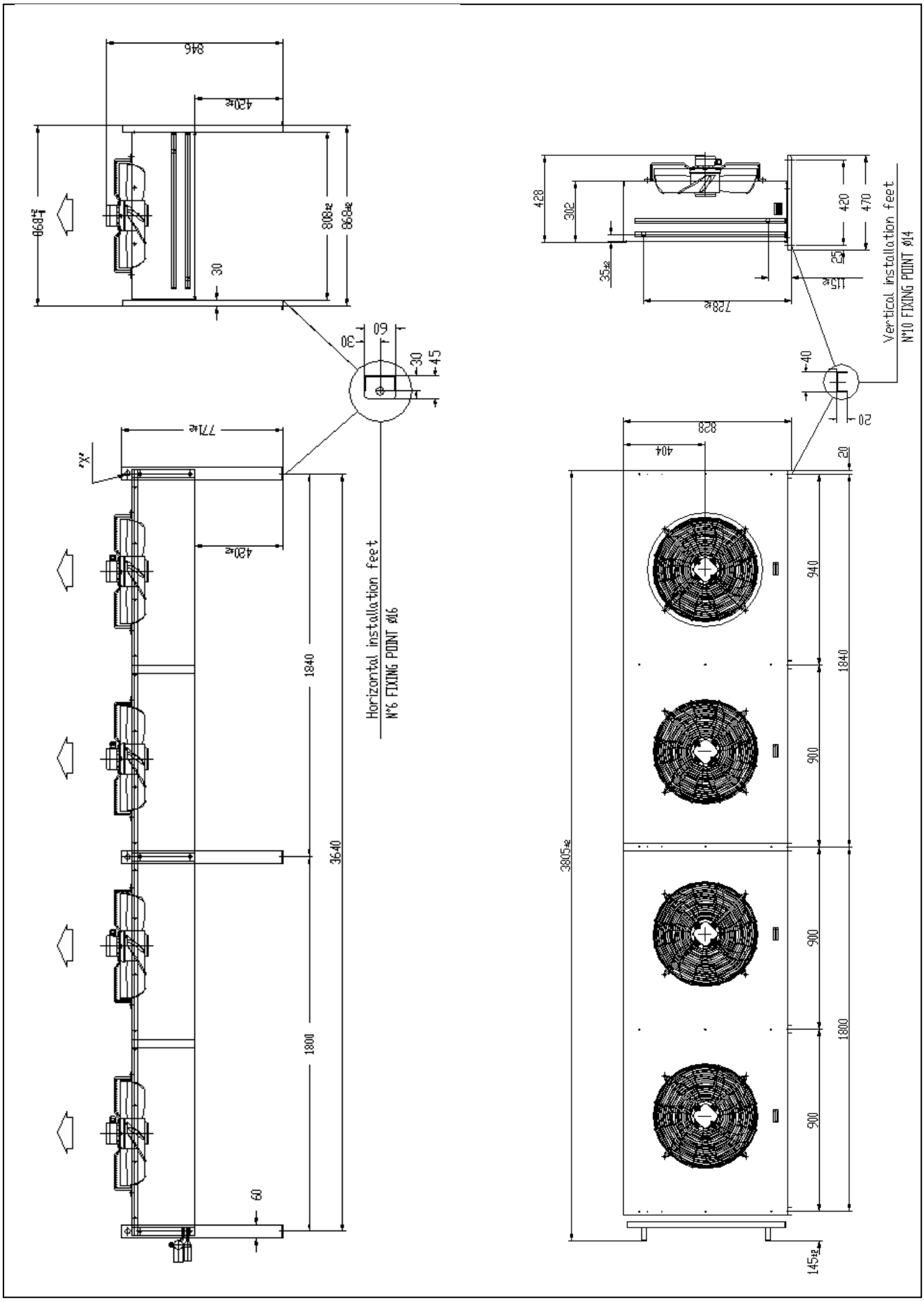
Enfriador de Liquido- 50 Hz

Fecha	03/05/2010
Cliente	CIRCE
Referencia	175 kW con aire a 30ºC

Modo de operación	**Glycol/Water**	**Tipo de equipo**	**Alfablue Junior**	**Modelo**	**DGS504BT**
Tipo de calculo	Design				
Capacidad requerida	175.00 kW				
		Altitud (a.s.l.)		0 m	
Dimensiones					
Longitud	3805 mm	Peso Estándar		234 kg	
Altura	828 mm				
Fondo	428 mm				
Packing	Crate	Shipping Volume		3.1 m³	
Datos térmicos					
Temperatura del aire	30.0 ℃				
Fluido	Prop.glycol 35.0 %	Fluid temperature in/out		65.0 ℃ / 50.0 ℃	
Caudal del fluido	10.7 m³/h	Fluid pressure drop		35.5 kPa	
Punto congelación	-17.3 ℃				
Datos ventilador					
Caudal de aire:	28660 m³/h	Número de ventiladores		4	
		Diámetro del ventilador		500.0 mm	
Velocidad de rotación	1390 rpm	Voltaje		400V	
Total Nominal Power	2880 W	Potencia instalada		3ph	
Corriente nominal total([2])	5.6 A	Connection		D	
Total FLC (-30℃)	6.8 A				
Sound Pressure Level (10.0 m) ([1])		49 dB(A)			
Sound Power Level		81 dB(A)			
Datos batería					
Material del tubo	Copper	Material aletas		Aluminium	
Separación de aletas	2.1 mm	Número de circuitos		30	
Superficie	168.7 m²	Volumen interno		24.7 litres	
Conexiones	2" - 2"	ConnectionSide		Same	
Bastidor y Carcasa					
Material de la carcasa	Galvanized steel				
Opciones					
Feet		No			
Amortiguadores		No			
Electrical					
Conexión	D				
Interruptor on/off	No	Caja de bornas		No	

