



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**MODELADO
TRIDIMENSIONAL,
DOCUMENTACIÓN
GEOMÉTRICA,
RECREACIÓN VIRTUAL Y
ANÁLISIS ESTÁTICO DEL
TELÉGRAFO ÓPTICO DE
AGUSTÍN DE
BETANCOURT Y MOLINA**

Alumno: Pedro Jesús Pancorbo Rico

Tutor: Prof. Dr. D. José Ignacio Rojas Sola
Dpto.: Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos

Mayo, 2019



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos

Don JOSÉ IGNACIO ROJAS SOLA, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado: MODELADO TRIDIMENSIONAL, DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA, RECREACIÓN VIRTUAL Y ANÁLISIS ESTÁTICO DEL TELÉGRAFO ÓPTICO DE AGUSTÍN DE BETANCOURT Y MOLINA, que presenta PEDRO JESÚS PANCORBO RICO, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, MAYO de 2019

El alumno:

El tutor:

PEDRO JESÚS PANCORBO RICO

JOSÉ IGNACIO ROJAS SOLA

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.	BREVE RESEÑA PERSONAL.....	3
1.2.	ENTORNO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.3.	OBJETIVOS	4
2.	APROXIMACIÓN HISTÓRICA AL TELÉGRAFO ÓPTICO DE AGUSTÍN DE BETANCOURT Y MOLINA.....	5
2.1.	FUNCIONAMIENTO DEL TELÉGRAFO ÓPTICO DE BETANCOURT Y COMPARACIÓN CON EL MODELO DE CHAPPE.....	7
3.	MATERIAL Y MÉTODOS	10
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1.	MODELADO TRIDIMENSIONAL Y DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA	20
4.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO.....	34
4.2.1.	Simulación 1 (Acción de la gravedad y momento).....	43
4.2.1.1.	Tensiones de Von Mises	43
4.2.1.2.	Desplazamientos	44
4.2.1.3.	Deformaciones equivalentes.....	45
4.2.1.4.	Coeficiente de seguridad	46
4.2.2.	Simulación 2 (Acción de la gravedad, momento y presión del viento).....	46
4.2.2.1.	Tensiones de Von Mises	48
4.2.2.2.	Desplazamientos	49
4.2.2.3.	Deformaciones equivalentes.....	49
4.2.2.4.	Coeficiente de seguridad	50
4.3.	RECREACIÓN VIRTUAL.....	51
5.	CONCLUSIONES.....	55
6.	BIBLIOGRAFÍA	57
7.	ANEXO: PLANOS	58

1. INTRODUCCIÓN

1.1. BREVE RESEÑA PERSONAL

Agustín de Betancourt y Molina nació en el Puerto de la Cruz (Tenerife) el 1 de febrero de 1758 y murió en San Petersburgo el 14 de julio de 1824 [1]. Fue un prestigioso ingeniero civil y, entre otros cargos, el fundador y promotor de la Escuela de Caminos y Canales en España, la cual fue creada en 1802. El modelo que siguió fue el de la prestigiosa “École nationale des ponts et chaussées” de París donde Betancourt se trasladó en 1784 para seguir con sus estudios [2,3].

A lo largo de su vida realizó diversos estudios sobre todo tipo de procesos y máquinas: desde un estudio sobre “la purificación del carbón de piedra, y modo de aprovechar las materias que contiene”, hasta el perfeccionamiento de “la máquina de vapor de doble efecto” de Watt. Además, en su última época como Inspector del Instituto del Cuerpo de Ingenieros en Rusia, dirigió numerosas obras publicas como el puente sobre el Málaya Nevka o la fábrica de cañones de Kazán [3].

Entre algunas de sus invenciones, estudios y máquinas se encuentran:

- Un estudio sobre la destilación del carbón mineral.
- La máquina para hacer trencilla.
- La máquina para cortar la hierba de los canales navegables.
- La máquina para hacer clavos.
- La máquina de vapor de doble efecto.
- La esclusa de émbolo buzo.
- El telégrafo óptico.
- Un ensayo sobre la composición de máquinas.

Será el telégrafo óptico la invención en la que se centrará el estudio del Trabajo Fin de Grado (TFG). El telégrafo óptico consiste en un aparato utilizado para emitir señales visuales a distancia. La primera torre donde se encuentra el primer telégrafo emite la señal, y ésta será recibida por otra torre similar, y así sucesivamente hasta llegar al destino deseado, por lo que la distancia a la que es capaz de emitir una señal

estará determinada por el número de torres que haya. Así pues, un operario maneja unos controles de un mecanismo mediante los cuales modifica la posición de los elementos del telégrafo, de manera que cada una de estas posiciones transmitidas representa un mensaje que quiere ser transmitido visualmente al siguiente telégrafo [\[3\]](#).

1.2. ENTORNO DE LA INVESTIGACIÓN

Este TFG se ha desarrollado en el seno del Proyecto de Investigación de Excelencia financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) dentro del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación del Conocimiento, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), concedido a la Universidad de Jaén titulado “El patrimonio histórico de Agustín de Betancourt: estudio integral de las aportaciones a la ingeniería civil desde la ingeniería gráfica para su puesta en valor y difusión”, y cuyo investigador principal es el Catedrático Prof. Dr. D. José Ignacio Rojas Sola. Asimismo, expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia por su amable disposición para la utilización del material ubicado en su web sobre Agustín de Betancourt [\[3\]](#).

1.3. OBJETIVOS

Los objetivos concretos perseguidos por el presente TFG son:

1. Manejo de bibliografía relacionada para obtener una aproximación histórica al telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina.
2. Modelización 3D a partir de la información recopilada con software de diseño asistido por ordenador y obtención de su documentación geométrica.
3. Realización de una recreación virtual con software de animación por ordenador.
4. Realización de un análisis estático mediante elementos finitos.

2. APROXIMACIÓN HISTÓRICA AL TELÉGRAFO ÓPTICO DE AGUSTÍN DE BETANCOURT Y MOLINA

La revolución industrial es uno de los acontecimientos emblemáticos que marcan el nacimiento de la Edad Contemporánea. En 1789 las ideas políticas de la Ilustración sentaron sus pilares, y como consecuencia la ciencia y los conocimientos técnicos dieron un paso adelante en la sociedad. En aquellas fechas nació la telecomunicación, con la invención del primer telégrafo del francés Claude Chappe, que contó con la ayuda del relojero suizo Abraham Louis Breguet [4].

El modelo de Chappe consistía en un mástil fijo que tenía en la parte superior dos piezas móviles: un travesaño (llamado regulador) accionado por una polea que tenía a su vez, en cada uno de sus extremos, sendos travesaños menores (llamados indicadores) movidos también por poleas independientes (Ilustración 1) [2].

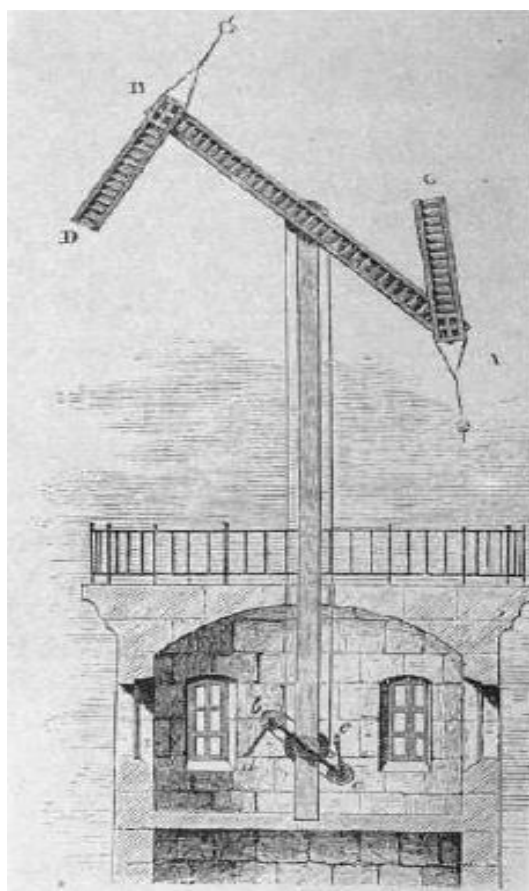


Ilustración 1. Telégrafo de Claude Chappe [2].

El 19 de julio de 1794 se transmite del primer telegrama de la historia desde Lille hasta París, a lo largo de 230 kilómetros de línea telegráfica y 22 torres, la última ubicada en la cúpula del Louvre. Así pues, el telégrafo óptico alcanzó su punto de mayor éxito en el periodo napoleónico ya que militarmente era una máquina muy funcional por su rápida transmisión de noticias. Por esto, entre 1805 y 1810 se crearon nuevas líneas telegráficas: París-Lyon-Turín-Milán, París-Brest y París-Calais-Boulogne [4].

Pronto los avances tecnológicos de Chappe son difundidos y numerosos países de Europa y Estados Unidos se esmeran en seguir los pasos de Francia; países como Reino Unido, España o Prusia realizarán entre ellos sus propios telégrafos intentando mejorar el ejemplo de Claude Chappe. Los británicos construyeron en 1794 varias líneas entre Londres y sus puertos principales con el telégrafo de George Murray (Ilustración 2). En 1800, Estados Unidos se une a esta técnica de transmisión de información creando una línea entre la ciudad de Boston y una isla próxima, con el objetivo de anunciar la llegada de los navíos [4].

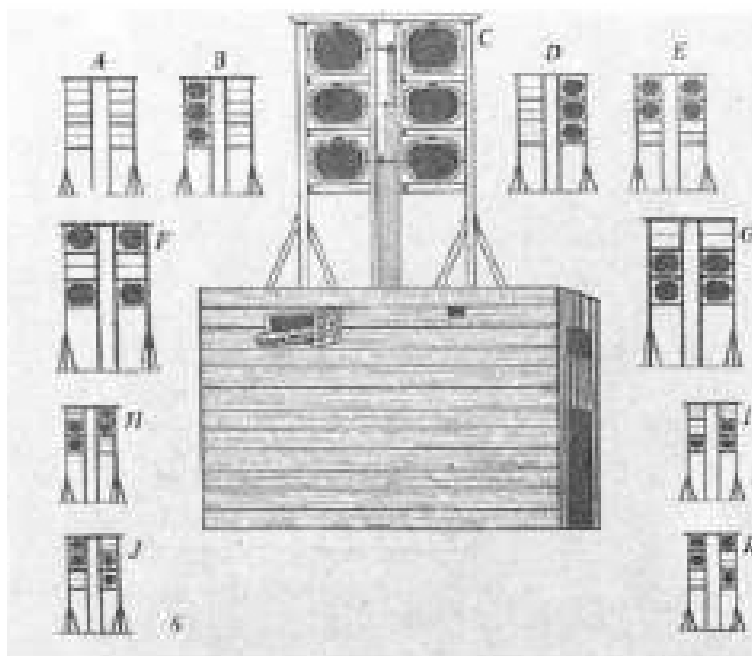


Ilustración 2. Telégrafo óptico de George Murray [2].

España no fue ajena a esta técnica de telecomunicaciones y fueron varias las iniciativas. De todas ellas sobresalió la propuesta del ingeniero Agustín de Betancourt y Molina, científico favorecido por el conde de Floridablanca, y gracias a él Betancourt

consiguió ser becado en París, donde conoció a Abraham Louis Breguet y, gracias a su ayuda, pudo analizar con detalle el telégrafo de Chappe. Betancourt también viajó a Londres donde profundizó en el modelo telegráfico de Murray entre 1793 y 1796. Estas estancias le permitieron desarrollar un modelo de telégrafo propio que mejoraba en ciertos aspectos al del propio Chappe. El 17 de febrero de 1799, Carlos IV aprobó un proyecto para la implantación del telégrafo óptico en España. En 1800 comenzó a funcionar la primera línea telegráfica en España que conectaba Madrid con Aranjuez. Sin embargo, la crisis económica por la que atravesaba el país no dejó prosperar el invento de Betancourt [4].

Ya en la década de 1840, José María Mathé consiguió que el telégrafo óptico despegara. Así pues, la primera línea entró en funcionamiento el 2 de octubre de 1846 creando una conexión con Francia. Sin embargo, la telegrafía óptica tenía los días contados debido a la rápida expansión del telégrafo eléctrico [4].

2.1. FUNCIONAMIENTO DEL TELÉGRAFO ÓPTICO DE BETANCOURT Y COMPARACIÓN CON EL MODELO DE CHAPPE

El telégrafo estaba compuesto por un mástil fijo y un travesaño orientador, llamado flecha, que giraba respecto a su centro de gravedad (Ilustración 3). Dicho telégrafo disponía de 36 posiciones dentro de un círculo, separadas entre sí sólo diez grados. Asignando 26 posiciones a las letras del alfabeto y diez a dígitos del 0 al 9. Estas letras y números se encontraban grabadas en la polea principal [3].

Para un buen funcionamiento de este sistema, cada estación disponía de 2 catalejos, mediante los cuales el telegrafista observaba la estación que le transmitía el mensaje y la estación a la que iba a mandar el mensaje. Su trabajo consistía en reproducir la posición del telégrafo del emisor en el suyo, y asegurarse de que el mensaje llegara al telégrafo receptor. El ocular de cada catalejo estaba provisto de un hilo meridiano, por lo que al girar la polea principal para mandar la señal de cualquier letra o número, también giraba el catalejo, y como consecuencia el hilo meridiano que se encontraba totalmente sincronizado con la flecha [3].



Ilustración 3. Telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina [5].

La Ilustración 4 muestra el funcionamiento del telégrafo óptico, aunque la explicación más detallada se encuentra en el epígrafe 4.1, donde se explica la función de cada componente del telégrafo, y en la parte final se realiza una explicación desde el punto de vista de la transmisión de la señal.

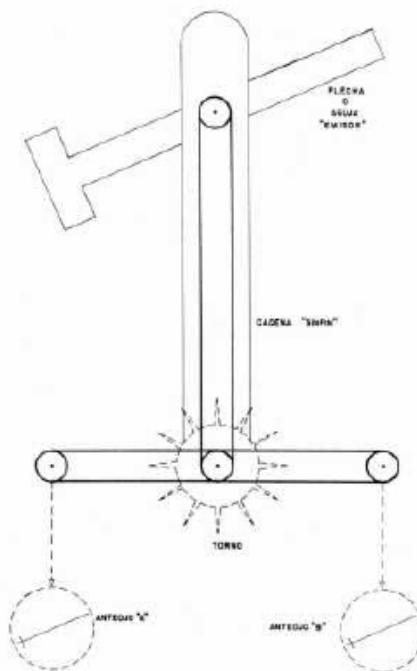


Ilustración 4. Esquema del funcionamiento del telégrafo óptico de Betancourt [2].

Si se compara el telégrafo de Betancourt con el de Chappe, claramente el modelo del español sale favorecido debido a las siguientes razones [3]:

- Transmisión más eficaz: mientras que el sistema de Betancourt se apoya en la comunicación del mensaje letra a letra (o dígito) (Ilustración 5), el invento de Chappe combinaba las posiciones entre el regulador y los indicadores, y tenía un código asociado a cada una de las combinaciones. Con este código se podía transmitir unas 8500 palabras. Para cada palabra el telegrafista debía hacer uso de 3 manivelas, por lo que en comparación con el modelo de Betancourt este telégrafo conllevaba una utilización mucho más compleja.

- Propiedades físicas: el modelo de Chappe estaba mal resuelto en cuanto a diseño, ya que su centro de gravedad no estaba fijado. Betancourt ideó un sistema más sencillo donde su parte móvil (flecha) si tenía un centro de gravedad fijo.

- Otras mejoras: Betancourt incluyó entre otras, un sistema de deflectores para dotar al telégrafo de más estabilidad, y hacerlo menos sensible al viento.

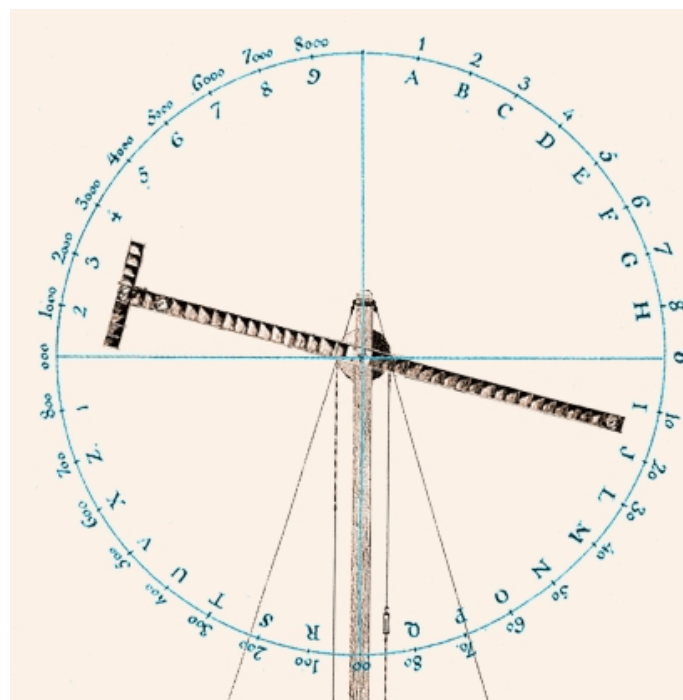


Ilustración 5. Señales posibles a transmitir por la flecha [3].

3. MATERIAL Y MÉTODOS

En este epígrafe se describe la metodología y herramientas utilizadas para la realización del TFG, desde la obtención de las medidas del telégrafo óptico hasta la ejecución de una recreación virtual de su funcionamiento.

En primer lugar, se ha utilizado un método directo con técnicas empíricas de medición sobre la planimetría (Ilustraciones 6 a 8) que se encuentran en el documento *Mémoire sur un nouveau télégraphe et quelques idées sur la langue télégraphique* [6] que se encuentra dibujado a escala. Mediante herramientas euclidianas (regla, escuadra y cartabón) se han extraído las medidas correspondientes para posteriormente aplicarle la escala correspondiente.

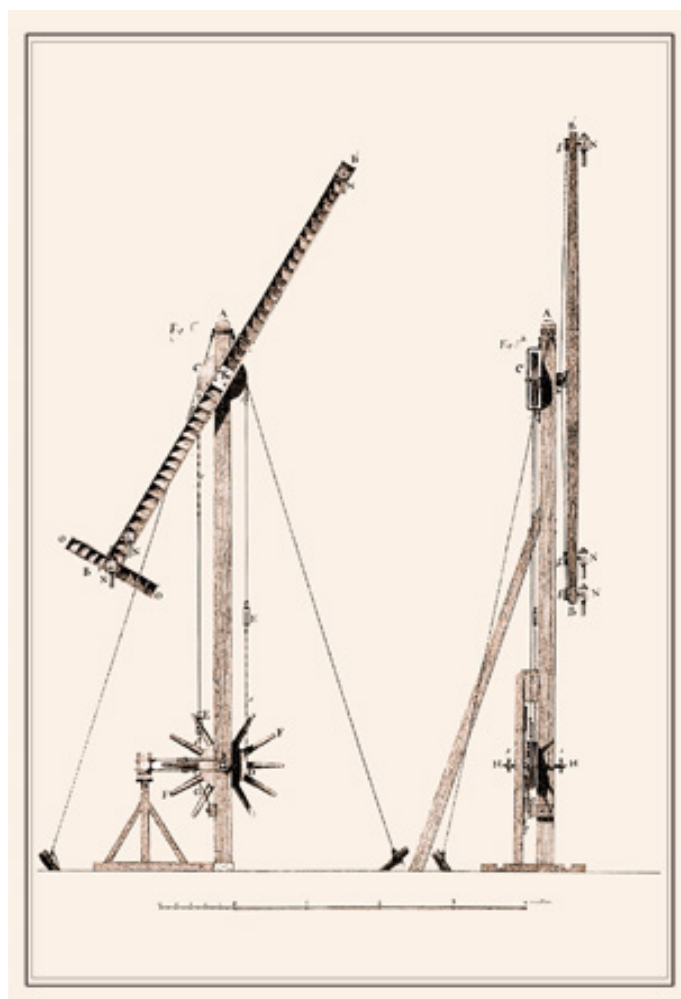


Ilustración 6. Plano 1 del telégrafo óptico de Betancourt [6].

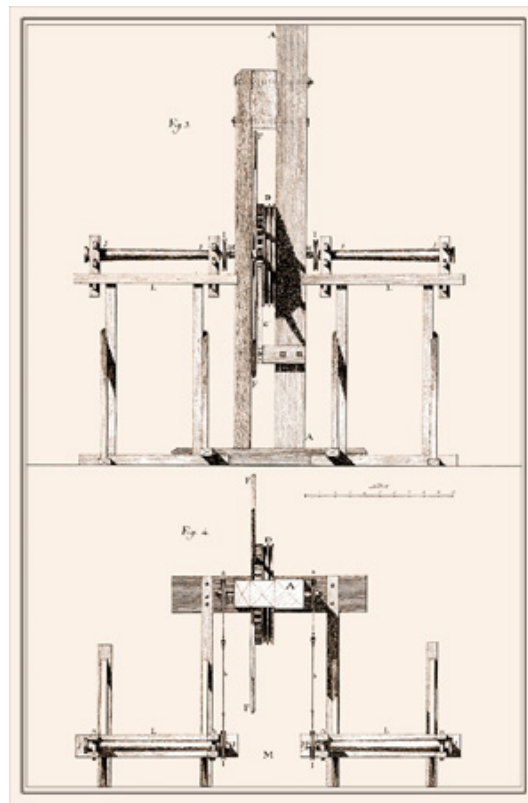


Ilustración 7. Plano 2 del telégrafo óptico de Betancourt [6].