Summary

Tipo	*Codigo*
Descripción 1	DGS504BD30 CR
Descripción 2	AL 2.1 CU


Horizontal installation feet
N°6 FIXING POINT ø16
Vertical installation feet
N°10 FIXING POINT ø14

Enfriador de Liquido- 50 Hz

Fecha	13/04/2010
Cliente	CIRCE
Referencia	165 kW con aire a 30ºC

Modo de operación	Glycol/Water	Tipo de equipo	Alfablue Junior	Modelo	DGS634C
Tipo de calculo	Design				
Capacidad requerida	165.00 kW				
		Altitud (a.s.l.)		0 m	

Dimensiones			
Longitud	4335 mm	Peso Estándar	351 kg
Altura	1034 mm		
Fondo	750 mm		
Packing	Crate	Shipping Volume	4.4 m³

Datos térmicos			
Temperatura del aire	30.0 ℃		
Fluido	Prop.glycol 35.0 %	Fluid temperature in/out	50.0 ℃ / 40.0 ℃
Caudal del fluido	15.1 m³/h	Fluid pressure drop	28.7 kPa
Punto congelación	-17.3 ℃		

Datos ventilador			
Caudal de aire:	40820 m³/h	Número de ventiladores	4
		Diámetro del ventilador	630.0 mm
Velocidad de rotación	1330 rpm	Voltaje	400V
Total Nominal Power	5000 W	Potencia instalada	3ph
Corriente nominal total([2])	9.9 A	Connection	D
Total FLC (-30℃)	11.9 A		
Sound Pressure Level (10.0 m) ([1])		52 dB(A)	
Sound Power Level		84 dB(A)	

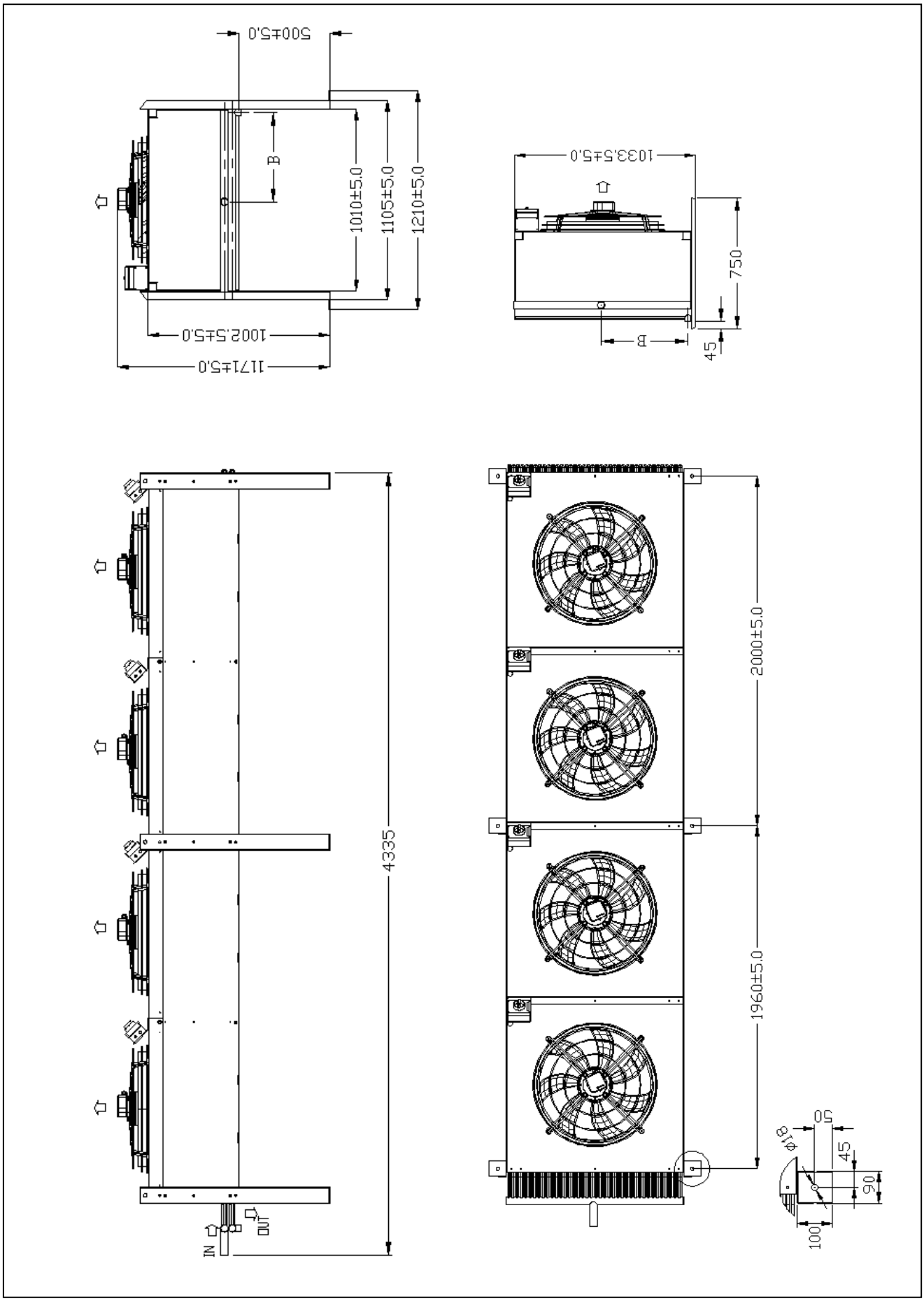
Datos batería			
Material del tubo	Copper	Material aletas	Aluminium
Separación de aletas	2.1 mm	Número de circuitos	52
Superficie	312.3 m²	Volumen interno	45.7 litres
Conexiones	2"1/2 - 2"1/2	ConnectionSide	Same

Bastidor y Carcasa	
Material de la carcasa	Galvanized steel

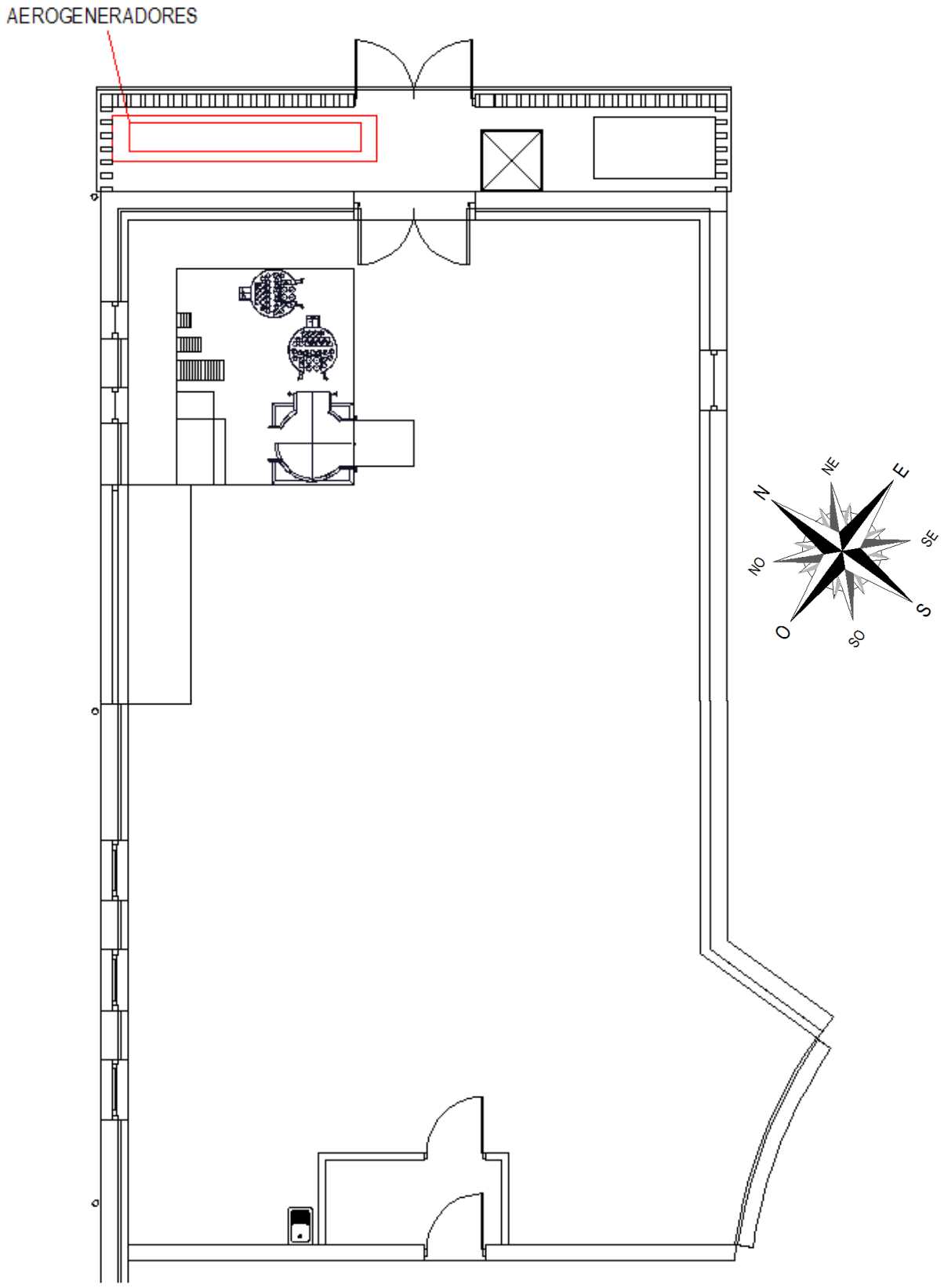
Opciones	
Feet	No
Amortiguadores	No

Electrical			
Conexión	D		
Interruptor on/off	No	Caja de bornas	No

Summary			
Tipo		*Codigo*	
Descripción 1		DGS634CD52 CR	
Descripción 2		AL 2.1 CU	
Program version	5.34	Data update	2010-02-02


500±5,0
B
1010±5,0
1105±5,0
1210±5,0
1002,5±5,0
1171±5,0
1033,5±5,0
750
B
45
4335
IN
OUT
2000±5,0
1960±5,0
ø18
50
45
90
100

ANEXO 2. PLANOS Y DOCUMENTOS GRÁFICOS DE LA UBICACIÓN.



ANEXO 3. PERNOS DE ANCLAJE.

Sistemas de Anclajes Mecánicos GB®Ingefix

Pernos de Expansión de Cuña

Características

:: Cuña para expansión envolvente, de una sola pieza.