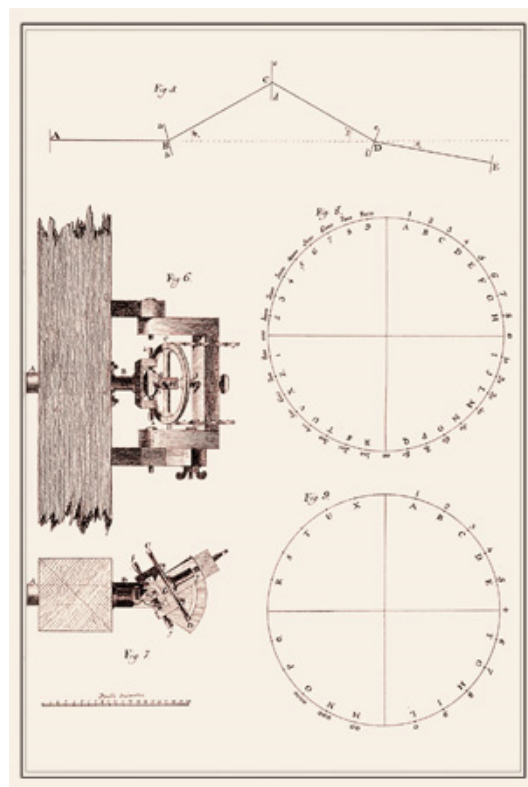


Ilustración 8. Plano 3 del telégrafo óptico de Betancourt [6].

El siguiente paso es realizar un modelado tridimensional que se apoye en las medidas tomadas anteriormente. La herramienta utilizada para el modelado CAD 3D es el programa de diseño asistido por ordenador Autodesk Inventor Professional 2016.

A continuación, se va a proceder a la descripción de la interfaz del entorno de trabajo (Ilustración 9), así como de algunos de los comandos más utilizados en el modelado tridimensional del telégrafo óptico.

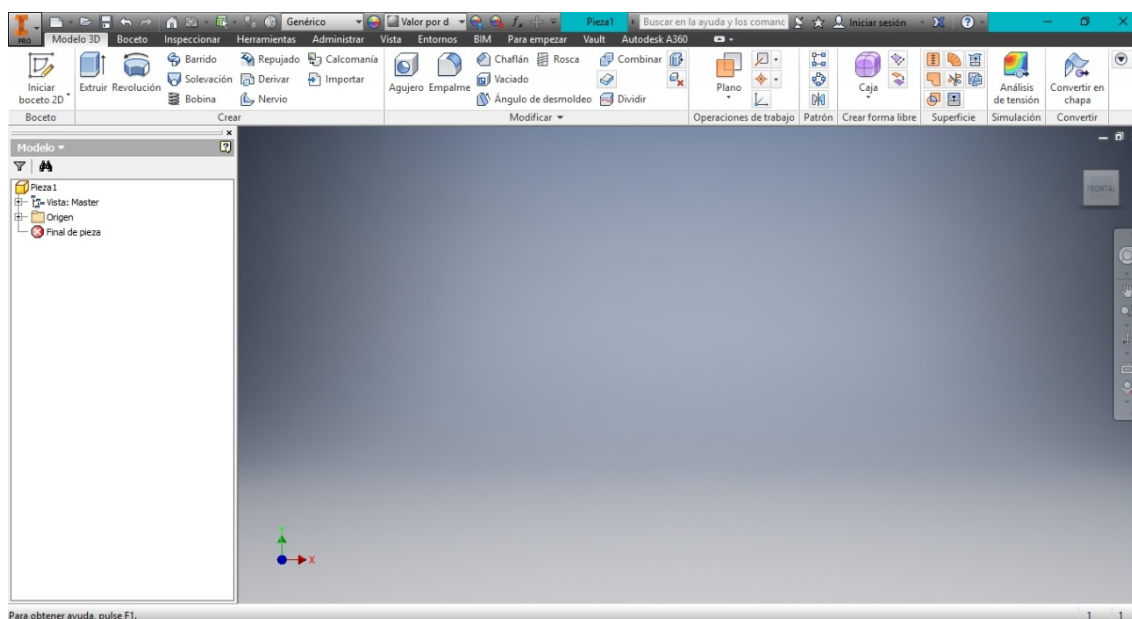


Ilustración 9. Interfaz del entorno de trabajo de Autodesk Inventor Professional.

Algunos de los comandos más utilizados se aprecian en la Ilustración 10, y la explicación de su significado en la Tabla 1.



Ilustración 10. Comandos más utilizados en el modelado 3D.

 Iniciar boceto 2D	Se basa en realizar un boceto en cualquier plano o cara de cualquier pieza, que posteriormente se usará como base de cualquier comando para creación o modificación de material. Este comando tiene un módulo dedicado sólo a él.
 Extruir	Este comando, al igual que los dos siguientes crea o elimina material a partir de un boceto. Como límite, se introduce la extensión de extrusión que puede ser una dimensión, una cara de una pieza o un plano. La dirección de extrusión es perpendicular al plano del boceto por defecto, aunque ésta se puede cambiar añadiendo un ángulo de inclinación.
 Revolución	Tiene como entradas un boceto y un eje sobre el que se realiza la revolución del perfil, que puede ser completa o con un cierto ángulo.
 Barrido	Este comando toma uno o varios perfiles y los hace pasar por una ruta que puede ser un perfil abierto o cerrado creando de este modo un sólido.
 Agujero	Es un comando que elimina material para crear todo tipo de agujeros. Utiliza como referencias puntos o vértices que pueden encontrarse o no en un boceto. Como opciones se puede modificar: su longitud, forma, si acaba o no en punta, si tiene rosca, su longitud de roscado entre otras opciones.
 Empalme	Se utiliza para redondear los bordes de un sólido y esquinas, así como también para empalmar caras. Se controla el redondeo con un radio determinado que puede mantenerse constante o ser variable si se desea.
 Chaflán	Aplica un bisel a cualquier borde eliminando material. Se puede realizar de 3 formas, en cada una de ellas se introduce diferentes parámetros: distancia y ángulo, distancia (ambos lados con la misma distancia) y dos distancias diferentes.
 Vaciado	Se utiliza para transformar un cuerpo sólido a un cuerpo con un espesor o varios espesores determinados. El grosor o espesor se pueden crear hacia el exterior, interior o ambos. También se tiene la opción de eliminar alguna cara, lo que permite observar directamente el espesor.
 Rosca	Crea roscas en agujeros o ejes. En este comando se puede especificar la longitud de roscas, paso, tipo de rosca, tamaño de roscas, clase entre otras opciones. Es muy utilizada para crear tornillos.
 Plano Operaciones de trabajo	Esta barra de comandos es muy útil ya que permite crear planos, ejes, puntos y sistemas de coordenadas que pueden ser usados como referencias para otras operaciones. Cada uno de ellos tiene una gran variedad de opciones de creación (plano paralelo a una cara, plano por tres puntos, eje paralelo a línea, eje intersección entre dos planos etc.).
 Patrón	Es una barra muy usada ya que sus comandos permiten copiar operaciones de diferentes formas: por patrón rectangular, por patrón circular y simétricamente a través de un plano.

Tabla 1. Significado de los comandos más utilizados en el modelado 3D.

El siguiente objetivo del TFG es realizar un análisis estático por elementos finitos (CAE, del inglés Computer-Aided Engineering) usando como herramienta un módulo perteneciente a Autodesk Inventor Professional 2016, localizado en la pestaña *Entornos* (Ilustración 11).

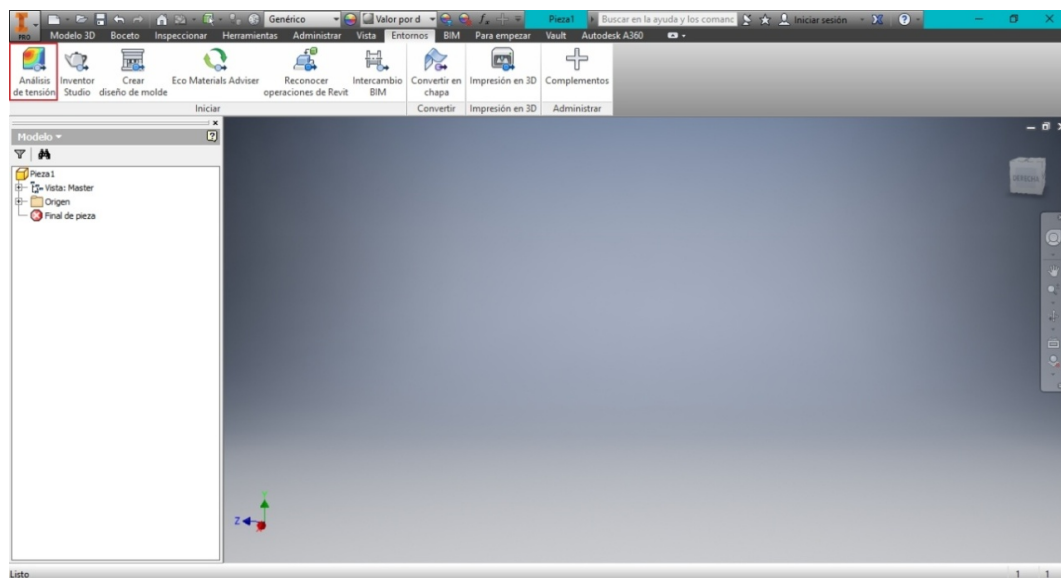


Ilustración 11. Interfaz de la pestaña *Entornos* en Autodesk Inventor Professional.

En la Ilustración 12 se puede observar la interfaz de la pestaña *Análisis de tensión*, en la que se describirá posteriormente los pasos a seguir para realizar un análisis por elementos finitos a una pieza del conjunto.

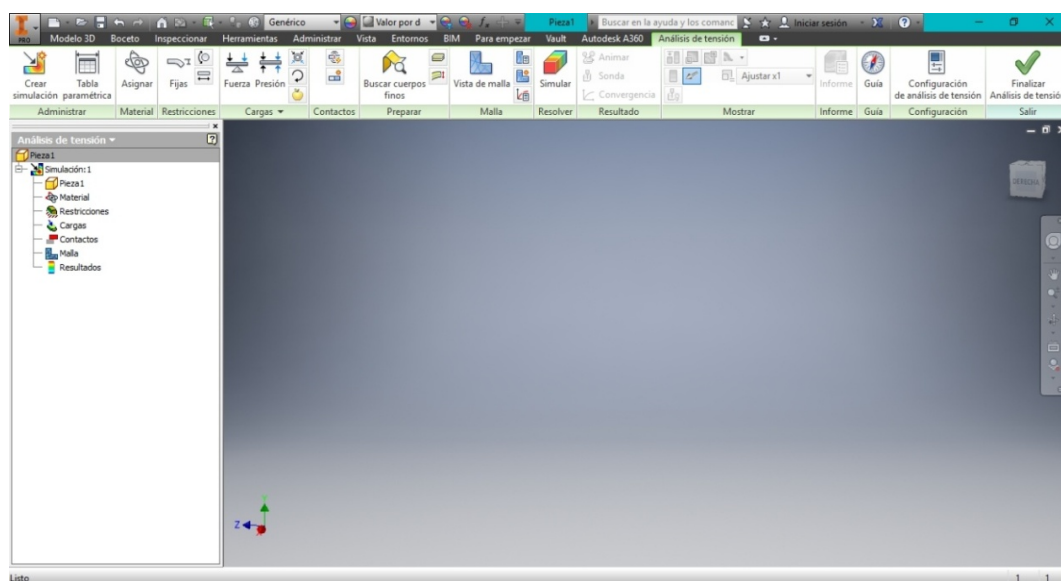
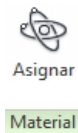


Ilustración 12. Interfaz de la pestaña *Análisis de tensiones* en Autodesk Inventor Professional.

El primer paso es seleccionar la opción de “Crear simulación” en la que se crea una simulación con un nombre determinado. A continuación, se debe ir seleccionando los comandos más utilizados (Tabla 2) para llevar a cabo el análisis estático.



En esta opción se abre una ventana donde se le tiene que asignar un material a la pieza. En caso de ser un ensamblaje compuesto por varias piezas, cada pieza puede estar compuesta de un material diferente.



En esta opción se incluyen las caras de la pieza o ensamblaje en las que se aplica alguna restricción, entre ellas, caras fijas (empotramiento), restricción de pasador y restricción sin fricción.



La función de esta barra es la de introducir las cargas aplicadas a la pieza o ensamblaje. Estas cargas pueden ser fuerzas puntuales, presiones, momentos, o fuerzas gravitatorias entre otras.



Una vez que se han introducido los materiales, sujeciones y cargas se selecciona esta opción para que el ordenador realice los cálculos y proporcione unos resultados. La duración de la simulación depende de la complejidad de la pieza y sus condiciones, así como también de la potencia del ordenador.

Tabla 2. Significado de los comandos más utilizados en el análisis estático.

Una vez finalizada la simulación, el programa devuelve unos resultados (tensiones de Von Mises, desplazamientos, deformaciones y coeficiente de seguridad) (Ilustración 13).



Ilustración 13. Resultados del análisis estático en Autodesk Inventor Professional.

El último objetivo del TFG es la realización de una recreación virtual del telégrafo óptico que muestre su funcionamiento. La herramienta elegida es “Inventor Studio”, un módulo perteneciente a Autodesk Inventor Professional que se encuentra en la pestaña Entornos (Ilustración 14).

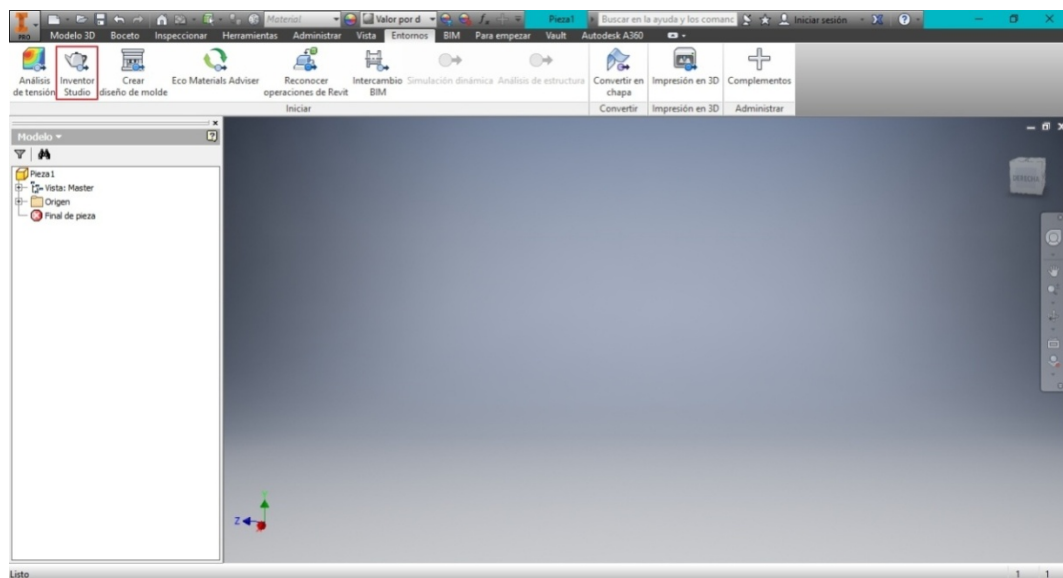


Ilustración 14. Situación del comando Inventor Studio en Autodesk Inventor Professional.

En la Ilustración 15 se puede observar la interfaz de la pestaña *Renderizar* dentro de Inventor Studio con los comandos utilizados (Tabla 3).

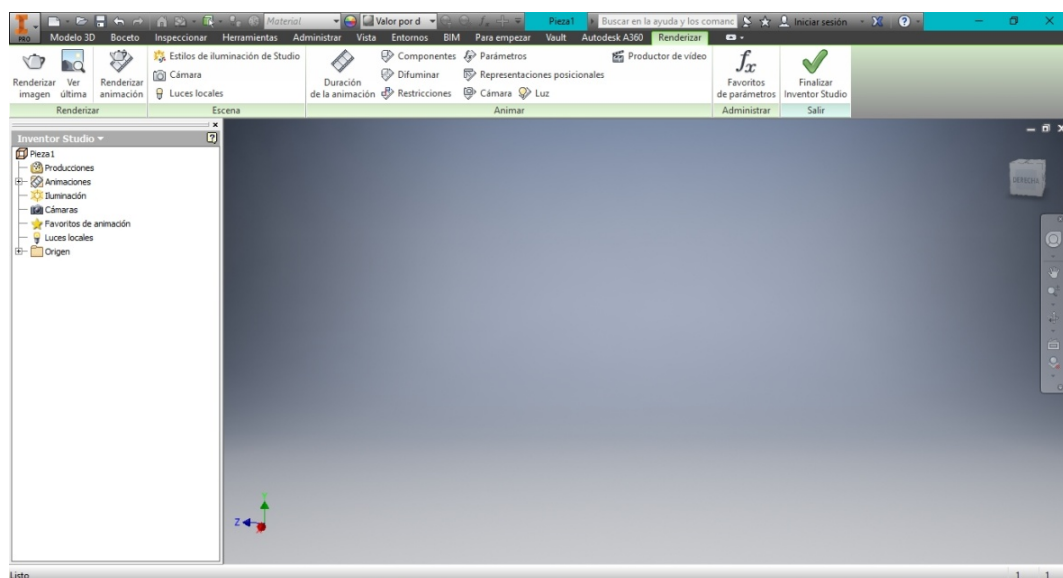


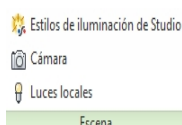
Ilustración 15. Interfaz de la pestaña *Renderizar* en Autodesk Inventor Professional.



Realiza la renderización de una pieza o ensamblaje en la escena que se encuentre. Permite modificar las iteraciones de la renderización, el estilo de iluminación y la cámara.



Permite realizar la renderización de una animación previamente preparada. Al igual que la anterior opción, podemos modificar las iteraciones de la renderización. También añade otras opciones a modificar como la velocidad e imagen del video.



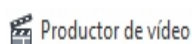
Esta barra de comandos permite introducir diferentes luces locales, estilos de iluminación y diversas cámaras desde diferentes posiciones para posteriormente poder jugar con todos estos parámetros a la hora dar como salida una animación.



En esta opción se introduce y modifica acciones de animación, variando sus parámetros de tiempo.



Estas opciones permiten introducir acciones de animación. Se pueden animar cámaras, luces, piezas (con giros o linealmente) y restricciones. También se puede introducir difuminaciones de partes de piezas de un ensamblaje.



Se trata del último paso antes de ejecutar la renderización para obtener el video y tiene como función ordenar todas las tomas de cámaras y acciones de animación. En esta opción se puede añadir transiciones para lograr una recreación más atractiva.

Tabla 3. Significado de los comandos más utilizados en Inventor Studio.

Hasta el momento, todos los módulos que se han descrito de Autodesk Inventor Professional trabajan con piezas (.ipt) y ensamblajes (.iam). Sin embargo, también trabaja con planos (.idw) y con 'Presentaciones' o perspectivas estalladas (.ipn) (Ilustración 16).

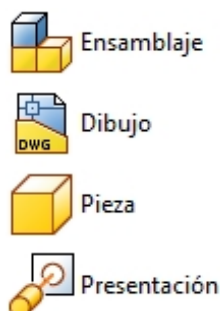


Ilustración 16. Tipos de documentos en Autodesk Inventor Professional.

Asimismo, se han obtenido los planos de conjunto y detalle, así como una perspectiva estallada para poder observar las direcciones de montaje del telégrafo óptico. También, se han retocado los planos obtenidos con Autodesk Inventor Professional 2016 con la herramienta AutoCAD 2019, ya que es una herramienta más focalizada al trabajo en 2D que Autodesk Inventor Professional 2016.

En la Ilustración 17 se observa la interfaz de la pestaña *Presentación* con su barra de comandos correspondiente donde aparecen opciones como explotar automáticamente, mover o rotar piezas del ensamblaje y animar la explosión, con la que se puede obtener un video de la pieza explosionándose.

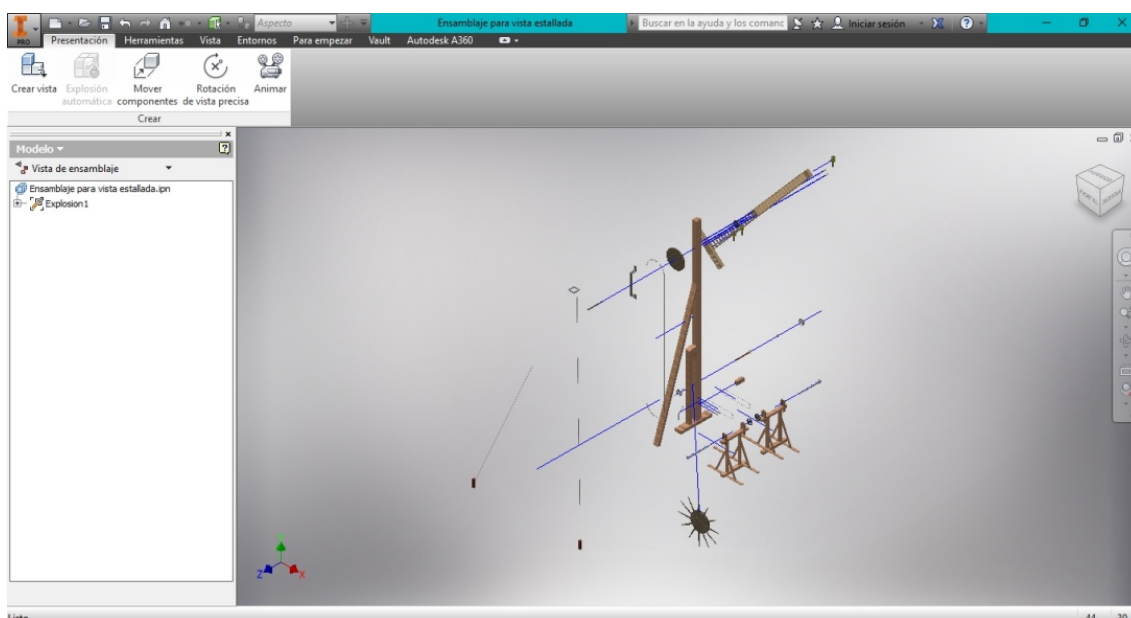


Ilustración 17. Interfaz de la pestaña *Presentación* en *Autodesk Inventor Professional*.

En la Ilustración 18 se observa la interfaz de la herramienta de “Dibujo”. Con los comandos de esta herramienta se pueden proyectar las vistas normalizadas de cualquier pieza, realizar vistas de sección, vistas auxiliares, vistas de detalle, acotar dimensiones y muchas más opciones. La mayoría de ellas se han utilizado a la hora de obtener los diversos planos que se encuentran en epígrafe 7 ([Anexos](#)).

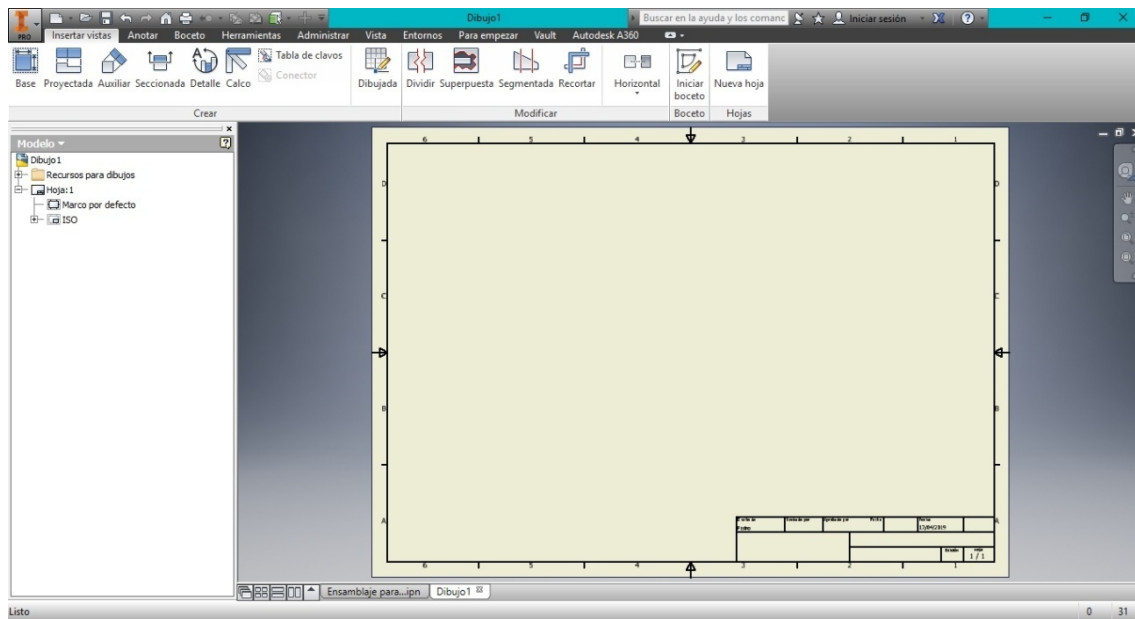


Ilustración 18. Interfaz de la herramienta *Dibujo* en *Autodesk Inventor Professional*.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MODELADO TRIDIMENSIONAL Y DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA

Gracias a los planos del expediente [6] se obtendrá el modelo CAD 3D a partir del cual se obtendrá a su vez la documentación geométrica detallada de cada uno de los componentes (planos de detalle) y del ensamblaje completo (perspectiva axonométrica isométrica, perspectiva estallada y plano de conjunto) del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina, así como un análisis por elementos finitos o análisis CAE y una recreación virtual para mostrar el funcionamiento de éste.

A continuación, se realizará una descripción de cada componente y su papel en el funcionamiento del telégrafo, apoyándose en el plano de conjunto ([Anexo: Planos](#)). En dicho plano a cada componente del telégrafo le corresponde una marca numérica, completando de este modo 25 marcas. También se puede acudir a la consulta de cualquier otro plano que se encuentre en el Anexo, en caso de, necesitar en cualquier momento obtener información más detallada.

La máquina se compone de un poste vertical (1) que ejerce la función de “bastidor” sobre el que se apoyan todos los ejes que dan movimiento al telégrafo óptico. Éste a su vez, se compone de un mástil que tiene 4 orificios (Ilustración 19): uno en la parte superior a 6,4 m de altura por donde pasa el eje superior (12), otro a 1,44 m de altura por donde pasa el eje principal (19) y dos más en la parte inferior a 0,75 m de altura que se usan para anclar 2 tornillos (24) que se utilizan como sujeción entre el poste vertical y otros dos componentes más de los que se hablará posteriormente.



Ilustración 19. Perspectiva axonométrica del poste vertical.

El bastidor también se compone de una base en la que se encuentran practicadas 2 ranuras (Ilustración 20), una barra anclada al suelo para dar más estabilidad al poste y una subestructura vertical unida al mástil que tendrá como función soportar conjuntamente con el mástil principal al eje principal (19) del telégrafo óptico.

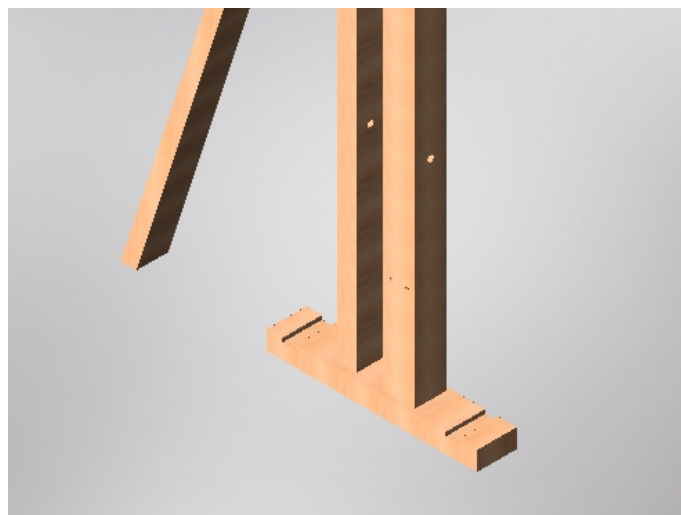


Ilustración 20. Perspectiva axonométrica de la base del poste vertical.

Unida al poste vertical (1) a través de las ranuras practicadas en su base se encuentran dos estructuras simétricas (9) entre sí que soportan los 2 telescopios (21). Estas estructuras están formadas por un entramado de barras (Ilustraciones 21 y 22)

que finalizan en su parte superior en unos huecos donde deben ir encajados los telescopios. Entre las dos estructuras simétricas (9) se situará el operario que se encargará de observar por los telescopios (21) cuya geometría se observa en la Ilustración 23, donde la “mira” correspondería al tramo de menor diámetro, mientras que la lente del objetivo se situará en la parte de mayor diámetro.

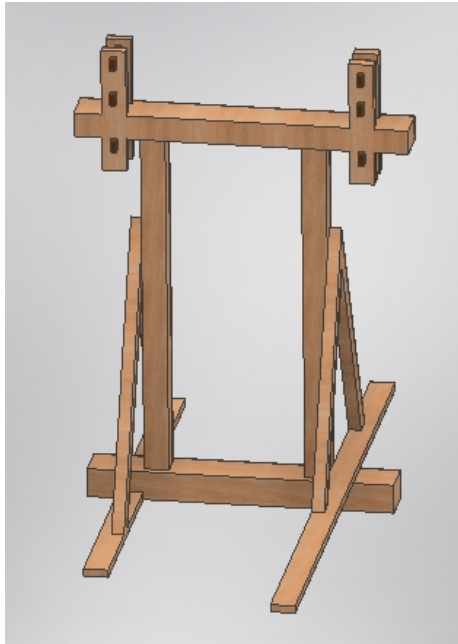


Ilustración 21. Perspectiva axonométrica frontal de la estructura de los telescopios.

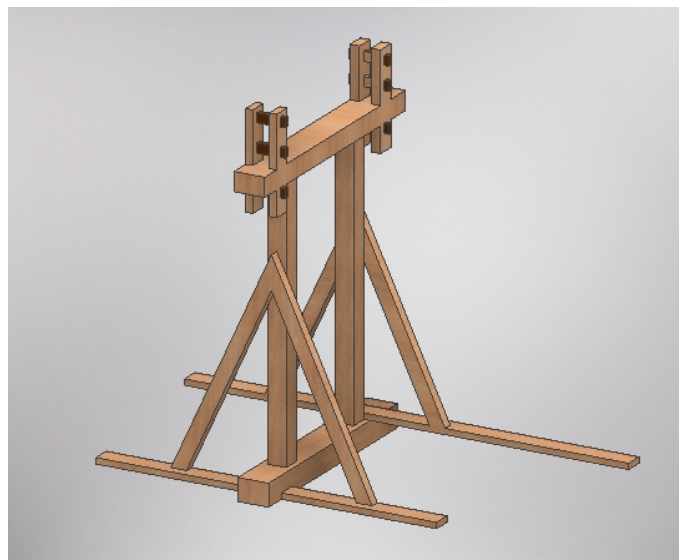


Ilustración 22. Perspectiva axonométrica lateral de la estructura de los telescopios.

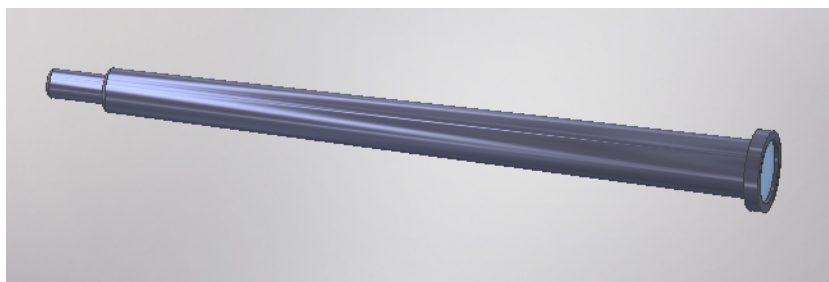


Ilustración 23. Perspectiva axonométrica del telescopio.

Fijado a cada uno de los telescopios (21) en su eje se encuentra una polea (20) (Ilustración 24) que se encargaría de transmitir a los telescopios el movimiento impuesto por las cuerdas (11) (Ilustración 25).

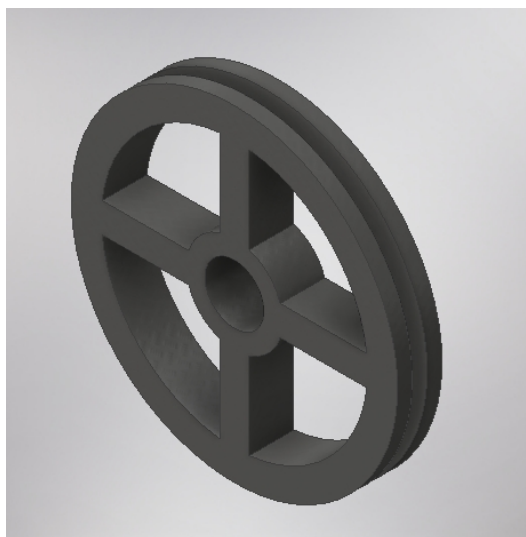


Ilustración 24. Perspectiva axonométrica de la polea estructura telescopios.



Ilustración 25. Perspectiva axonométrica de la cuerda de las poleas bajas.

Por otro lado, toda máquina o mecanismo necesita de un esfuerzo físico para que éste pueda entrar en movimiento. En el caso del telégrafo óptico, esta fuerza es manual y es ejercida por el operario. Esta fuerza se aplicará sobre el elemento designado en el plano de conjunto por la marca (6) que corresponde a la polea principal, que se encuentra fijada al 'eje principal' o eje trasmisor de movimiento (19).

Dicha polea principal presenta un diámetro de 0,7 m y en su sección se puede observar 4 partes bien diferenciadas (Ilustración 26): la primera corresponde a las dos ranuras por donde pasarán las cuerdas (5) que transmitirán el movimiento hasta la polea superior (2); la segunda corresponde a 36 huecos practicados a lo largo de su perímetro que corresponden a cada una de las señales que es capaz de transmitir el telégrafo donde se introducirá el resorte o muelle indicador (10); la tercera corresponde al torno o cabrestante que será exactamente el punto donde se aplica el esfuerzo por parte del operario, y la cuarta corresponde al orificio aplicado en su centro por donde pasa el eje principal (19) al cual debe de estar fijada.



Ilustración 26. Perspectiva axonométrica de la polea principal.

En la Ilustración 27 se observa en detalle la polea principal (6) en la que se aprecian las dos ranuras donde se encontrarían las cuerdas (5) y los surcos donde se encajaría el resorte o muelle (10). El esfuerzo aplicado en el cabrestante de la polea (6) se transmite al eje principal (19) de 0,6 m de longitud y un diámetro de 0,04 m, y éste transmite el movimiento rotatorio a sus extremos por medio de un mecanismo (Ilustración 31), en el que intervienen varios elementos: el eje principal (19) (Ilustración 28), un tornillo sin fin (25) (Ilustración 29) y una pieza-enganche (7) (Ilustración 30) a ese tornillo sin fin en el cual viene ensamblada una polea.



Ilustración 27. Detalle de ranuras de la polea principal.

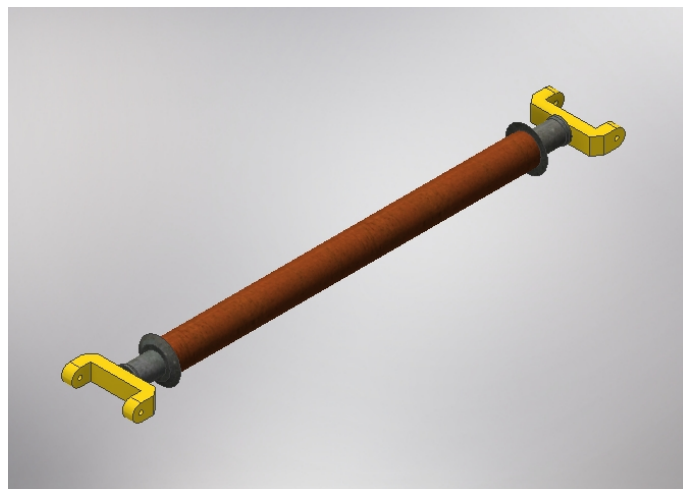


Ilustración 28. Perspectiva axonométrica del eje principal.

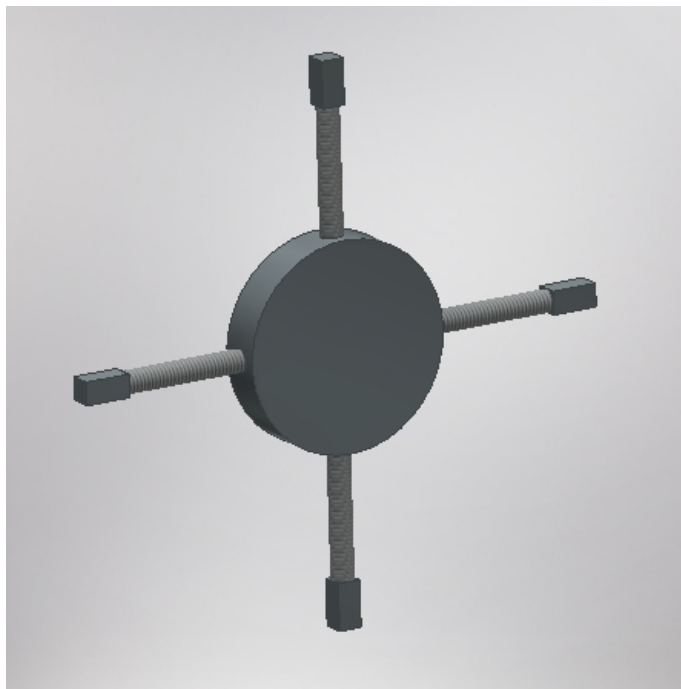


Ilustración 29. Perspectiva axonométrica del tornillo sin fin.



Ilustración 30. Perspectiva axonométrica de la pieza enganche a polea.

Así pues, cuando se acciona la polea principal (6), gira el eje principal (19) que a su vez hace girar el tornillo sin fin (25), transmitiendo éste el movimiento rotatorio a la pieza enganche a polea (7) cuya polea tendrá las mismas dimensiones que la polea de los telescopios (20). Finalmente, este movimiento se transmite a la cuerda (11) que hace girar los telescopios (21).

En la Ilustración 31, se muestra el mecanismo de transmisión del tornillo sin fin ensamblado con todos sus componentes.

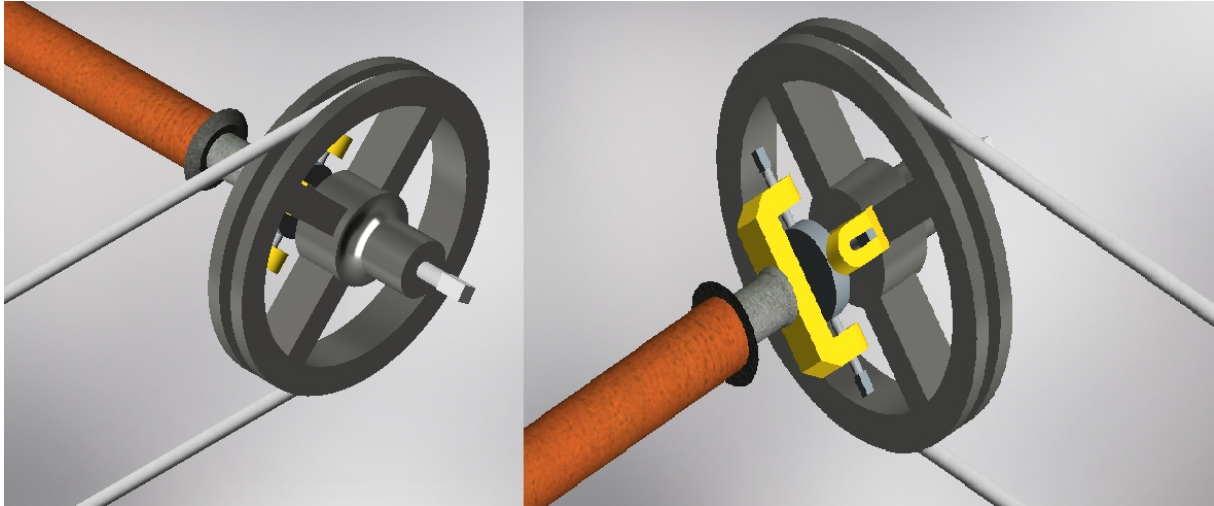


Ilustración 31. Perspectivas axonométricas del mecanismo de transmisión del tornillo sin fin.

El mismo movimiento de la polea principal (6) hace girar la polea superior (2) (Ilustración 32) a través de unas cuerdas (5) similares a las correspondientes a la marca (11). Dicha polea tiene unas dimensiones semejantes a las de la polea principal, y a ella se encuentra fijado el eje (12) (Ilustración 33) que transmitirá el movimiento de la polea a la flecha (3). Este eje (12) atraviesa el poste vertical (1) por su orificio superior y también se apoya en la chapa (13) mediante un orificio practicado en ella, con lo que tendrá total libertad de rotación.

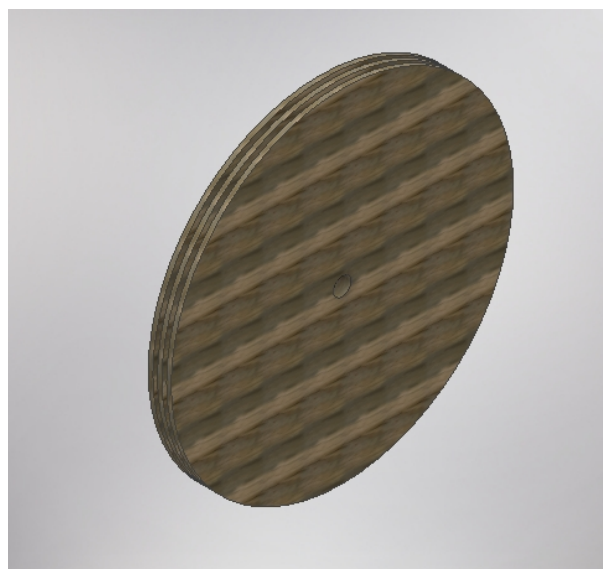


Ilustración 32. Perspectiva axonométrica de la polea superior.

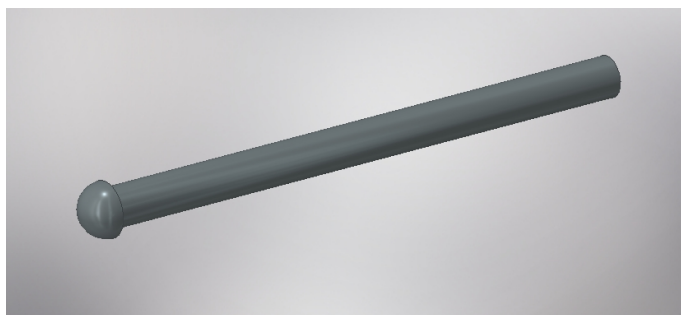


Ilustración 33. Perspectiva axonométrica del eje de la polea superior.

La chapa (13) (Ilustración 34) se encontraba anclada al poste vertical, con cuyo eje vertical se alineaba.



Ilustración 34. Perspectiva axonométrica de la chapa polea superior.

El eje (12) se unía a la flecha (3) mediante un empalme (16) que une ambos elementos mediante 4 tornillos (18) con sus respectivas tuercas (15). El empalme (16) (Ilustración 35) es un componente de revolución que consta de un orificio central de 0,04 m de diámetro por el que pasaría el eje (12), y 4 orificios de 0,02 m de diámetro más alejados de su eje y separados entre sí por un ángulo de 90°. Por cada uno de los orificios de menor diámetro pasa un tornillo (18) (Ilustración 36) que también pasa a su vez por orificios de igual diámetro practicados en la flecha (3), y para conseguir la sujeción se hará uso de una tuerca (15) (Ilustración 37) situada en la pieza de empalme (6).



Ilustración 35. Perspectivas axonométricas del empalme eje-flecha.



Ilustración 36. Perspectiva axonométrica del tornillo flecha.

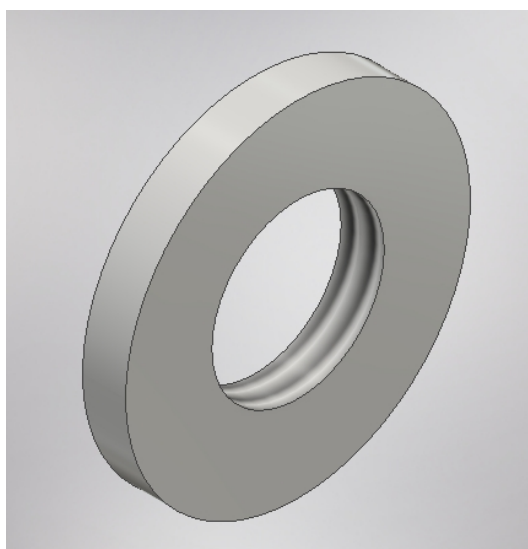


Ilustración 37. Perspectiva axonométrica de la tuerca.