:: Extremo roscado biselado perimetralmente, para evitar dañar la rosca al ser golpeado durante su instalación, y facilitar el inicio del enroscado de la tuerca.

:: Estos anclajes tienen rosca en toda su extensión para mayor versatilidad de aplicaciones.

:: Instalación sencilla y rápida a través de la pieza a fijar.

Material

:: Acero al carbón :: Acero Inoxidable

Acabado

:: Los anclajes de acero al carbón tienen protección galvánica mediante electrozincado.

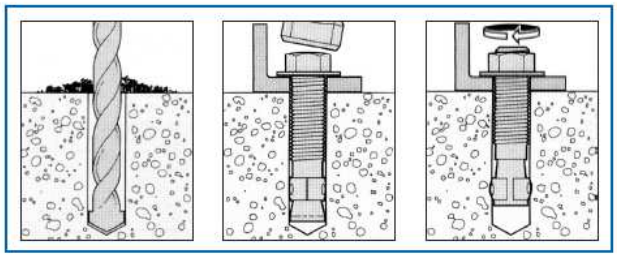
Instalación

:: El diámetro de los orificios en la placa base del elemento por anclarse debe medir 1,6 mm (1/16") más que el diámetro nominal de los respectivos pernos de anclaje de 1/4" a 5/8"; y 3,2 mm (1/8") más para todos los otros diámetros.

:: No usar llave de impacto para instalar el Anclaje de Cuña.

::**¡Atención!**: Las perforaciones en el material base sobredimensionadas en diámetro, dificultarán la instalación del anclaje y reducirán su capacidad de carga.

:: **Instalación**:
• Perforar en el material base con broca con punta de carburo de tungsteno del mismo diámetro que el diámetro nominal del anclaje a instalarlo a la profundidad de empotramiento especificada, más unos 12 mm, para dejar espacio para que el polvo que genere la instalación no impida alcanzar la profundidad buscada. Como alternativa, perforar a la profundidad especificada y limpiar la perforación soplándole aire comprimido. Las instalaciones sobre cabeza no requieren soplarse con aire comprimido.
• Ensamblar el anclaje con su tuerca y arandela de modo que la parte superior de la tuerca quede a ras con la parte superior del anclaje. Colocar el anclaje en el dispositivo por anclarse e introducirlo en el orificio del material base y ajustarlo hasta que la arandela y la tuerca queden a ras con la parte superior del dispositivo por anclarse.
• Ajustar el apriete hasta el torque de instalación requerido.



Programa de Productos

Perno Expansión de Cuña	
Código	**Descripción**
AMPECU025021400	PERNO EXP.1/4 x 2-1/4
AMPECU025031400	PERNO EXP. 1/4 x 3-1/4
AMPECU037030000	PERNO EXP. 3/8 x 3
AMPECU037033400	PERNO EXP. 3/8 x 3-3/4
AMPECU037050000	PERNO EXP. 3/8 x 5
AMPECU050023400	PERNO EXP. 1/2 x 2-3/4
AMPECU050033400	PERNO EXP. 1/2 x 3-3/4
AMPECU050041200	PERNO EXP. 1/2 x 4-1/2
AMPECU050051200	PERNO EXP. 1/2 x 5-1/2
AMPECU050070000	PERNO EXP. 1/2 x7
AMPECU062041200	PERNO EXP. 5/8 x 4-1/2
AMPECU062060000	PERNO EXP. 5/8 x 6
AMPECU062081200	PERNO EXP. 5/8 x 8-1/2
AMPECU075043400	PERNO EXP. 3/4 x 4-3/4
AMPECU075051200	PERNO EXP. 3/4 x 5-1/2
AMPECU075070000	PERNO EXP. 3/4 x 7
AMPECU075100000	PERNO EXP. 3/4 x 10
AMPECU100060000	PERNO EXP. 1 x 6
AMPECU100090000	PERNO EXP. 1 x 9
AMPECU100120000	PERNO EXP. 1 x 12
Perno Expansión de Cuña de Acero Inoxidable	
Código	**Descripción**
AMPESS025031400	PERNO EXP. SS304 1/4 x 3-1/4
AMPESS037033400	PERNO EXP. SS304 3/8 x 3-3/4
AMPESS037050000	PERNO EXP. SS304 3/8 x 5
AMPESS050041200	PERNO EXP. SS304 1/2 X 4-1/2
AMPESS050051200	PERNO EXP. SS304 1/2 x 5 1/2
AMPESS062041200	PERNO EXP. SS304 5/8 x 4-1/2

Sistemas de Anclajes Mecánicos GB®Ingefix

Tabla de Especificaciones

Perno de Expansión de Cuña

Marcas de identificación de la longitud en la cabeza de los Pernos Expansión de Cuña **GB®Ingefix**

Marca	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Desde	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	5 1/2	6	6 1/2	7	7 1/2	8	8 1/2	9	9 1/2	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Hasta pero sin incluir	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	5 1/2	6	6 1/2	7	7 1/2	8	8 1/2	9	9 1/2	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Especificaciones

			Cargas Últimas de Tracción y Corte en Hormigón Normal					
			f´c= H 14		f´c= H 28		f´c= H 42	
Diámetro de Anclaje Plg	Torque Instalación Lbs*Pie (Nm)	Profundidad Empotramiento Plg (mm)	Tracción en Kg	Corte en Kg	Tracción en Kg	Corte en Kg	Tracción en Kg	Corte en Kg
1/4	8 (10.8)	1-1/8 (28.6)	508	603	767	603	819	603
		1-15/16 (49.2)	905	724	1.422	724	1.422	724
		2-1/8 (54.0)	974	724	1.422	724	1.422	724
3/8	25 (33.9)	1-1/2 (38.1)	724	1.000	965	1.129	1.224	1.362
		3 (76.2)	1.500	1.724	2.560	1.784	2.637	1.939
		4 (101.6)	2.068	1.724	2.560	1.784	2.637	1.939
1/2	55 (74.6)	2-1/4 (57.2)	2.008	2.051	2.198	2.051	3.034	3.034
		4-1/8 (104.8)	2.008	3.120	4.154	3.120	4.662	3.516
		6 (152.4)	2.301	3.120	4.154	3.120	4.662	3.516
5/8	90 (122.0)	2-3/4 (69.9)	2.835	3.068	3.094	3.068	4.188	4.144
		5-1/8 (130.2)	2.835	4.137	6.429	5.128	7.058	5.395
		7-1/2 (190.5)	3.042	4.137	6.472	5.128	7.058	5.395
3/4	175 (237.3)	3-1/4 (82.6)	3.068	4.361	4.671	5.912	5.731	6.886
		6-5/8 (168.3)	4.731	8.756	7.627	10.230	8.730	10.230
		10 (254.0)	4.731	8.756	7.705	10.230	10.161	10.230
7/8	250 (339.0)	3-3/4 (95.3)	4.102	5.671	6.352	7.145	7.507	8.256
		6-1/4 (158.8)	6.317	8.997	9.023	12.410	10.497	12.410
		8 (203.2)	6.317	8.997	9.023	12.410	10.497	12.410
1	300 (406.7)	4-1/2 (114.3)	6.007	6.929	8.696	9.833	9.127	10.549
		7-3/8 (187.3)	6.291	12.359	10.333	16.349	14.332	16.409
		9-1/2 (241.3)	**8.058**	**12.359**	**11.436**	**16.349**	**14.332**	**16.409**

Para Cargas Recomendables de Trabajo se sugiere aplicar un Factor de Seguridad de 4. Por tanto, dividir la Carga Última por 4.

- *ESTUDIO ESTÁTICO.*

Suposición estática. Todas las cargas se aplican lenta y gradualmente hasta que alcanzan sus magnitudes completas. A continuación, las cargas permanecen constantes (sin variación en el tiempo). Esta suposición nos permite ignorar las fuerzas inerciales y de amortiguación debido a pequeñas aceleraciones y velocidades poco significativas.

Los estudios estáticos calculan desplazamientos, fuerzas de reacción, deformaciones unitarias, tensiones y la distribución del factor de seguridad.

Los estudios estáticos pueden ayudar a evitar fallos ocasionados por altas tensiones. Un factor de seguridad menor que la unidad indica una falla del material, por el contrario, factores de seguridad elevados en una región contigua, indican tensiones bajas y la posibilidad de eliminar algún material de esta región.

La secuencia de operaciones, como en todos los tipos de análisis será:

· Seleccionar el tipo de estudio.
· Asignar el material.
· Seleccionar las sujeciones.
· Aplicar las cargas externas .
· Crear las conexiones entre las piezas que componen el conjunto.
· Ejecutar el estudio.

Una vez ejecutado, el programa muestra en la carpeta de resultados del *"Gestor de diseño del FeatureManager"* las tensiones, desplazamientos y deformaciones unitarias.

Para conocer el coeficiente de seguridad, se hará "clic" con el botón derecho del ratón en la carpeta de resultados seleccionando *"Definir trazado de factor de seguridad"*. Se puede elegir entre cuatro hipótesis de tensiones: Von Mises máx., Cortadura máx., Mohr-Coulomb y normal máx.

En todos los casos, tensiones, desplazamientos, deformaciones, y factor de seguridad, se pueden editar tanto unidades como componentes, haciendo "clic" con el botón derecho del ratón en el resultado deseado.

- *ESTUDIO DE PANDEO.*

El pandeo es un desplazamiento amplio y repentino ocasionado por cargas axiales. Las estructuras delgadas sujetas a cargas axiales pueden fallar debido al pandeo en niveles de carga menores que los requeridos para causar un fallo del material. Existen diversas modalidades de pandeo ocasionadas por diferentes niveles de carga. En muchos casos, sólo la carga de pandeo más baja resulta de interés.

SolidWorks Simulation ayuda a evitar los errores de pandeo calculando las cargas mínimas que lo causan.

El estudio a pandeo se ejecuta al igual que para el estático con la única diferencia de los resultados obtenidos. En éste caso, en la carpeta resultados solamente aparecen los desplazamientos resultantes para el factor de carga mínimo. Dichos desplazamientos resultantes *"URES"* no son de interés, lo trascendental del estudio es el *"Factor de carga"* o coeficiente de seguridad

El factor de carga crítica de pandeo (BLF, por su sigla en inglés) es el factor de seguridad contra el pandeo o la relación de las cargas de pandeo con respecto a las cargas aplicadas. La siguiente tabla ilustra la interpretación de los valores BLF posibles:

Valor BLF (factor de seguridad)	**Estado del pandeo**	**Notas**
1 < BLF	Pandeo no previsto	Las cargas aplicadas son menos que las cargas críticas calculadas. No se espera el pandeo.
0 < BLF < 1	Pandeo previsto	Las cargas aplicadas superan las cargas críticas calculadas. Se espera el pandeo.
BLF = 1	Pandeo previsto	Las cargas aplicadas son exactamente iguales a las cargas críticas calculadas. Se espera el pandeo.
BLF = -1	Pandeo no previsto	El pandeo se produce cuando se deshacen todas las direcciones de las cargas aplicadas. Por ejemplo, si una barra se encuentra bajo el efecto de una carga de tracción, el BLF debe ser negativo. La barra no se pandeará.
-1 < BLF < 0	Pandeo no previsto	Se predice el pandeo si se invierten todas las cargas.
BLF < -1	Pandeo no previsto	No se predice el pandeo aún si se revierten todas las cargas.