La flecha (3) (Ilustración 38) que tiene una longitud de 6,6 m es uno de los elementos más importantes que componen el telégrafo óptico, ya que es el que muestra la señal que debe recibir la siguiente estación. Se trata de un travesaño en

forma de T compuesto por flancos que posibilitarán el paso del viento a través de la misma sin generar ningún problema. Este travesaño rota a través del eje (12) que pasa por su centro de gravedad.

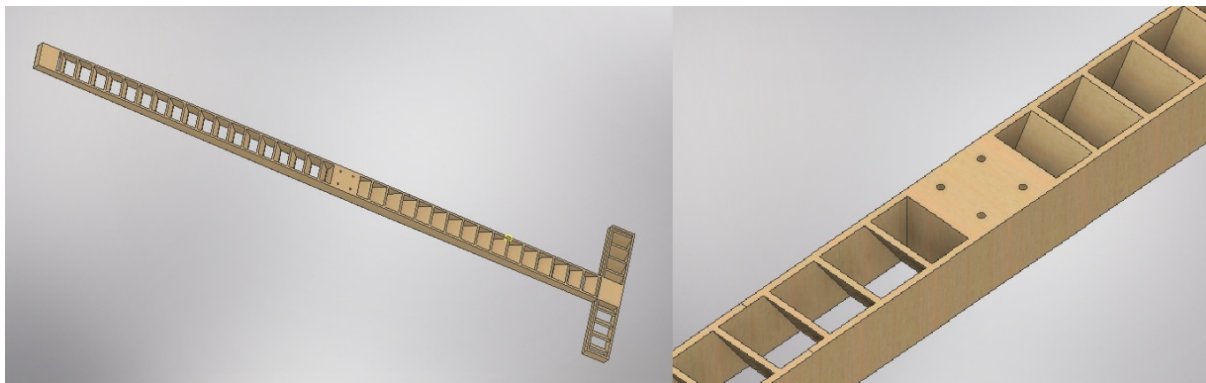


Ilustración 38. Perspectivas axonométricas de la flecha y detalle de la parte central.

En sus extremos se encuentran incrustadas 3 linternas (17) para poder emitir señales por la noche (Ilustración 39).

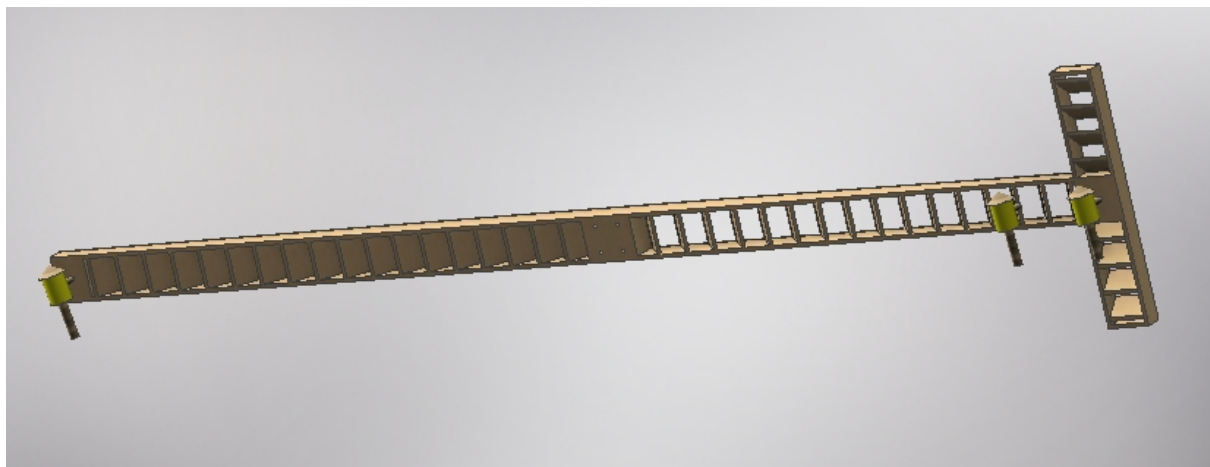


Ilustración 39. Perspectiva axonométrica de la flecha con linternas.

El resorte (10) (Ilustración 40) está empotrado a un soporte de madera (23) (Ilustración 41) que estará a su vez empotrado al poste vertical (1) mediante dos tornillos (24) (Ilustración 42).



Ilustración 40. Perspectiva axonométrica del resorte.

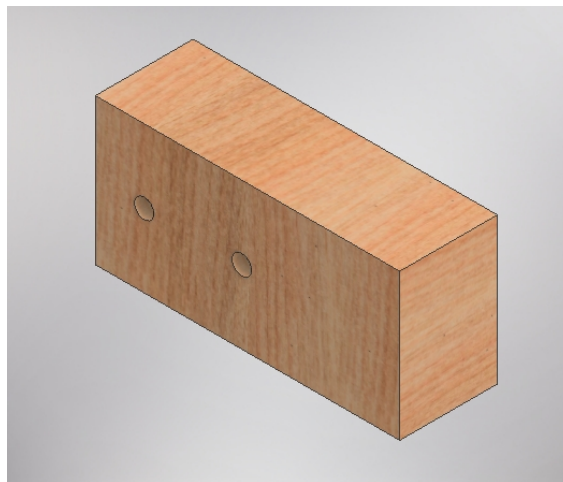


Ilustración 41. Perspectiva axonométrica del soporte de madera.

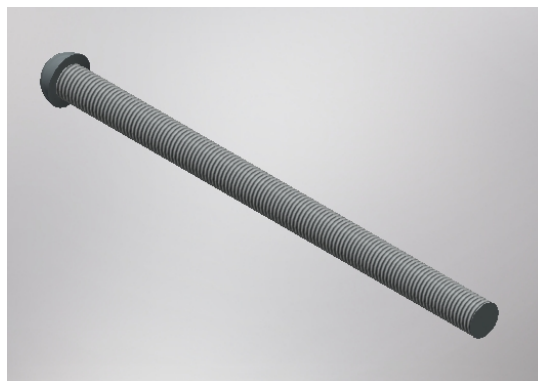


Ilustración 42. Perspectiva axonométrica del tornillo enganche muelle-poste vertical.

En la Ilustración 43 se puede observar el conjunto del sistema del indicador ya ensamblado.

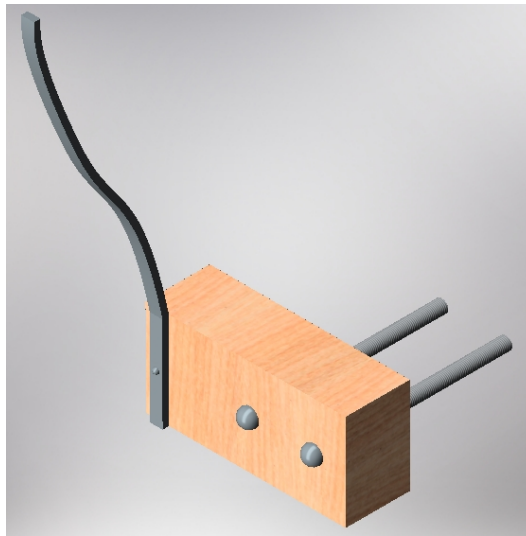


Ilustración 43. Perspectiva axonométrica del conjunto del sistema del indicador ensamblado.

Para dar estabilidad al poste vertical (1) en su cabeza, se colocará una chapa (14) donde irán amarradas dos cuerdas (4) ancladas al suelo por puntales (8).

En la Ilustración 44 se puede observar el ensamblaje final del telégrafo óptico completo.



Ilustración 44. Perspectiva axonométrica del ensamblaje completo del telégrafo óptico.

Anteriormente se ha realizado una explicación detallada de la descripción de cada componente y su función en el ensamblaje final. A continuación, se explica de forma concisa el funcionamiento del telégrafo óptico desde el punto de vista de la transmisión de la señal [3].

El proceso comienza con el operario situado al frente del cabrestante (6) que será girado hasta hacer coincidir el indicador o resorte (10) en la ranura de la correspondiente letra a transmitir situada en la polea (6).

Cuando el cabrestante (6) es girado, hace girar a su vez al eje principal (19) y a la polea superior (2) gracias a las cuerdas (5). Esto conlleva dos movimientos paralelos: el que provoca la polea superior (2) y el que provoca el eje principal (19), por lo que se realizará primero la explicación del movimiento debido a la polea y posteriormente el debido al eje.

Cuando la polea superior (2) gira, hace rotar el eje de la polea superior (12) que esta incrustado en la flecha (3) mediante el empalme (16) que también forzará a la flecha a rotar para situarse en una posición correspondiente a la letra introducida por el operario en las ranuras de la polea principal (6).

En el segundo movimiento, el giro del eje principal (19) hace que en sus extremos, mediante el mecanismo de tornillos sin fin se gire la pieza enganche (7), y ésta mediante las poleas que tiene ensambladas transmite el movimiento de rotación a las cuerdas (11) hasta las poleas (20) que fijadas a unos telescopios (21) harán girar a estos.

Estos telescopios constan en su lente de un hilo meridiano que está sincronizado con la señal de la flecha, por lo que cuando se ha transmitido la señal, el operario debe mirar por el telescopio a la siguiente torre de transmisión y comprobar que la flecha del siguiente telégrafo coincida con el hilo meridiano de la lente del telescopio.

Los operarios de los siguientes telégrafos deben ir transmitiendo la señal haciendo girar el cabrestante hasta hacer coincidir el hilo meridiano con la señal de la flecha del telégrafo anterior, comprobando que el siguiente telégrafo retransmite su

misma señal. Mientras la torre siguiente no adopte la posición correcta de la flecha, el operario no puede pasar a transmitir la siguiente letra.

Aunque todas las torres tenían grabadas la letra en las ranuras de la polea principal, la usaría solo el primer telégrafo o telégrafo transmisor. Únicamente en caso de duda, el observador leería la señal en la polea principal a la misma vez que la transmitía.

4.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

Hoy en día, el análisis CAE es una herramienta muy común en muchas empresas a la hora de realizar el diseño de una pieza industrial, ya que permite corroborar si su diseño es óptimo sin que sea necesario fabricar dicha pieza. Esto es una gran ventaja ya que ahorra tanto tiempo como dinero.

En este apartado se realiza el análisis estático del telégrafo óptico por elementos finitos. Para ello, se estudia el caso más desfavorable que corresponde al paro repentino del mecanismo de la polea, lo que provocará que la polea superior (2) pare inmediatamente y como consecuencia, el giro de la flecha provocará un momento en el eje polea superior (12), realizándose dos simulaciones con distintas condiciones.

La primera simulación, consiste en un análisis en el que el telégrafo óptico se encuentra fijado al suelo, y solo actúan la fuerza de la gravedad y un momento aplicado en el eje de la polea superior.

La segunda simulación, se desarrollará basándose en el conocimiento de que los telégrafos ópticos estaban situados sobre colinas y elevaciones para una mejor transmisión de la señal visual y, por lo tanto, la fuerza del viento podría llegar a ser un factor adverso para su estabilidad. Así pues, en esta segunda simulación, aparte de la acción de la gravedad y del momento aplicado en el eje de la polea superior, se le añade una presión uniforme del aire sobre el telégrafo óptico.

Las fases seguidas en el análisis estático han sido: preprocesado, asignación de materiales, establecimiento de condiciones de contorno, aplicación de las cargas,

discretización o mallado y obtención de resultados (tensiones de von Mises, desplazamientos, deformaciones equivalentes y coeficiente de seguridad).

Respecto al preprocesado, es necesario indicar que se han extraído del ensamblaje final las cuerdas, ya que no presentan un comportamiento adecuado para las cargas aplicadas en el análisis.

La mayoría de pasos a tomar como la elección de materiales y la aplicación de restricciones fijas son comunes a las dos simulaciones, por lo que la explicación de estas partes valdrá para ambas.

Respecto a la elección del material de cada componente del ensamblaje, es necesario indicar que se distinguen dos tipos: los componentes metálicos y los componentes de madera. Para la elección del material se ha tenido en cuenta el material más común de la época, por lo que se han elegido hierro fundido y madera de roble.

En la Ilustración 45, se puede observar la casilla de elección del material en Autodesk Inventor Professional 2016.

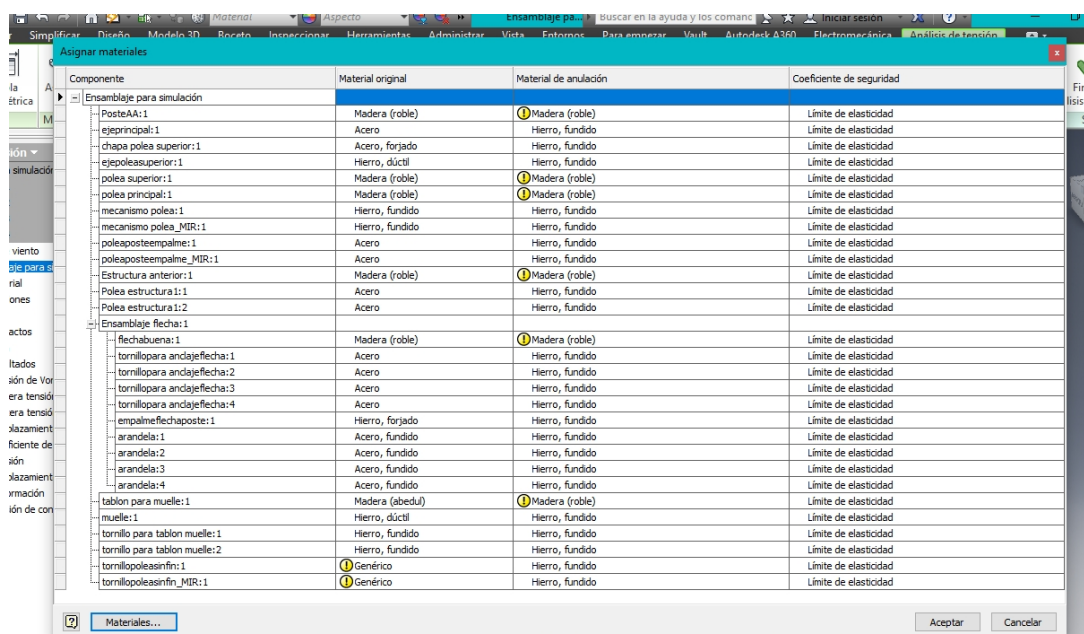


Ilustración 45. Asignación de material en Autodesk Inventor Professional.

Las propiedades físicas tanto de la madera de roble como del hierro fundido se han extraído de la biblioteca de materiales de Autodesk Inventor Professional 2016, y es necesario su conocimiento a la hora de evaluar si los esfuerzos aplicados sobre el telégrafo óptico superan o no sus propiedades mecánicas.

En las Ilustraciones 46 y 47, se puede observar las propiedades de los dos materiales de los que se compone el telégrafo óptico.

Editor de materiales: Madera (roble)

Identidad Aspecto Físico

► Información

▼ Térmico básico

Calor específico 1,200 J/ (G . ° C)

Coefficiente...n térmica X 0,100 $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

Coefficiente...n térmica Y 0,100 $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

Coefficiente...n térmica Z 0,100 $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

Conductividad térmica X 1,000E+00 Con (m - k)

Conductividad térmica Y 1,000E+00 Con (m - k)

Conductividad térmica Z 1,000E+00 Con (m - k)

► Mecánico

▼ Resistencia

Especies Quercus

Grado de fuerza

Plegado 99,636 MPa

Compresión ...a a la veta 41,000 MPa

Compresión ...r a la veta 5,200 MPa

Cortante par...lo a la veta 11,900 MPa

Tracción par...la a la veta 100,000 MPa

Tracción per...ar a la veta 3,700 MPa

Módulo de media 0,000 MPa

Construcción Natural

Límite de elasticidad 46,600 MPa

Resistencia ...a a tracción 5,500 MPa

Ilustración 46. Propiedades físicas de la madera de roble.

Editor de materiales: Hierro, fundido

Identidad Aspecto Físico

► Información

▼ Térmico básico

Conductividad térmica 2,100E+01 Con (m - k)

Calor específico 0,450 J/ (G . ° C)

Coefficiente...ión térmica 12,000 $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

► Mecánico

Comportamiento Isótropo

Módulo de Young 120,500 GPa

Coefficiente de Poisson 0,30

Módulo cortante 58100,000 MPa

Densidad 7,150 g/cm³

▼ Resistencia

Límite de elasticidad 758,000 MPa

Resistencia ...a a tracción 884,000 MPa

☐ Tratado térmicamente

Ilustración 47. Propiedades físicas del hierro fundido.

El siguiente paso es designar las condiciones de contorno como las restricciones fijas (o de empotramiento) a las caras donde correspondan, usando el comando “Fijas”, que se describió en el epígrafe 3. Para ello, se deben seleccionar con el cursor, las caras que se encuentran coincidentes con el plano de planta, que son las caras que deben estar fijadas al suelo (Ilustración 48).

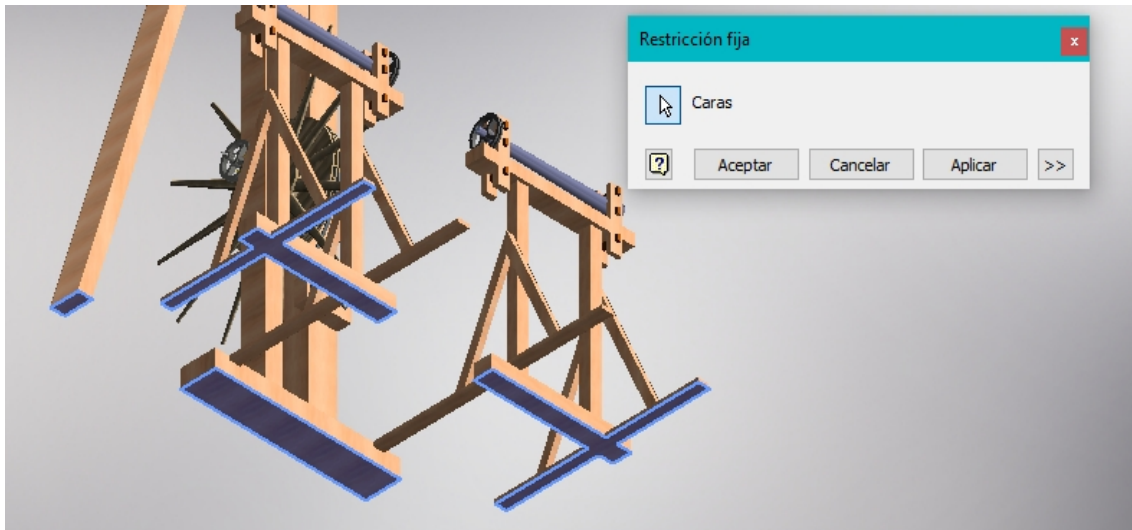


Ilustración 48. Selección de las caras de restricción fija.

Asimismo, se ha aplicado una restricción de apoyo rotatorio, usando el comando “Restricción de pasador” en la polea superior (Ilustración 49).

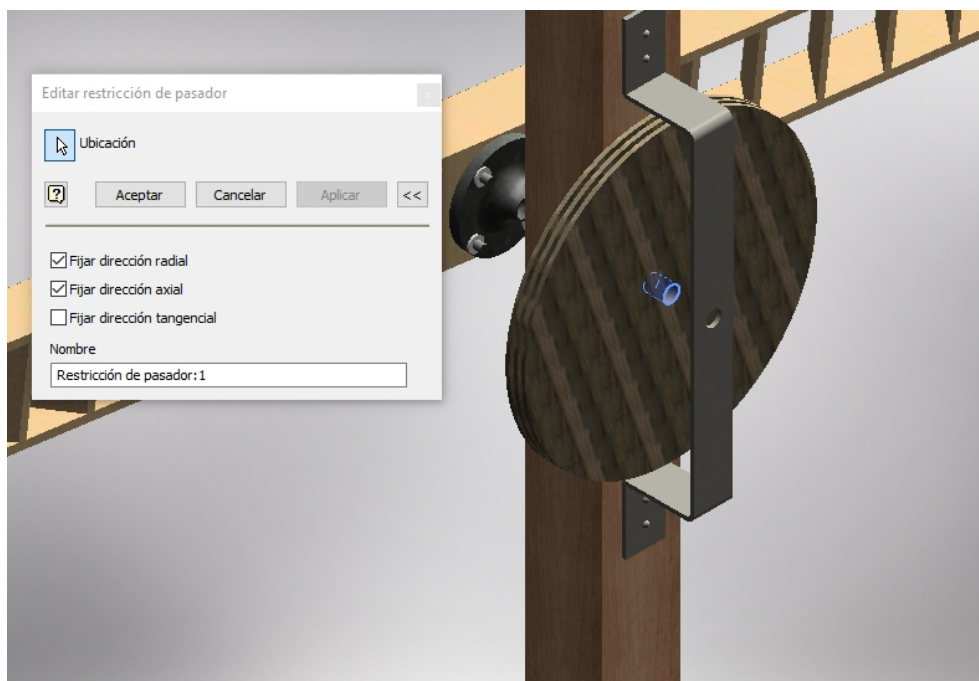


Ilustración 49. Selección de apoyo rotatorio.

Una vez llegado a este punto se deben aplicar las cargas que actúan sobre el telégrafo óptico. Tanto la aplicación de la fuerza de la gravedad como la de aplicar el momento serán comunes para las dos simulaciones, por lo que sólo se expondrá una vez.

En primer lugar, la fuerza de la gravedad se simboliza en el programa como un vector de color amarillo en sentido negativo del eje Z.

Cuando se ha seleccionado, el programa pide que se indique una arista que coincida con la dirección que se le quiere dar a la gravedad, y para ello, se selecciona cualquier arista del poste vertical. Sólo falta indicarle el sentido descendente (Ilustración 50), estando la magnitud de la fuerza designada por defecto.



Ilustración 50. Aplicación de la fuerza de la gravedad en el telégrafo óptico.