- *ESTUDIO DE FRECUENCIA.*

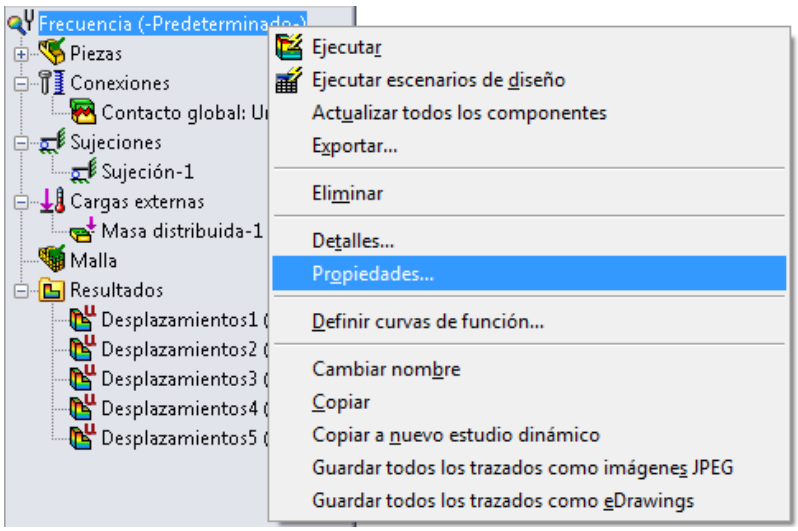
Un sólido alterado de su posición de descanso tiende a vibrar con ciertas frecuencias denominadas naturales o resonantes. La frecuencia natural más baja se denomina frecuencia fundamental. Para cada frecuencia natural, el sólido adquiere una determinada forma denominada forma modal. El análisis de frecuencia calcula las frecuencias naturales y las formas modales asociadas.

Cuando una estructura es excitada adecuadamente por una carga dinámica con una frecuencia que coincide con una de sus frecuencias naturales, la estructura sufre grandes desplazamientos y tensiones. Este fenómeno se denomina resonancia. Por ejemplo, un automóvil con una rueda mal alineada tiembla violentamente cuando alcanza una determinada velocidad a causa de la resonancia. El temblor, en cambio, disminuye o desaparece a otras velocidades.

El análisis de frecuencia contribuye a evitar fallos por tensiones excesivas causadas por la resonancia. También proporciona información sobre cómo solucionar problemas relacionados con la respuesta dinámica.

Para ejecutar el análisis se procederá al igual que en los casos anteriores, con la salvedad de que, en lugar de colocarse una fuerza externa, se aplicará una masa distribuida puesto que las cargas afectan a las características de modalidad de un sólido. Por ejemplo, las cargas compresivas disminuyen las frecuencias de resonancia y las cargas de tracción las aumentan. En muchos casos el peso propio de la estructura puede omitirse, ya que las desviaciones inducidas son pequeñas.

Pinchando con el botón derecho del ratón tal y como muestra la figura, dentro propiedades se pueden calcular las frecuencias más cercanas a un valor que sea de interés: (desviación de frecuencia).



Dentro de la carpeta *"Resultados"* se observan las frecuencias resonantes, tantas como se haya seleccionado en la pestaña de propiedades, teniendo la opción de animar cada modo de desplazamiento, comprobando así los efectos de las diferentes frecuencias.

- *ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN.*

Los estudios de optimización automatizan la búsqueda del diseño óptimo sobre la base de un modelo geométrico. El software está equipado con una tecnología que permite detectar rápidamente tendencias e identificar la solución óptima utilizando el número mínimo de ejecuciones. Los estudios de optimización requieren la definición de los siguientes puntos:

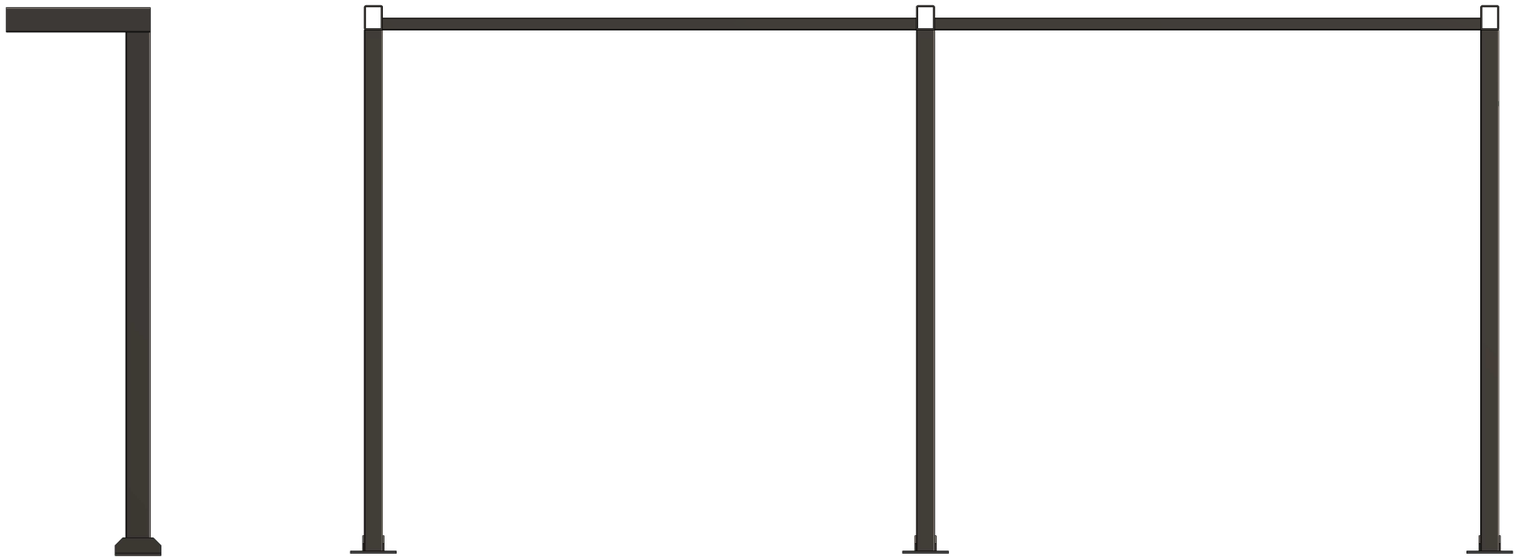
- **Objetivo**. Defina el objetivo del estudio. Por ejemplo, minimizar la masa.
- **Variables de diseño o restricciones geométricas**. Seleccione las cotas que pueden cambiar y establezca sus intervalos.
- **Restricciones de comportamiento**. Establezca las condiciones que debe cumplir el diseño óptimo. Por ejemplo, puede establecer que el componente no exceda un cierto valor de tensión o que el desplazamiento máximo se encuentre dentro de un intervalo dado.

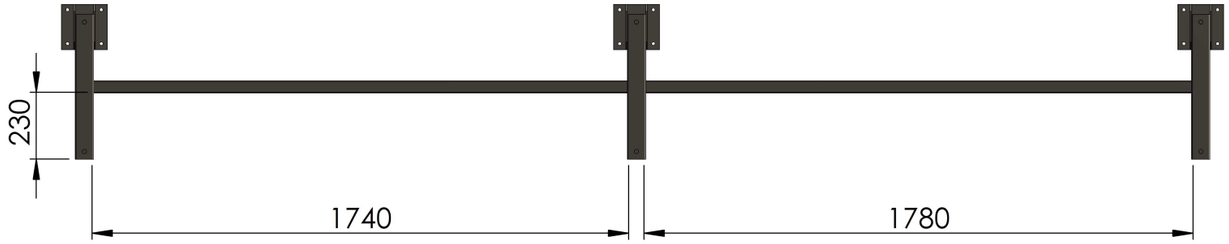
Para realizar un estudio de optimización, es necesario haber ejecutado previamente algún otro estudio como puede ser estático, de pandeo o de frecuencia. De lo contrario, el programa no podrá agregar restricciones de comportamiento.

Una limitación importante del estudio de optimización es que, para poder seleccionar las restricciones geométricas, el diseño inicial debe constituirse de un único componente. No cabe la posibilidad de utilizarlo en elementos formados por diferentes piezas ensambladas en un conjunto. Dicha característica del estudio supone un gran inconveniente para ensamblajes complejos.

Tras ejecutar el software, en la carpeta de resultados aparece el diseño inicial y el diseño final calculado por el programa teniendo en cuenta las restricciones impuestas al inicio del estudio.

Si se está trabajando con perfiles comerciales, como en el caso de éste proyecto, habrá que aproximar la solución final ofrecida por el programa a los perfiles comerciales existentes en el mercado.

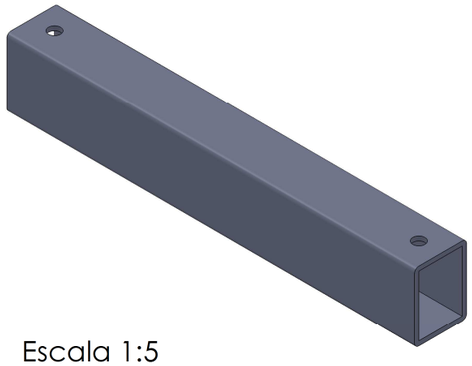




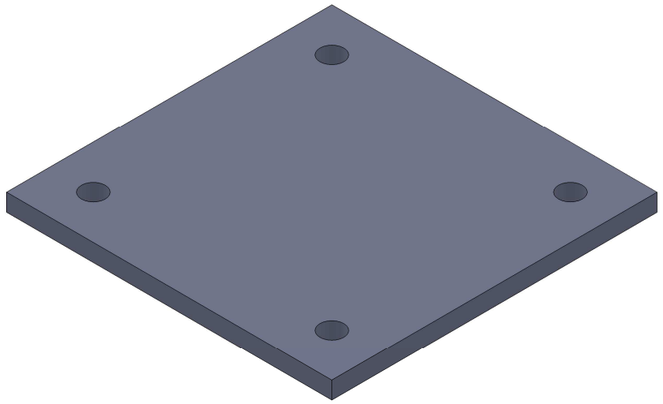
Designación	Cantidad	Material
Tubo estructural 80x60x5x1700	3	AISI 1020
Tubo estructural 80x60x5x500	3	AISI 1020
Tubo estructural 40x40x2x1780	1	AISI 1020
Tubo estructural 40x40x2x1740	1	AISI 1020
Placa base 150x150x8	3	S355JR
Chapa refuerzo 150x50x5	6	S355JR