Por otro lado, se debe aplicar el momento generado en el eje de la polea superior en el paro repentino del giro de la flecha, y para ello, se debe calcular un momento equivalente. Este momento es el momento que le aplica la polea superior (2) al eje de la polea superior (12) a la cual le transmite el movimiento la polea principal (6) que es el origen del movimiento, ya que es sobre su cabrestante sobre el que el operario aplicará la fuerza.

Para el cálculo del momento M , hay que situarse en la polea principal donde el brazo de la fuerza será 0,425 m (radio del cabrestante) y la fuerza un peso en kg multiplicado por la gravedad. Para ello, se ha supuesto un peso de 54 kg (fuerza ejercida por el operario), situación bastante desfavorable.

Así pues, suponiendo una fuerza perpendicular a su brazo, producirá un momento que viene dado por la ecuación (1). Sustituyendo valores, se obtiene un momento aproximado de 225 N m (Ilustración 51).

$$M = F \cdot d = m \cdot g \cdot d = 54 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,425 \text{ m} = 225,14 \text{ N} \cdot \text{m} \approx 225000 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (1)$$

donde $F = \text{fuerza ejercida por el operario}(N)$

$d = \text{distancia desde el centro de la polea a la fuerza } F(m)$

$m = \text{estimación de la fuerza en peso que puede hacer el operario } (kg)$

$g = \text{aceleración de la gravedad } (m/s^2)$

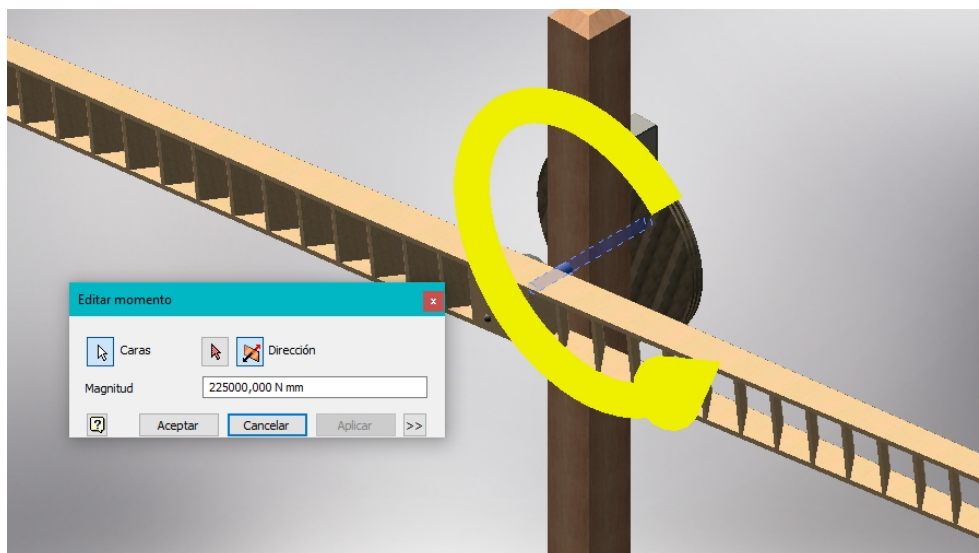


Ilustración 51. Aplicación del momento aplicado en el eje polea superior.

Desde el punto de vista de la discretización o mallado, se opta por los parámetros del mallado automático que proporciona el software, obteniendo un resultado general

(Ilustración 53), y afinando la malla en los componentes de menor tamaño (Ilustración 54). La configuración de la malla se muestra en la Ilustración 52.

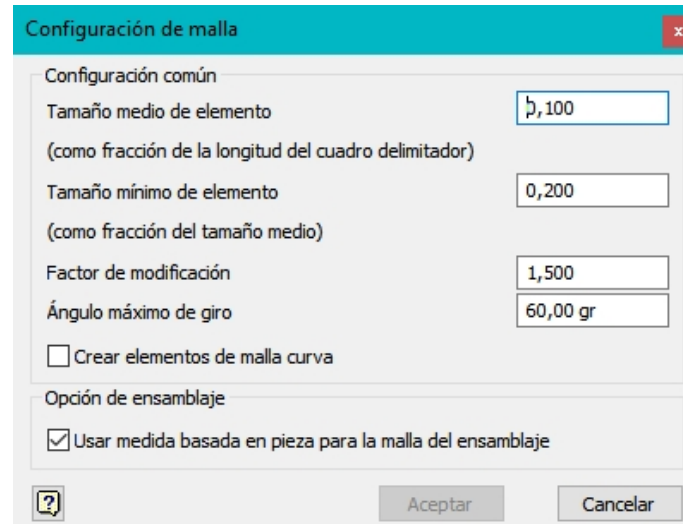


Ilustración 52. Parámetro de configuración de la malla automática.



Ilustración 53. Mallado automático generado por Autodesk Inventor Professional.

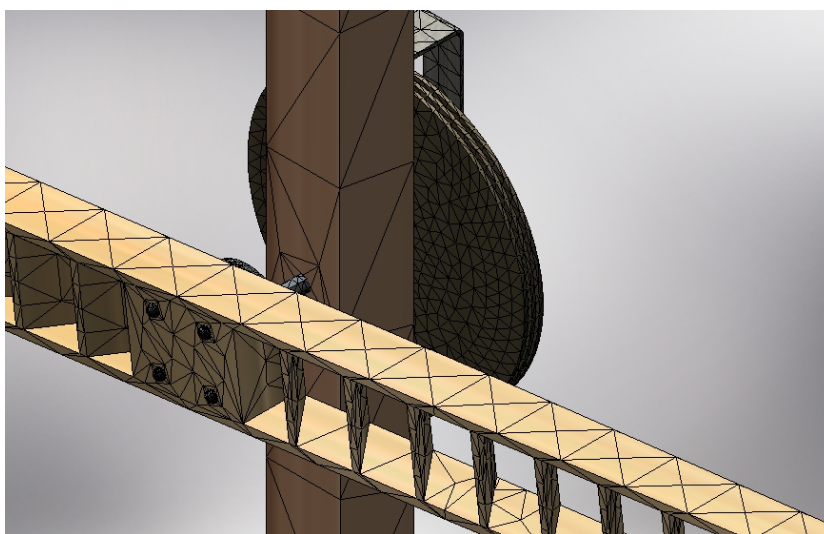


Ilustración 54. Detalle del refinamiento del mallado.

Antes de comenzar a extraer resultados, se va a realizar un análisis modal al telégrafo óptico para verificar que éste se va a comportar como una estructura y no como un mecanismo. Para ello se debe ir al comando “Crear simulación” y seleccionar la opción de análisis modal en lugar de análisis estático, dejando las demás opciones de configuración por defecto. Los demás pasos a seguir son los mismos que para el análisis estático.

En el análisis modal, los resultados obtenidos son las distintas frecuencias de la estructura, y el objetivo que se busca con este tipo de análisis es corroborar que el análisis CAE tenga sentido. Así pues, los valores de las frecuencias no deben ser nulos y además estar lo más alejados de 0, pues si no fuera así, el telégrafo óptico se estaría comportando como un mecanismo y no tendría sentido el análisis CAE.

En la Ilustración 55 y 56 se pueden observar los distintos valores de frecuencias modales obtenidos tanto en la simulación 1 (acción de la gravedad más momento aplicado) como en la simulación 2 (acción de la gravedad, momento aplicado y presión del viento).

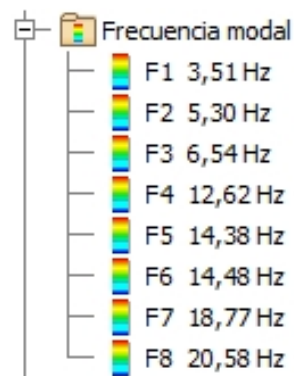


Ilustración 55. Frecuencias modales (Simulación 1).

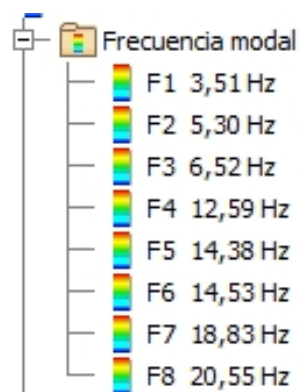


Ilustración 56. Frecuencias modales (Simulación 2).

Observando los resultados, se puede asegurar que el telégrafo óptico no se comporta como un mecanismo, con lo que tiene sentido realizar un análisis CAE.

Para la obtención de un resultado fiable en las distintas simulaciones, se han realizado varias iteraciones refinando la malla hasta conseguir la convergencia de los resultados respecto a la tensión de Von Mises (Ilustraciones 57 y 58).

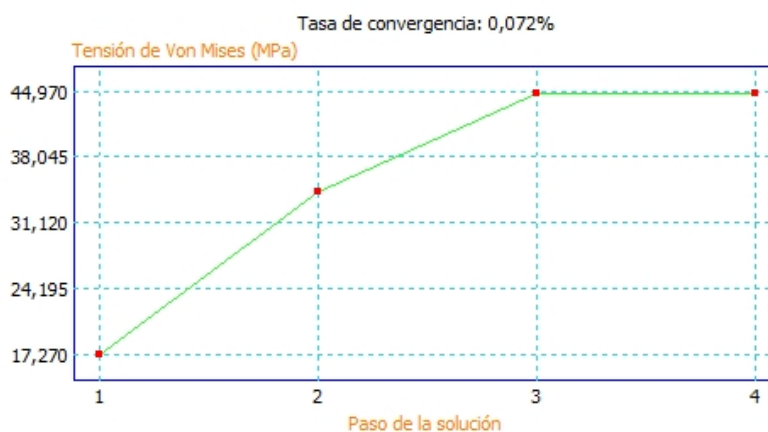


Ilustración 57. Curva de convergencia (Simulación 1).

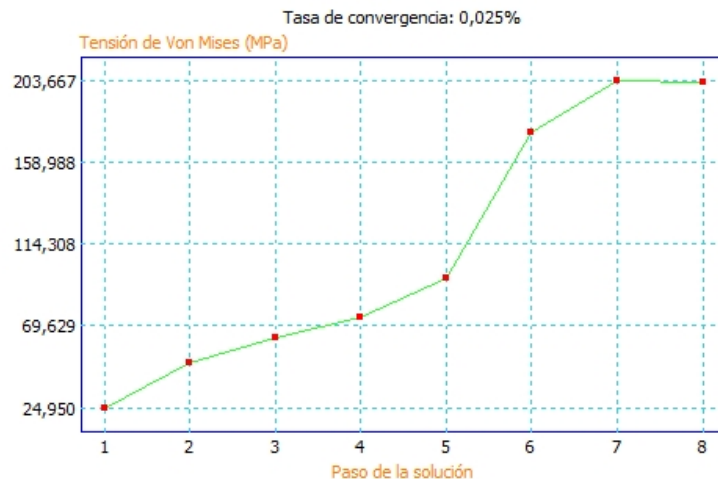


Ilustración 58. Curva de convergencia (Simulación 2).

Llegado a este punto se debe seleccionar el comando de “Simular”, y a continuación se mostrarán los distintos resultados del análisis CAE.

4.2.1. Simulación 1 (Acción de la gravedad y momento)

4.2.1.1. Tensiones de Von Mises

Al obtener los resultados se observa que casi toda la pieza tiene un color azul, que corresponde en la leyenda a partes donde apenas actúan tensiones (Ilustración 59). La tensión de Von Mises máxima presenta un valor de 44,94 MPa, y se encuentra en los tornillos de la flecha (18) (Ilustración 60).

Se puede decir que estas tensiones de Von Mises no sobrepasan en ningún momento el límite de elasticidad de los materiales que lo forman, que para la madera de roble es 46,6 MPa (dirección de la veta al ser un material ortótropo) y para el hierro fundido 758 MPa, aunque en este caso el elemento con mayor sollicitación son los tornillos flecha (18).

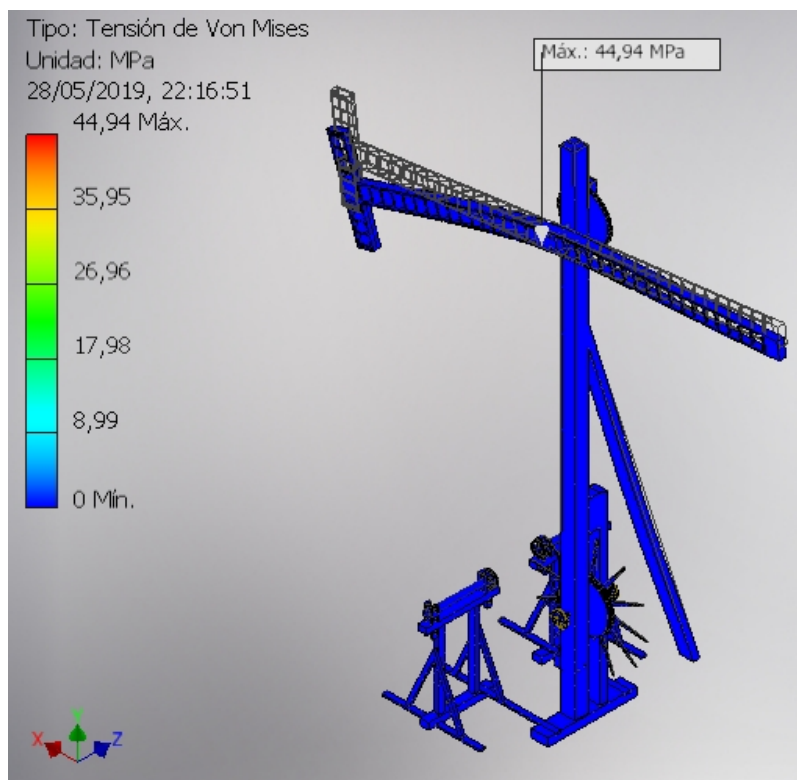


Ilustración 59. Distribución de tensiones de von Mises (Simulación 1).

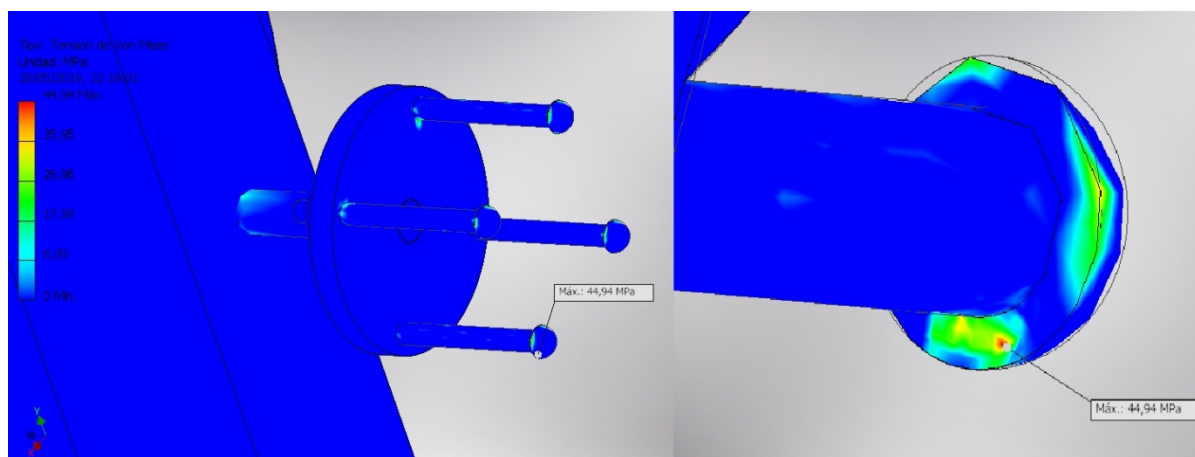


Ilustración 60. Localización de la máxima tensión de von Mises (Simulación 1).

4.2.1.2. Desplazamientos

Como se puede observar en la Ilustración 61, sólo la flecha presenta desplazamientos significativos, siendo el valor máximo de 4,966 mm.

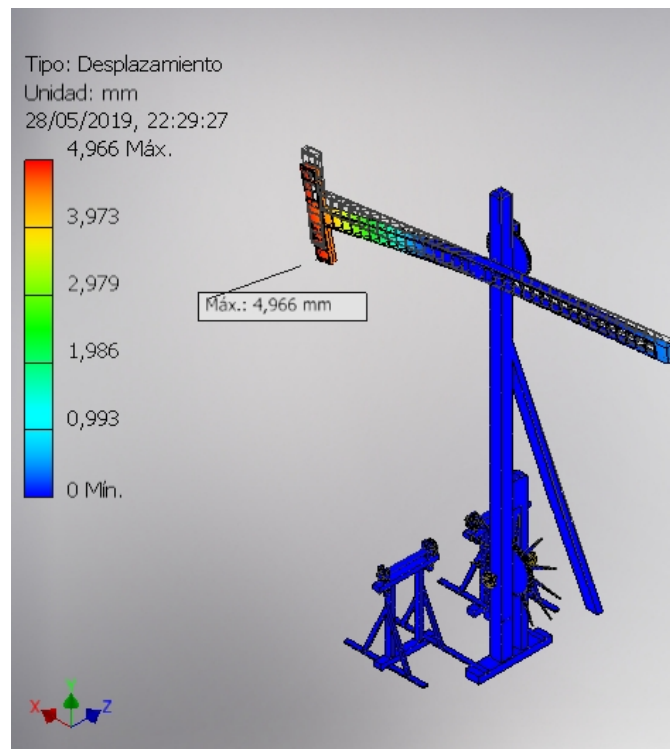


Ilustración 61. Distribución de desplazamientos (Simulación 1).

4.2.1.3. Deformaciones equivalentes

Al igual que en la distribución de tensiones, las máximas deformaciones equivalentes se encuentran en los tornillos que unen el eje de la polea superior con la flecha (Ilustración 62), presentando un valor insignificante de 0,0328 %.

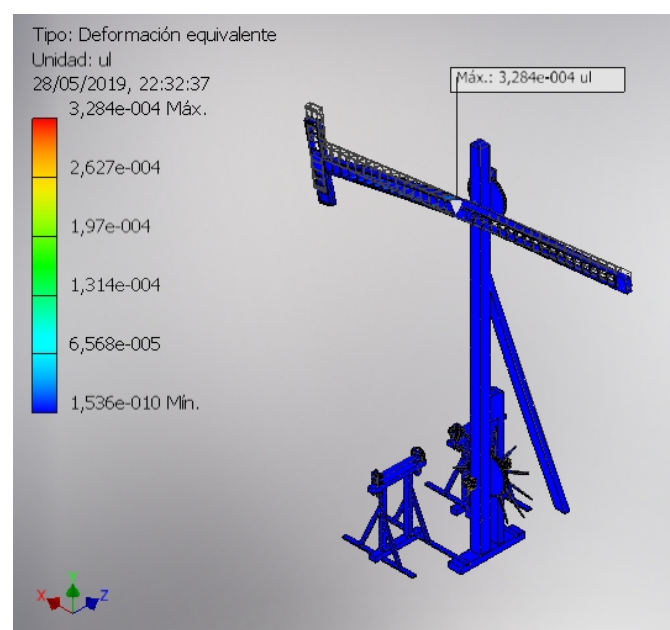


Ilustración 62. Distribución de deformaciones equivalentes (Simulación 1).

4.2.1.4. Coeficiente de seguridad

Se puede observar en la Ilustración 63 cómo la pieza se encuentra con un coeficiente de seguridad de 15, lo que significa que la pieza está muy sobredimensionada.

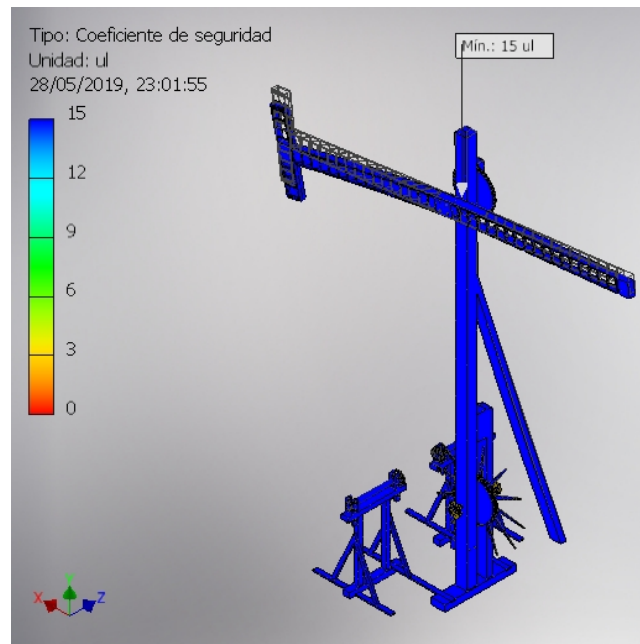


Ilustración 63. Distribución del coeficiente de seguridad (Simulación 1).

4.2.2. Simulación 2 (Acción de la gravedad, momento y presión del viento)

Para la segunda simulación en la que interviene una carga de viento sobre el telégrafo óptico habrá que añadir una carga más a la simulación anterior, que se puede aplicar seleccionando en la barra de comandos de cargas la opción de presión. Esta opción necesita que se seleccionen las caras sobre las que se quiere aplicar la presión del viento y un módulo medido en MPa.

La presión que ejerce viento en función de su velocidad viene dada por la ecuación (2):

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2)$$

donde $\rho = \text{densidad del aire}(\text{kg}/\text{m}^3)$

$$v = \text{velocidad del flujo de aire(m/s)}$$

Para la elección de una velocidad, se han consultado historiales de rachas de viento en España y se ha decidido realizar la simulación con una racha de viento de 126 km/h. Esta magnitud de viento es bastante alta, pero se ha preferido realizar la simulación con una condición más desfavorable para ver cómo se comporta el telégrafo óptico.

Por lo tanto, se trabajará con una velocidad el viento de 126 km/h (35 m/s) y una densidad del aire de 1,225 kg/m³. Aplicando la ecuación (1) y pasando las unidades a MPa resulta:

$$p = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 35^2 = 750,3125 \frac{kg}{m \cdot s^2} \cdot \frac{m}{m} \left(\frac{N}{m^2} \right) (Pa) = \mathbf{0,0007503125 MPa}$$

Esta magnitud de presión se debe introducir en el programa junto con las caras a las cuales se le quiera aplicar dicha presión (Ilustración 64).

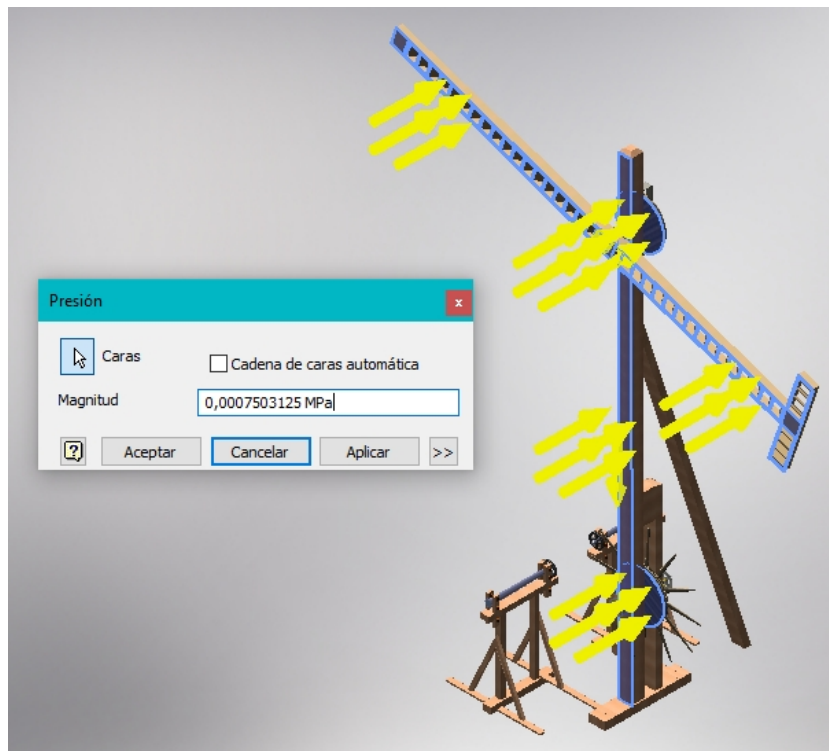


Ilustración 64. Aplicación de una carga de viento frontal sobre el telégrafo óptico.

Una vez introducidas la carga de viento, se ejecuta la simulación y se visualizan los resultados obtenidos.

4.2.2.1. Tensiones de Von Mises

Al igual que en la anterior simulación, casi todo el ensamblaje se encuentra sin tensionar (Ilustración 65). La tensión de von Mises máxima presenta un valor de 203,6 MPa y se localiza de nuevo en los tornillos flecha (18) (Ilustración 66). En cualquier caso, este valor tampoco supera el límite elástico del eje polea superior formado por hierro fundido.

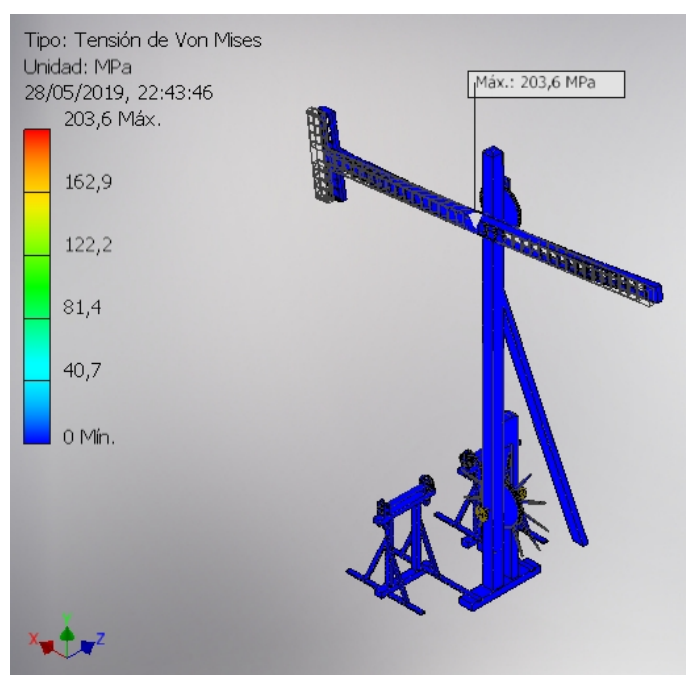


Ilustración 65. Distribución de tensiones de von Mises (Simulación 2).

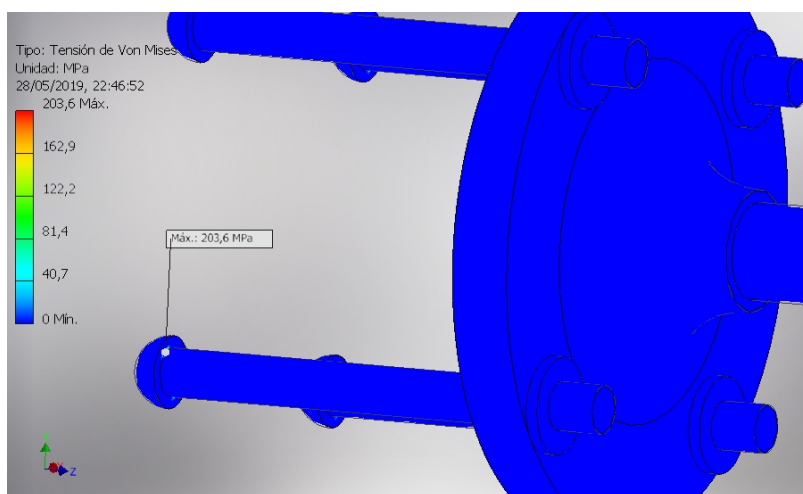


Ilustración 66. Localización de la máxima tensión de von Mises (Simulación 2).

4.2.2.2. Desplazamientos

Como era lógico pensar, con la carga de viento perpendicular a la flecha con una velocidad de 35 m/s, el desplazamiento en esta dirección ha crecido hasta un máximo de 15,01 mm. Así pues, la carga de viento ha conseguido que el desplazamiento máximo pase de 4,966 mm en la dirección de la acción de la gravedad hasta **15,01** mm en la dirección perpendicular al plano de la flecha (Ilustración 67).

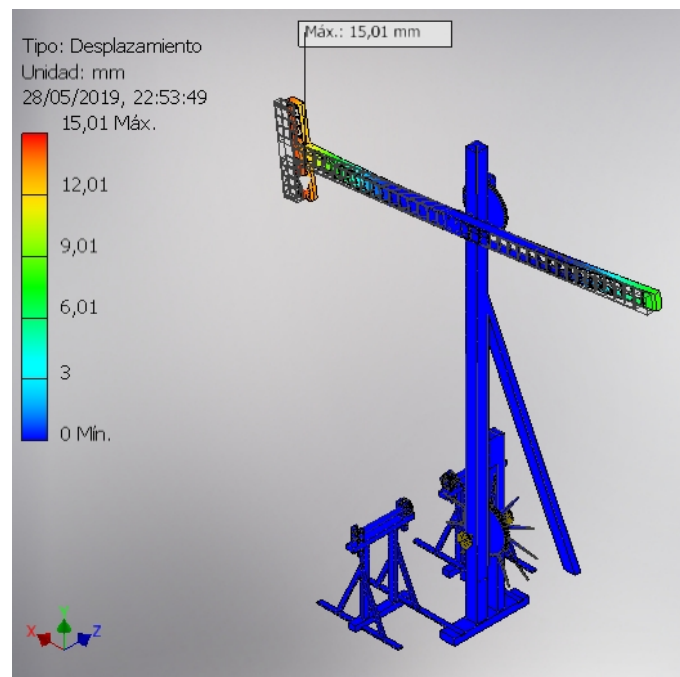


Ilustración 67. Distribución de desplazamientos (Simulación 2).

4.2.2.3. Deformaciones equivalentes

Al aumentar las cargas, se incrementan los desplazamientos, las tensiones y por lo tanto, también la deformación equivalente respecto a la simulación 1 (Ilustración 68). Aun así, la máxima deformación equivalente supone un 0,147 % que sigue siendo insignificante.

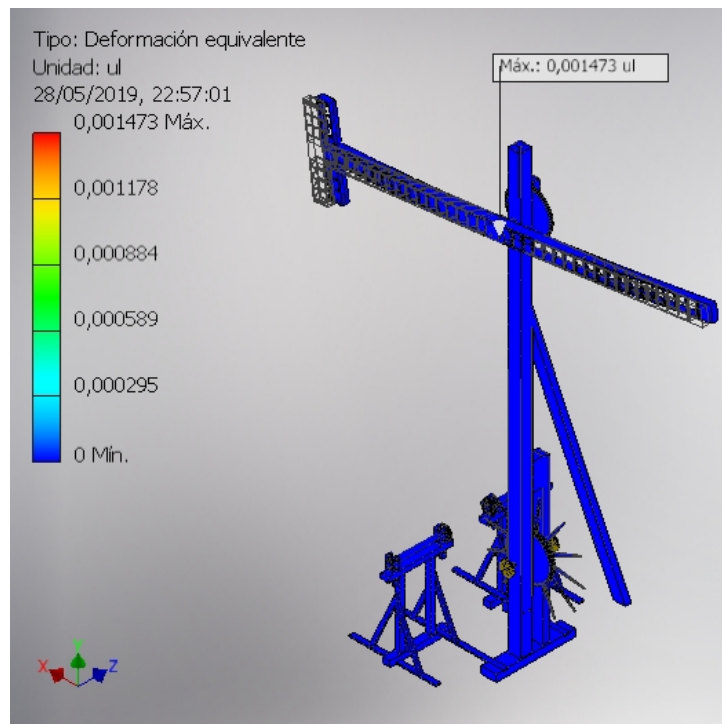


Ilustración 68. Distribución de deformaciones equivalentes (Simulación 2).

4.2.2.4. Coeficiente de seguridad

Respecto al coeficiente de seguridad, se puede observar que su valor mínimo ha bajado hasta 3,72 al aplicarle la carga de viento (Ilustración 69), que ya viene a estar en un rango de valores óptimo.

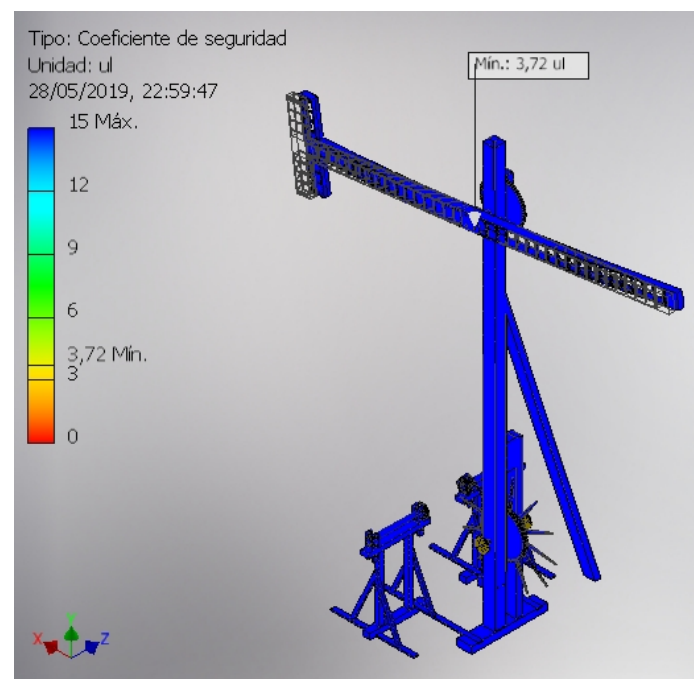


Ilustración 69. Distribución del coeficiente de seguridad (Simulación 2).

4.3. RECREACIÓN VIRTUAL

En este apartado se aborda el último objetivo del TFG, es decir, obtener una animación del telégrafo óptico en la que se muestre su funcionamiento. Para ello, como se mencionó anteriormente, se hará uso del entorno de Inventor Studio de Autodesk Inventor Professional 2016.

Así pues, para la animación se han creado 4 cámaras, de manera que se pueda visualizar la animación desde varios ángulos y, de esa forma, obtener un mayor detalle (Ilustración 70):

- Cámara mecanismo: se trata de una cámara fija que muestra con detalle la transmisión del movimiento del eje al mecanismo de tornillo sin fin.
- Cámara eje principal: es una cámara fija situada frente al eje principal para mostrar todo el juego de poleas que obliga a los telescopios a girar.
- Cámara flecha: es una cámara rotatoria desde la cual se puede observar la flecha con un mejor ángulo.
- Cámara telégrafo: desde esta cámara se puede observar toda la perspectiva del telegráfico óptico. Es una cámara en rotación como la cámara flecha.

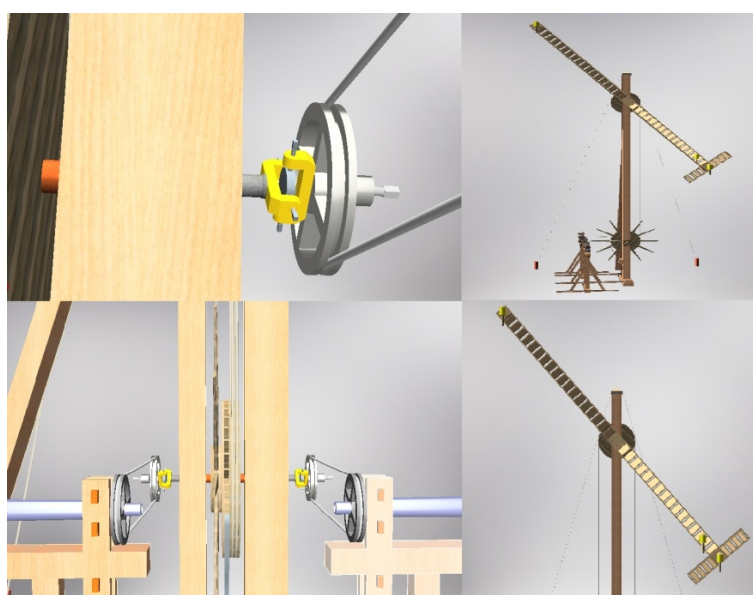


Ilustración 70. Objetivos de las diferentes cámaras.

Con respecto a los estilos de iluminación se ha optado por “Fotomatón”, uno de los muchos estilos que se encuentran en la biblioteca del programa (Ilustración 71).

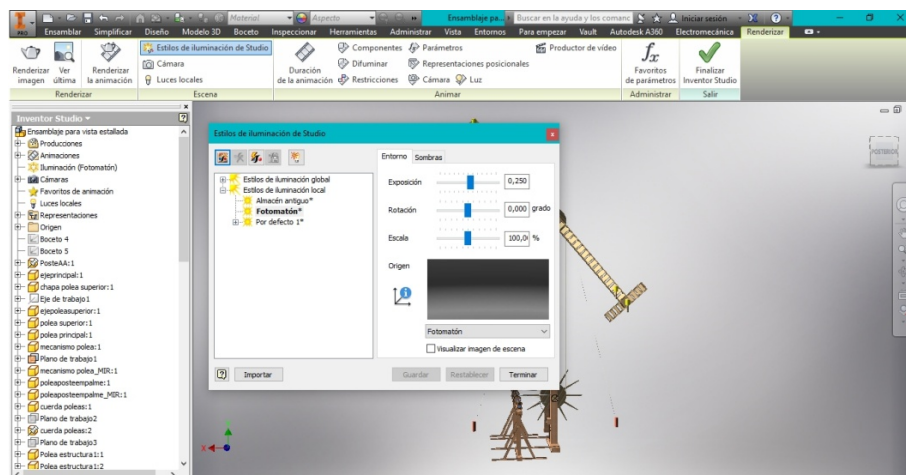


Ilustración 71. Elección del estilo de iluminación.

Para crear la animación, se le ha asignado un movimiento de tipo rotacional a los siguientes componentes: flecha, polea superior, polea principal, eje principal, eje polea superior, poleas estructuras, pieza empalme y tornillo sin fin. Todos los elementos tienen la misma relación de rotación entre ellos, y cada elemento da 10 revoluciones en 60 s. En la Ilustración 72 se muestra la determinación de los parámetros del eje polea superior. Este proceso se deberá de realizar con cada componente a rotar, variando según el caso el sentido de giro en cada uno de ellos.

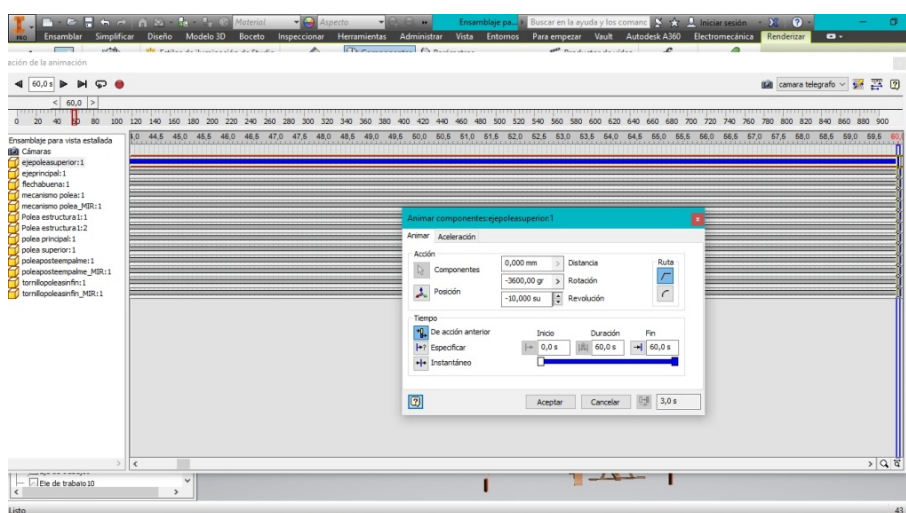


Ilustración 72. Parámetros de animación del eje polea superior.

Con el comando “Duración de la animación”, se ordenan todas las animaciones de cada componente y se controlan las cámaras, y con todo ello, se puede aproximar un tiempo de video de 60 s (Ilustración 73).

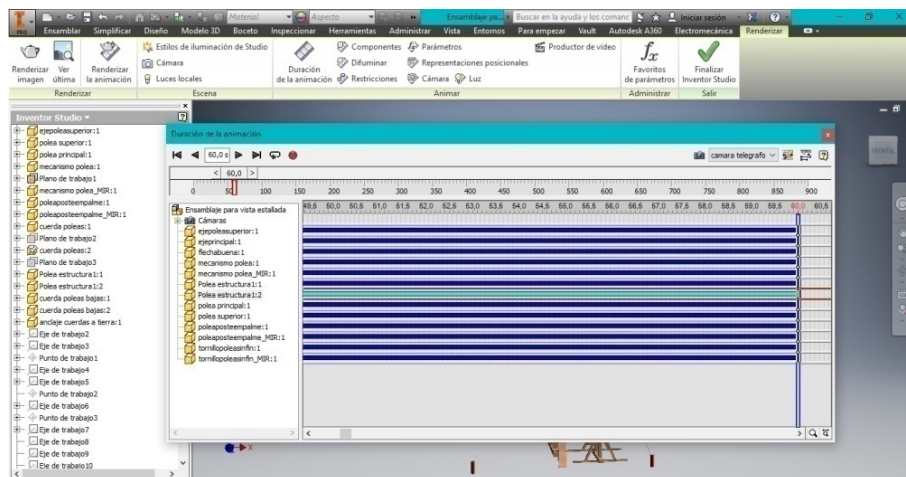


Ilustración 73. Panel del comando “Duración de la animación”.

Para finalizar, con el comando “Productor de video”, se crea un video jugando con cada una de las cámaras. Posteriormente se deberá seleccionar la opción de grabar video para comenzar el renderizado, fijando los parámetros de éste. Aunque se recomienda usar una velocidad de imagen de 25 fps (frames per second), debido a limitaciones computacionales, se ha seleccionado una velocidad de imagen de 20 fps, renderizando por iteración con un filtrado de imagen (anti-aliasing) de tipo Gaussiano con una anchura de 5 (Ilustración 74).

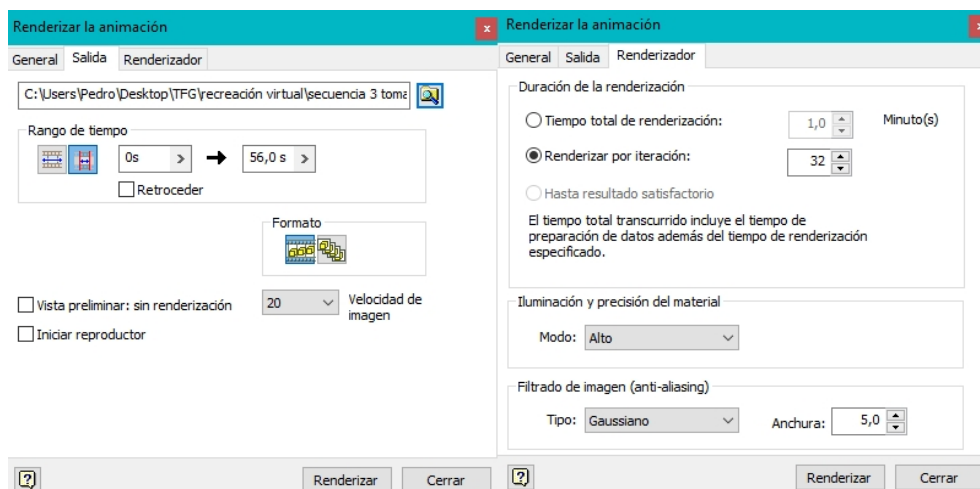


Ilustración 74. Opciones de renderizado para la animación.

Asimismo, y debido a motivos computacionales, se ha optado por dividir el video en 4 pequeñas tomas, en la que cada una de ellas corresponde a la grabación de una cámara diferente. Una vez renderizada cada una de las tomas se une mediante un software de montaje de videos, aplicando algunas transiciones entre escenas de cada cámara.

Así se han obtenido 4 archivos con extensión .wmv (Windows Media Video) que unidos convenientemente para generar un único video y convertido a formato .mp4 han generado un archivo de tamaño 4,62 MB que muestra la recreación virtual de su funcionamiento.

5. CONCLUSIONES

En lo relativo a la documentación geométrica obtenida, se puede afirmar que las medidas obtenidas en el TFG pueden no ser con total exactitud las medidas originales del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina por varios motivos: debido a un error en el documento original [6] a la hora de plasmar sobre el papel las diferentes vistas, o a un error en la exactitud de la diferentes escalas de los planos del documento original, y debido también a un error en la extracción de las medidas mediante herramientas euclidianas. Sin embargo, a pesar de todos estos inconvenientes, se puede decir que el modelo CAD 3D obtenido es una copia lo más exacta que las herramientas disponibles han permitido y sobre el que se pueden realizar análisis bastantes fiables.