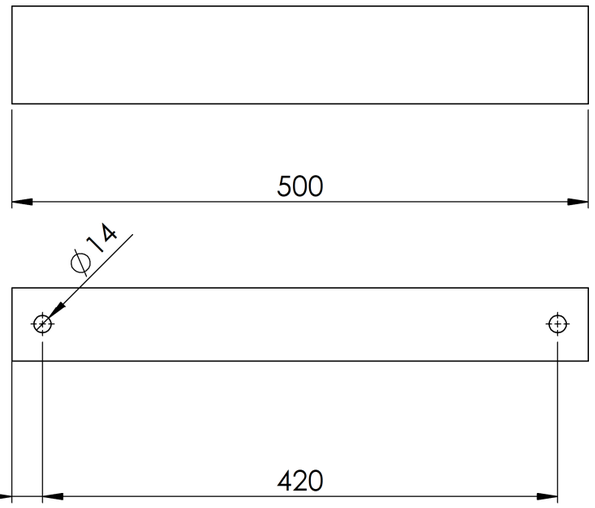
Dibujado	Alberto Marín Atienza	Firma:	
Revisado	Paula Canalís Martínez		
Fecha	18 de Agosto de 2010		
Escala: 1:20	Título: PLANO DE MONTAJE		N° Plano: 01

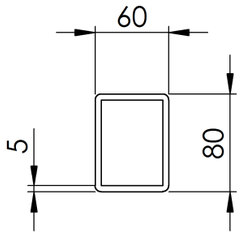
Licencia educacional de SolidWorks
Sólo para uso académico

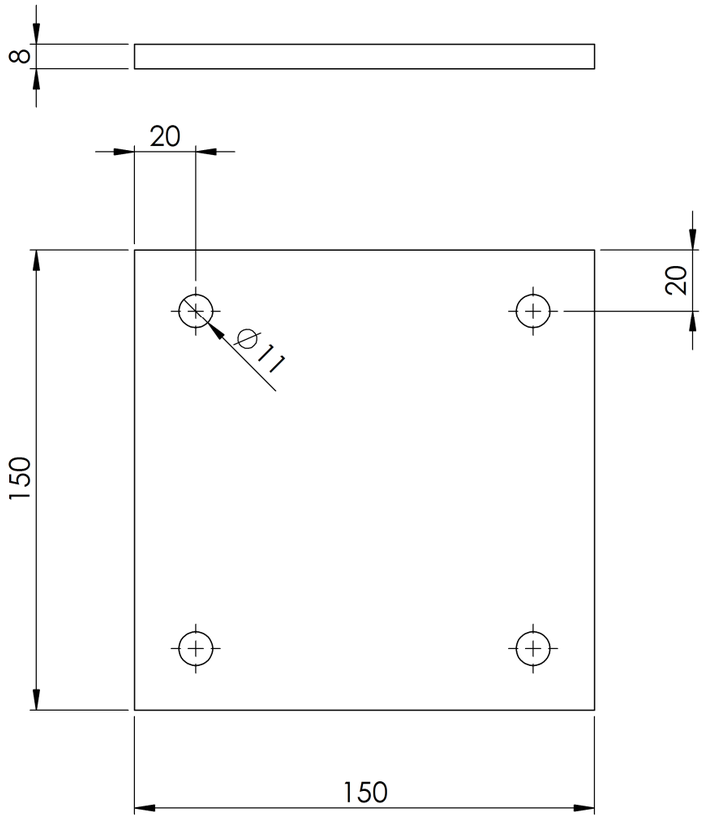


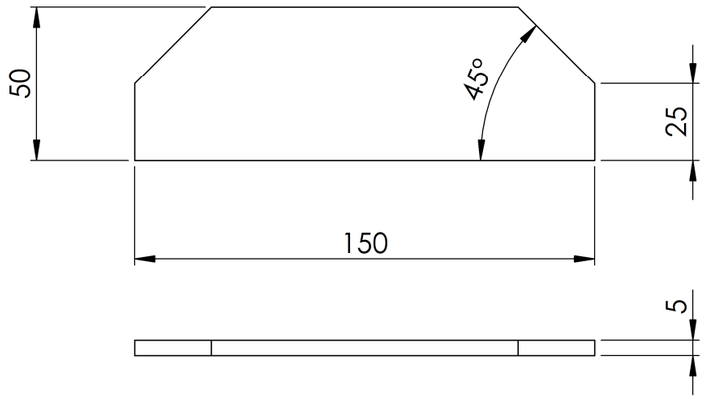
Escala 1:5

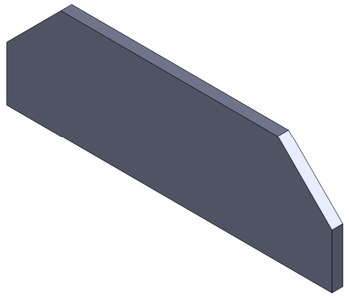












NOTA: Queda excluida la representación para el despiece del pilar los perfiles comerciales con corte recto.

Designación	Cantidad	Material
Tubo estructural 80x60x5x500	3	AISI 1020
Placa base 150x150x8	3	S355JR
Chapa refuerzo 150x50x5	6	S355JR

Dibujado	Alberto Marín Atienza	Firma:	
Revisado	Paula Canalís Martínez		
Fecha	19 de Agosto de 2010		
Escala: 1:2 1:5	Título: DESPIECE DEL PILAR		N° Plano: 02

Licencia educacional de SolidWorks
Sólo para uso académico