Asimismo, se ha realizado un análisis estático por elementos finitos, asumiendo el caso más desfavorable de cargas aplicadas por defecto sobre el telégrafo óptico que corresponde aparte de la acción de la gravedad, a la situación en la que el telégrafo óptico pare su movimiento de rotación de manera repentina, de manera que la flecha provoque un momento aplicado en el eje de la polea superior (Simulación 1). Si además de estas cargas se le añade una carga de viento (Simulación 2), se tendría la situación más desfavorable de todas.

Desde el punto de vista del análisis CAE se ha podido comprobar, a pesar de las hipótesis de cargas que se han añadido, que el telégrafo óptico aguanta muy bien los esfuerzos estando muy lejos de alcanzar su límite elástico, siendo la tensión de Von Mises máxima entre las dos simulaciones, la ejercida sobre los tornillos flecha (18) con un valor de 203,6 MPa muy lejos de los 758 MPa de su tensión de rotura. De la misma forma, los desplazamientos y deformaciones producidas son insignificantes, aunque en el caso en el que actúa la carga de viento (Simulación 2), cuadriplican a los resultados obtenidos en ausencia de viento (Simulación 1).

Asimismo, con respecto al coeficiente de seguridad, hay que decir que en el peor de los casos (Simulación 2) alcanzaría un valor de 3,72 (dentro del intervalo de 2 a 4), lo que viene a ser adecuado respecto al diseño, y no así en la Simulación 1 con valores de 15. Esto quiere decir que en el caso de ausencia de viento (Simulación 1), su diseño

estaría muy sobredimensionado, ya que en el siglo XVIII no se tenía el conocimiento técnico de hoy en día sobre temas relativos a la resistencia de materiales y, por lo tanto, todas las invenciones se realizaban sin ningún tipo de optimización si se atiende a las propiedades físicas del material.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Martín Medina, A., Martínez Navarro, F., Repetto Jiménez, E. (2006). *Biografías de Científicos Canarios: Agustín de Betancourt y Molina*. Editorial Dykinson.

[2] Olivé Roig, S. (1990). *Historia de la telegrafía óptica en España*. Ministerio de Transporte, Turismo y Comunicaciones.

[3] <http://fundacionorotava.es/betancourt/>

[4] Bahamonde, A., Martínez, G., Enrique Otero, L. (2002). *Las telecomunicaciones en España. Del telégrafo óptico a la sociedad de la información*. Ministerio de Ciencia y Tecnología.

[5] <http://www.museovirtual.cedex.es/>

[6] Betancourt, A., Breguet, A. (1797). *Mémoire sur un nouveau télégraphe et quelques idées sur la langue télégraphique*. Academia de las Ciencias de París. Disponible online: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/bregu_telegraph_fr_01_1797/

7. ANEXO: PLANOS

PLANO DE CONJUNTO

PLANO DE DETALLE 1

PLANO DE DETALLE 2

PLANO DE DETALLE 3

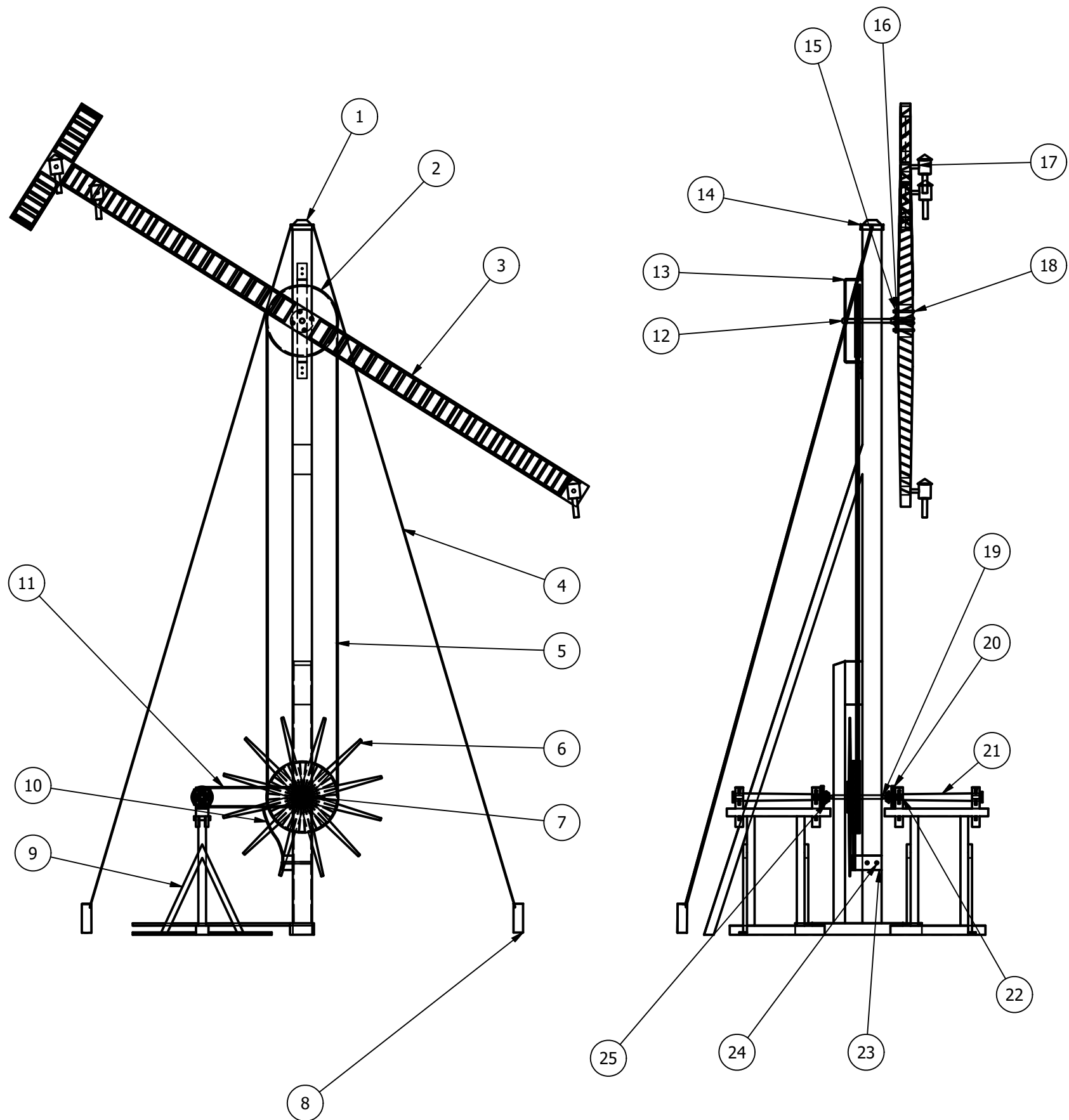
PLANO DE DETALLE 4

PLANO DE DETALLE 5

PLANO DE DETALLE 6

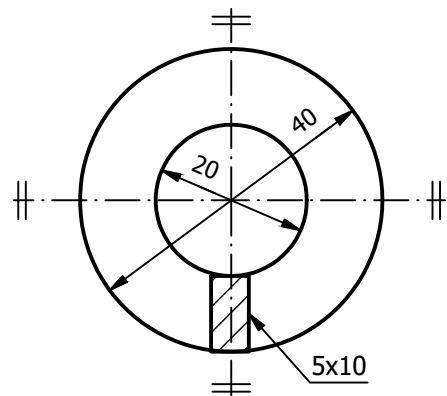
PERSPECTIVA ESTALLADA

PERSPECTIVA AXONOMÉTRICA ISOMÉTRICA

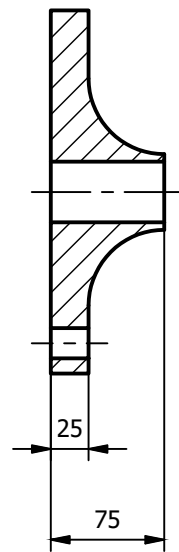
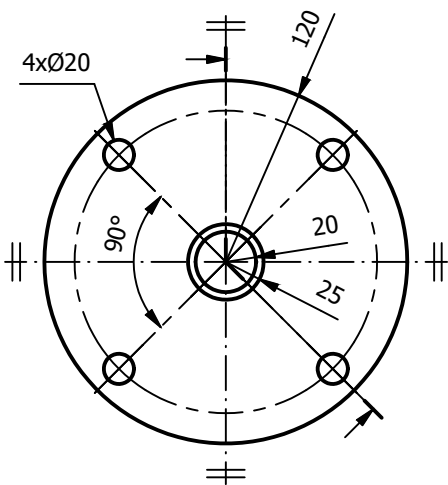


25	2	Tornillo sin fin	Hierro, fundido
24	2	Tornillo enganche muelle-poste vertical	Hierro, fundido
23	1	Enganche muelle-poste vertical	Madera (roble)
22	2	Tornillo polea sin fin	Hierro, fundido
21	2	Telescopios	Hierro, fundido
20	2	Poleas estructura telescopios	Hierro, fundido
19	1	Eje principal	Hierro, fundido
18	4	Tornillo flecha	Hierro, fundido
17	3	Linternas	Madera (roble)
16	1	Empalme eje-flecha	Hierro, fundido
15	4	Tuerca	Hierro, fundido
14	1	Chapa sujeción poste a anclaje tierra	Hierro, dúctil
13	1	Chapa polea superior	Hierro, fundido
12	1	Eje polea superior	Hierro, dúctil
11	2	Cuerda poleas bajas	Caucho, natural
10	1	Resorte indicador	Hierro, dúctil
9	2	Estructura telescopios	Hierro, fundido
8	2	Puntal de anclaje	Hierro, fundido
7	2	Pieza enganche a polea	Hierro, fundido
6	1	Polea principal y cabrestante	Hierro, fundido
5	2	Cuerda polea principal empalme superior	Caucho, natural
4	2	Cuerda anclaje	Caucho, natural
3	1	Flecha	Madera (roble)
2	1	Polea superior	Madera (roble)
1	1	Poste vertical	Madera (roble)
Marca	Cantidad	Denominación	Material
Dibujado		Pedro Jesús Pancorbo Rico	Trabajo Final del Grado en Ingeniería Mecánica
Comprobado		Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola	Modelado tridimensional, documentación geométrica, recreación virtual y análisis estático del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina
Fecha		Mayo 2019	
Escala		Plano de conjunto	
1:50		Plano N° 1/9	

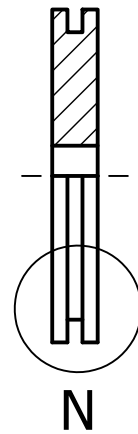
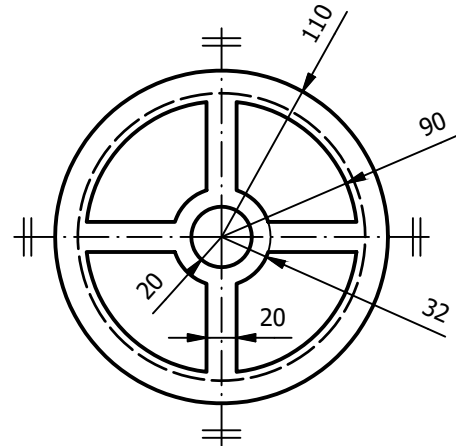
15 Escala 1:1



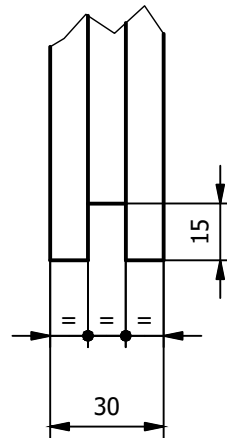
16 Escala 1:5



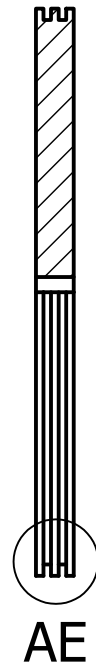
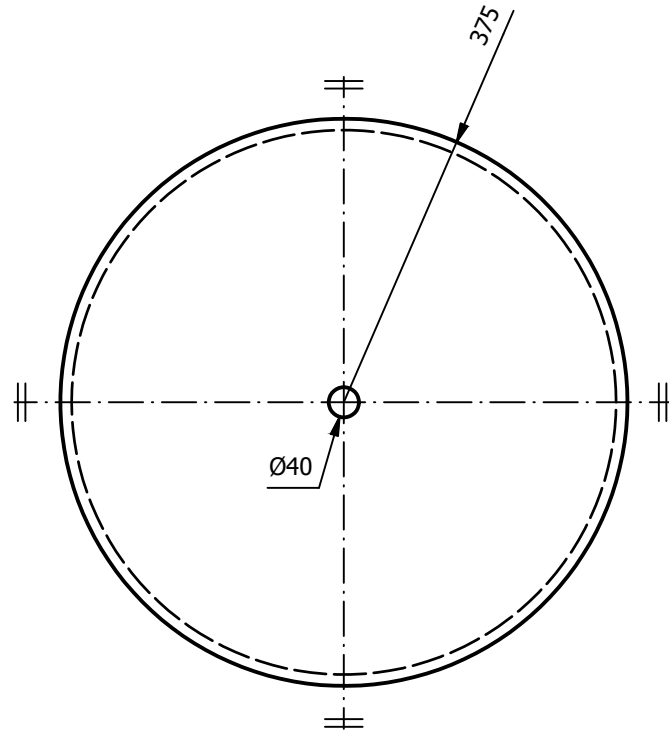
20 Escala 1:5



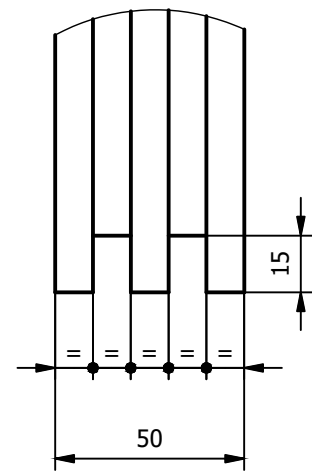
Detalle N (1:2)



2 Escala 1:10

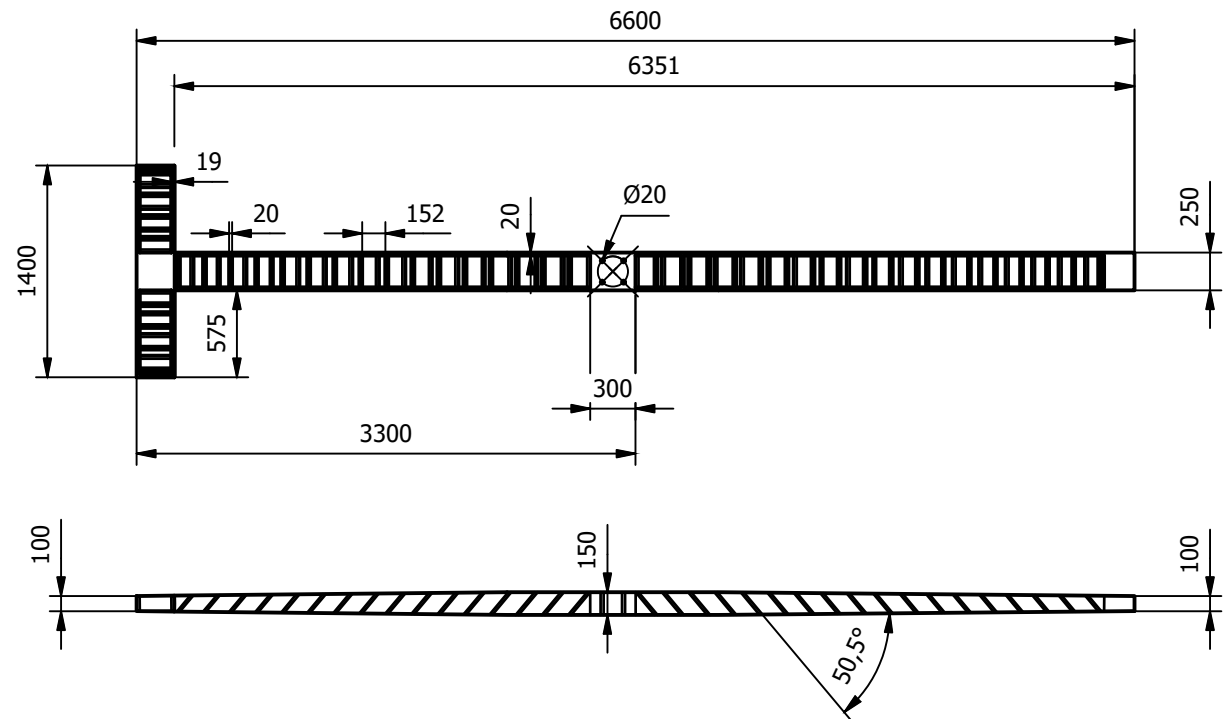


Detalle AE (1:2)

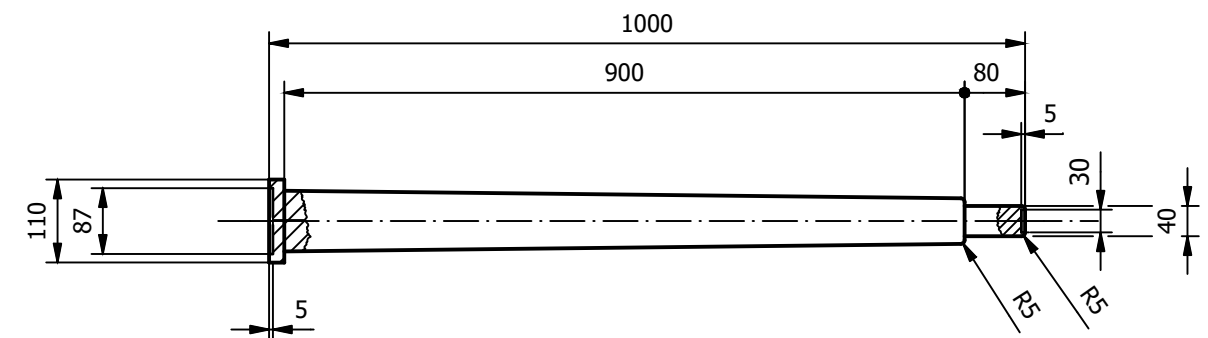


Dibujado	Pedro Jesús Pancorbo Rico	Trabajo Final del Grado en Ingeniería Mecánica	
Comprobado	Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola	Modelado tridimensional, documentación geométrica, recreación virtual y análisis estático del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina	
Fecha	Mayo 2019		
Escala	1:1 1:2 1:5	Plano de detalle de las marcas: 2-15-16-20	Plano N° 2/9

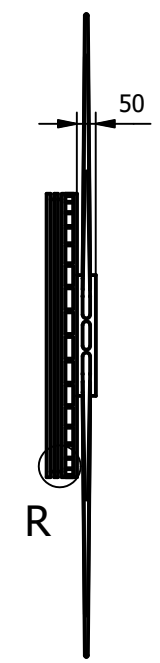
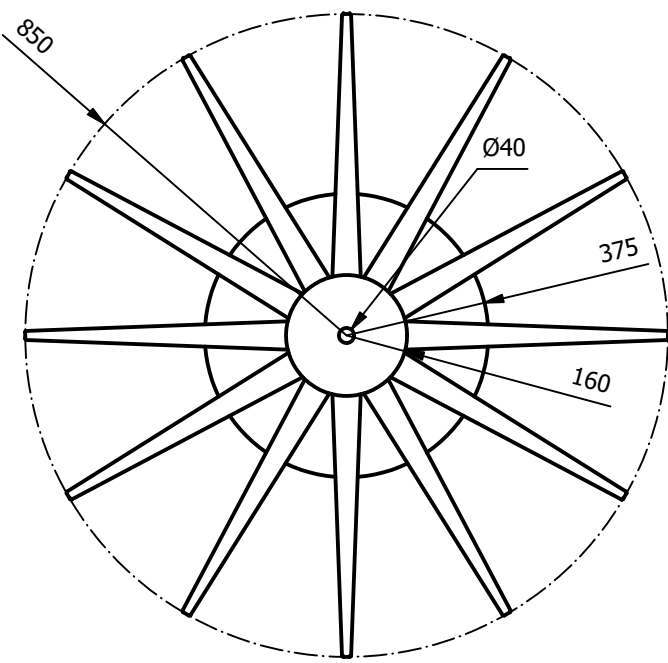
3 Escala 1:50



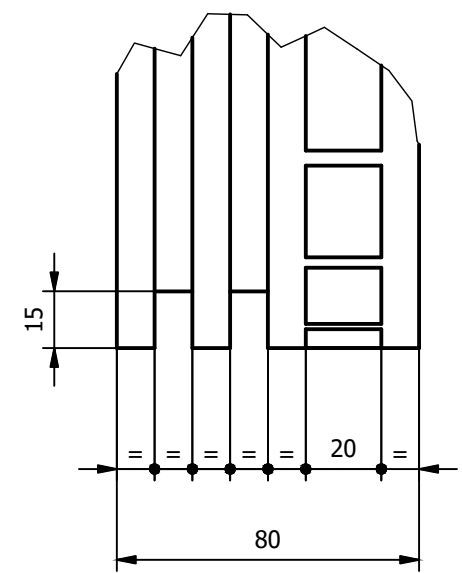
21 Escala 1:10



6 Escala 1:20

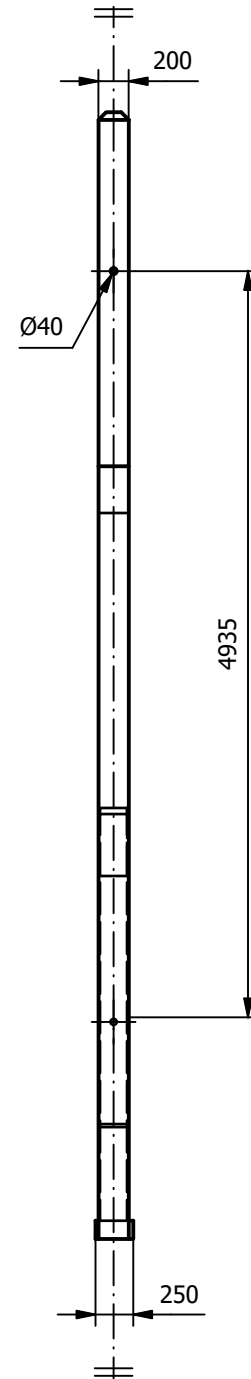
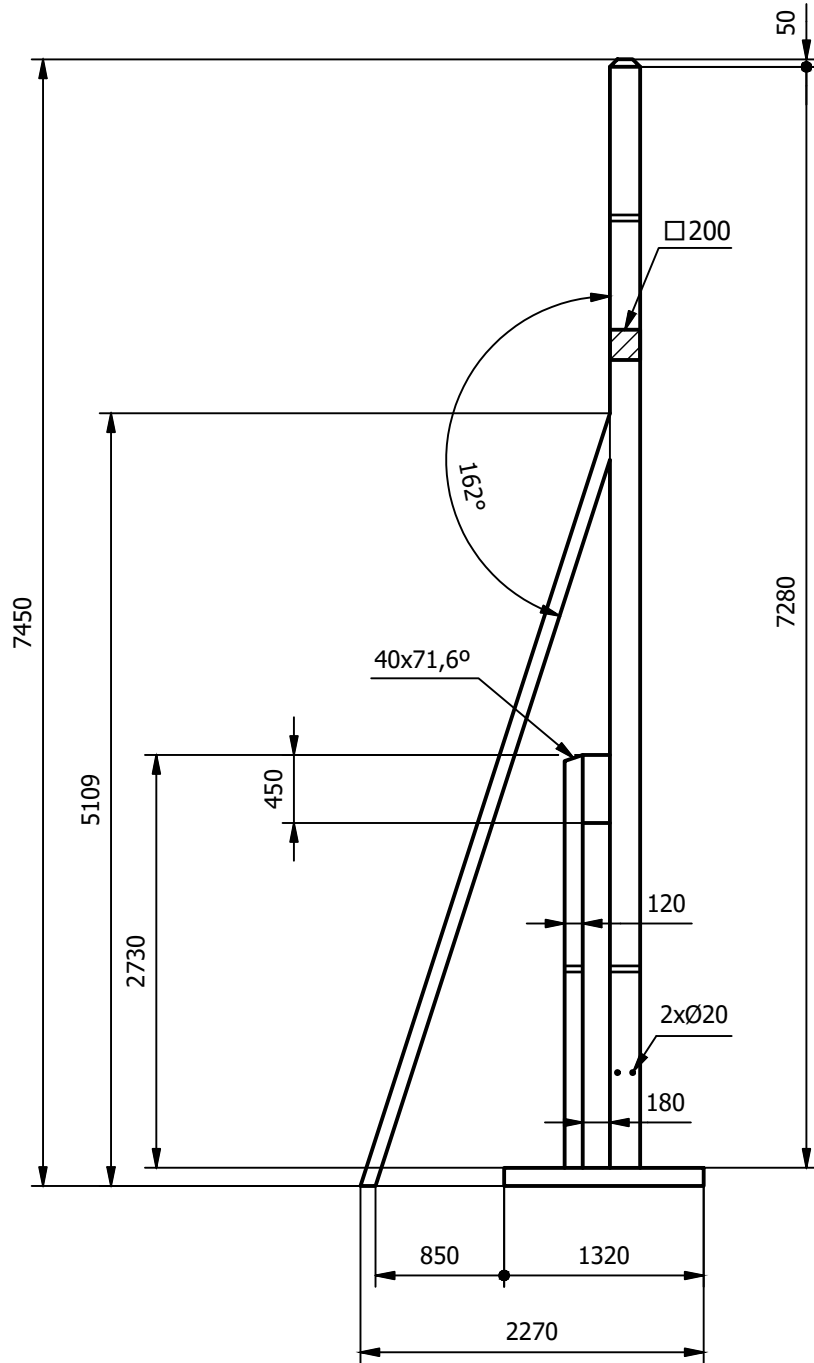


Detalle R (1:2)

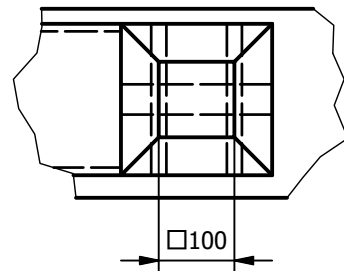
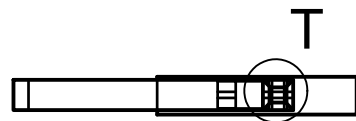


Dibujado	Pedro Jesús Pancorbo Rico	Trabajo Final del Grado en Ingeniería Mecánica	
Comprobado	Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola	Modelado tridimensional, documentación geométrica, recreación virtual y análisis estático del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina	
Fecha	Mayo 2019		
Escala 1:2 1:10 1:20 1:50	Plano de detalle de las marcas: 3-6-21		Plano N° 3/9

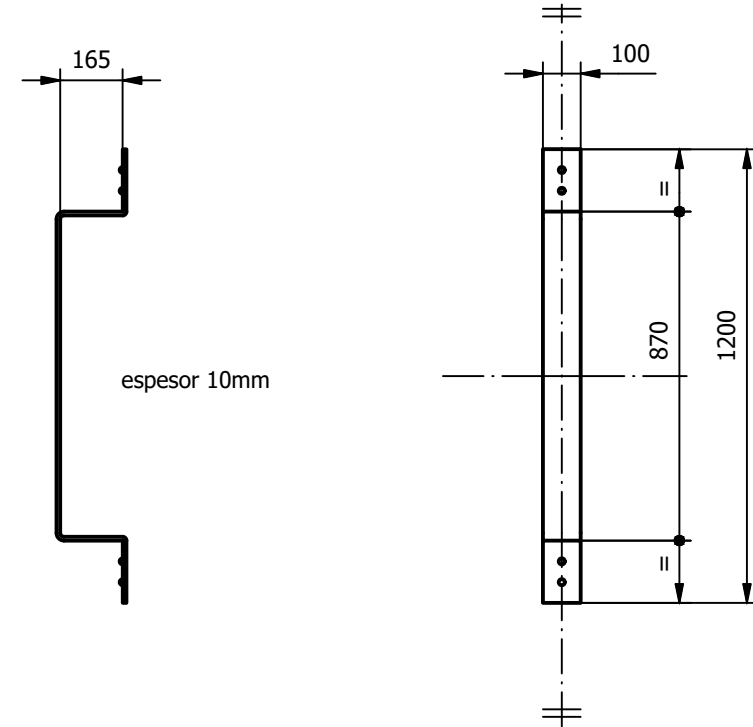
1 Escala 1:50



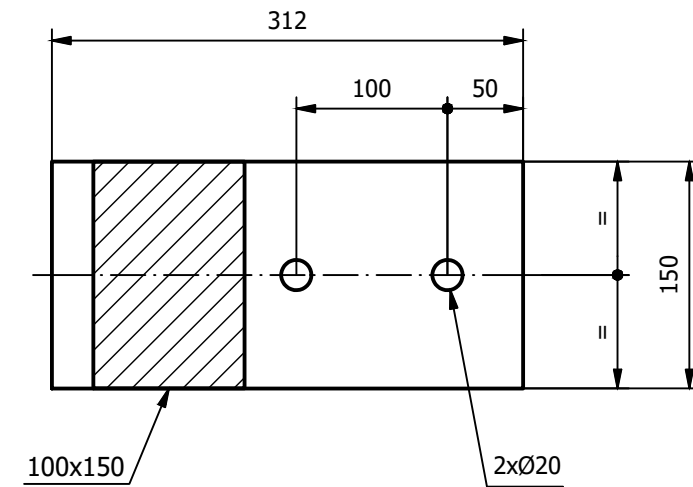
Detalle T (1:10)



13 Escala 1:20

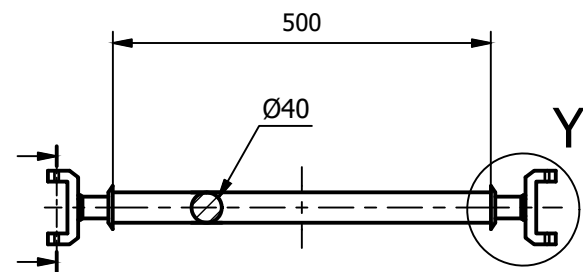


23 Escala 1:5

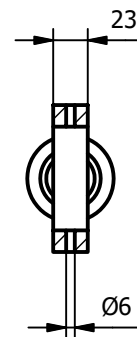


Dibujado	Pedro Jesús Pancorbo Rico	Trabajo Final del Grado en Ingeniería Mecánica	
Comprobado	Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola	Modelado tridimensional, documentación geométrica, recreación virtual y análisis estático del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina	
Fecha	Mayo 2019		
Escala	1:5 1:20 1:50	Plano de detalle de las marcas: 1-13-23	Plano N° 4/9

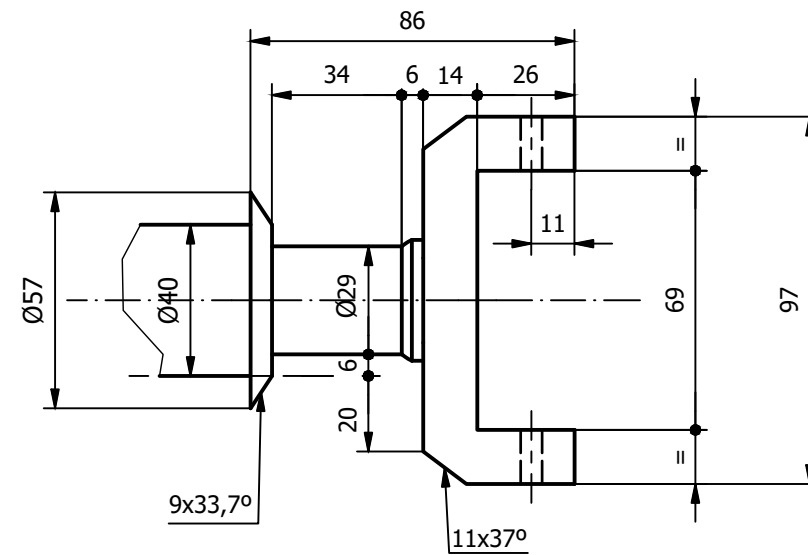
19 Escala 1:10



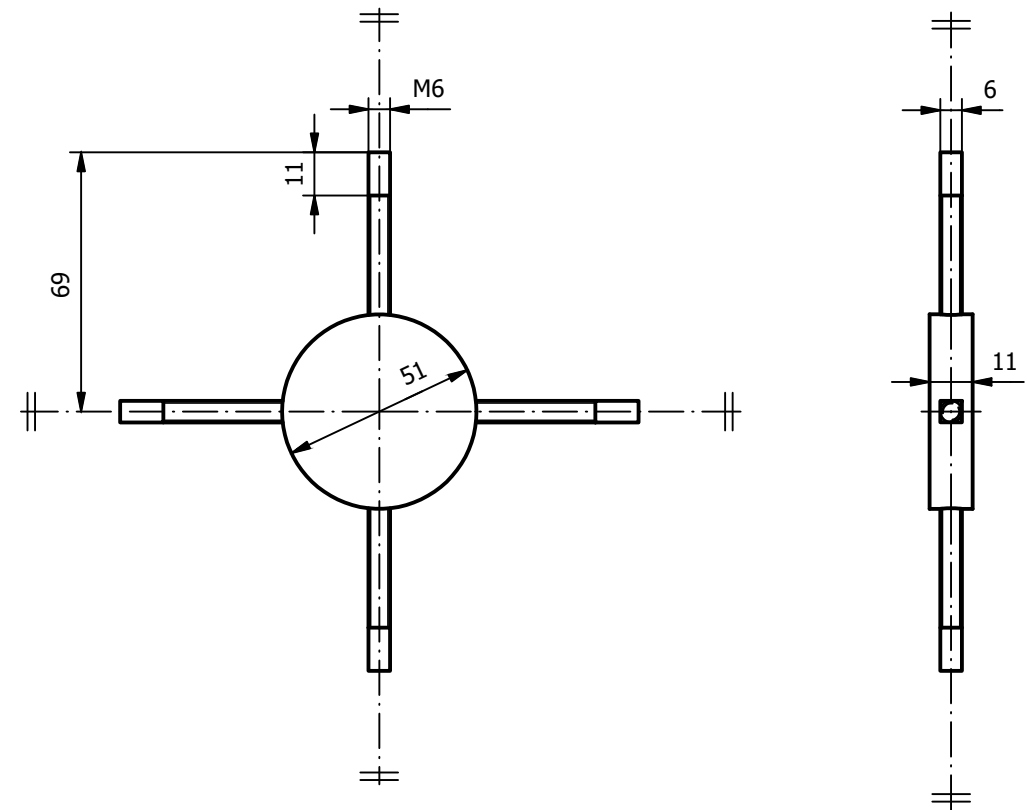
(1:5)



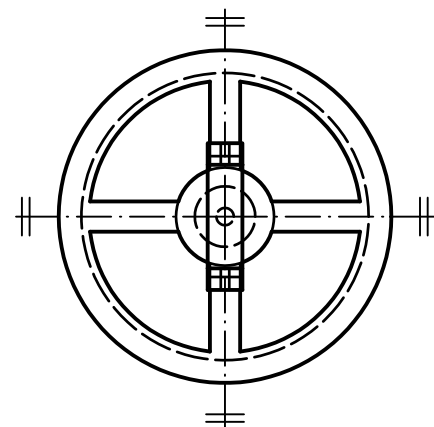
Detalle Y (1:2)



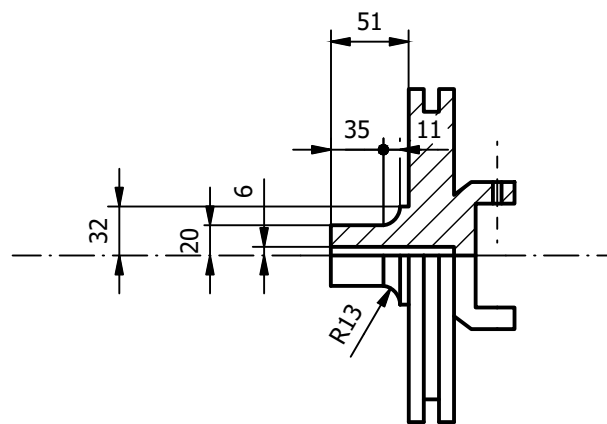
25 Escala 1:2



7 Escala 1:5

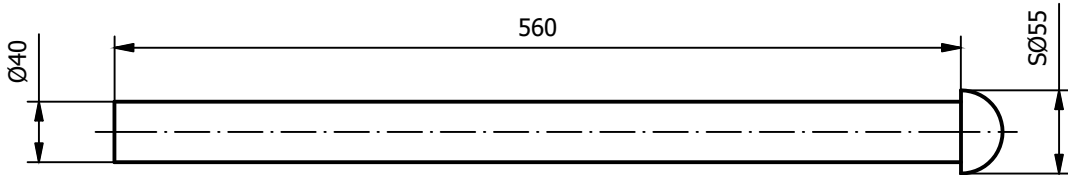


(1:5)

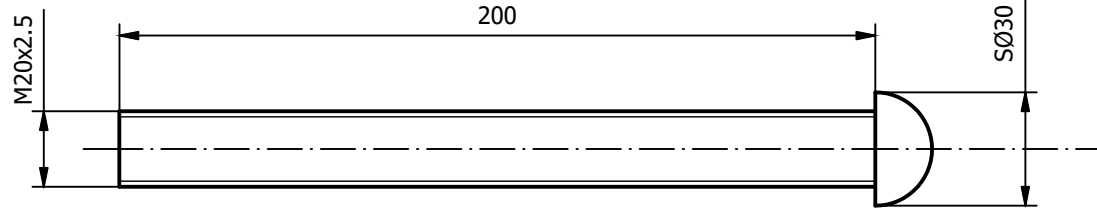


Dibujado	Pedro Jesús Pancorbo Rico	Trabajo Final del Grado en Ingeniería Mecánica	
Comprobado	Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola	Modelado tridimensional, documentación geométrica, recreación virtual y análisis estático del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina	
Fecha	Mayo 2019		
Escala 1:2 1:5 1:10	Plano de detalle de las marcas: 7-19-25		Plano N° 5/9

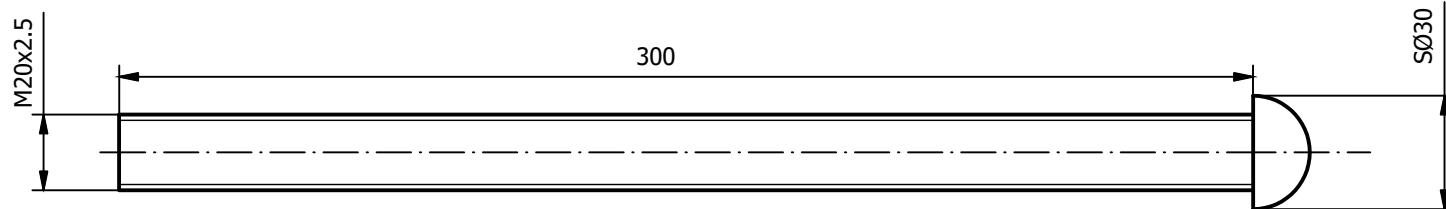
12 Escala 1:5



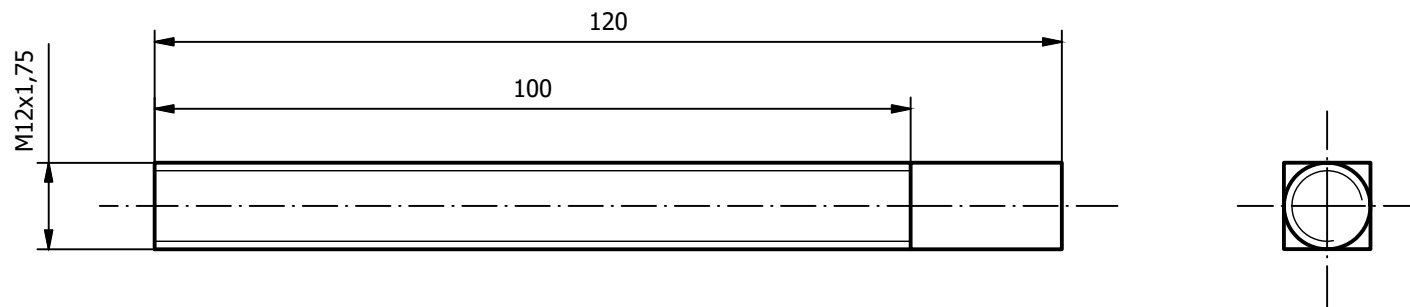
18 Escala 1:2



24 Escala 1:2

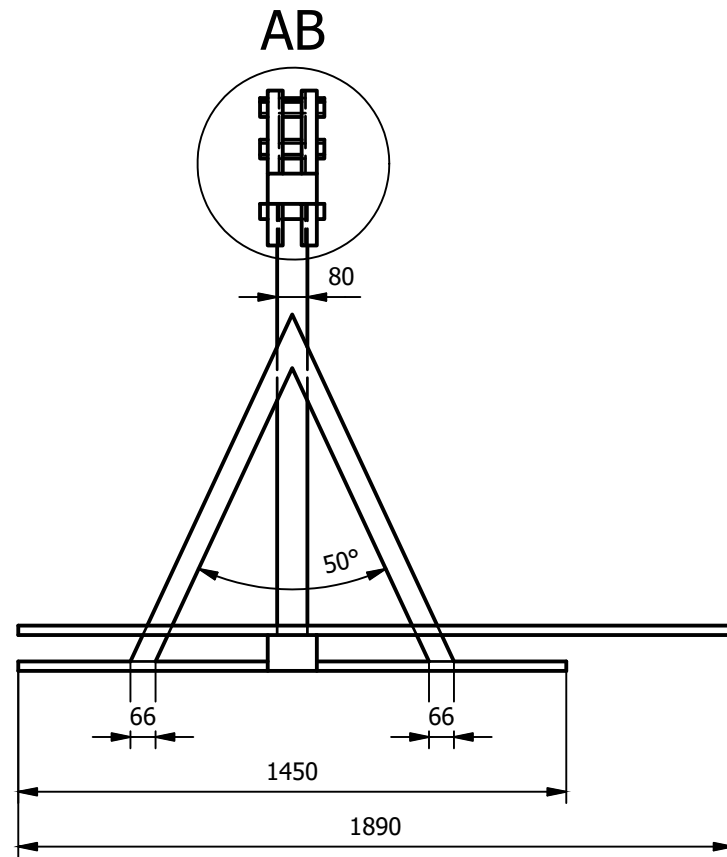
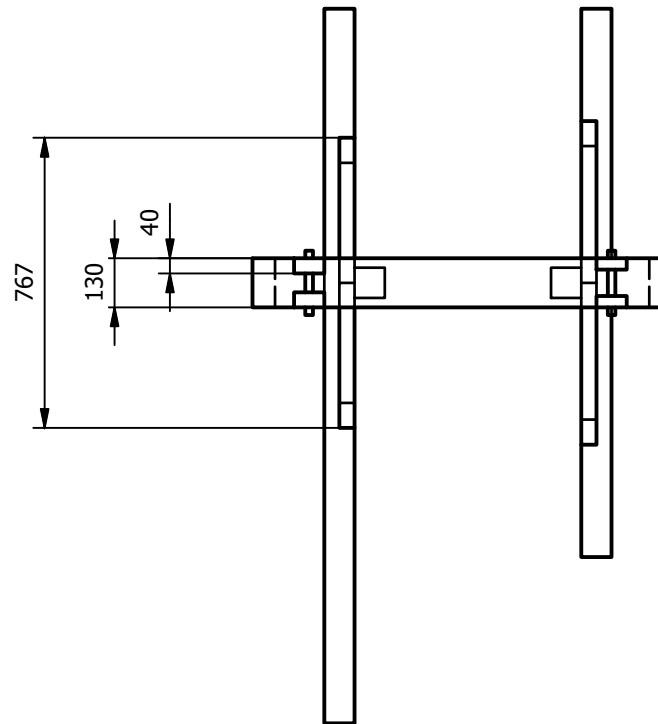
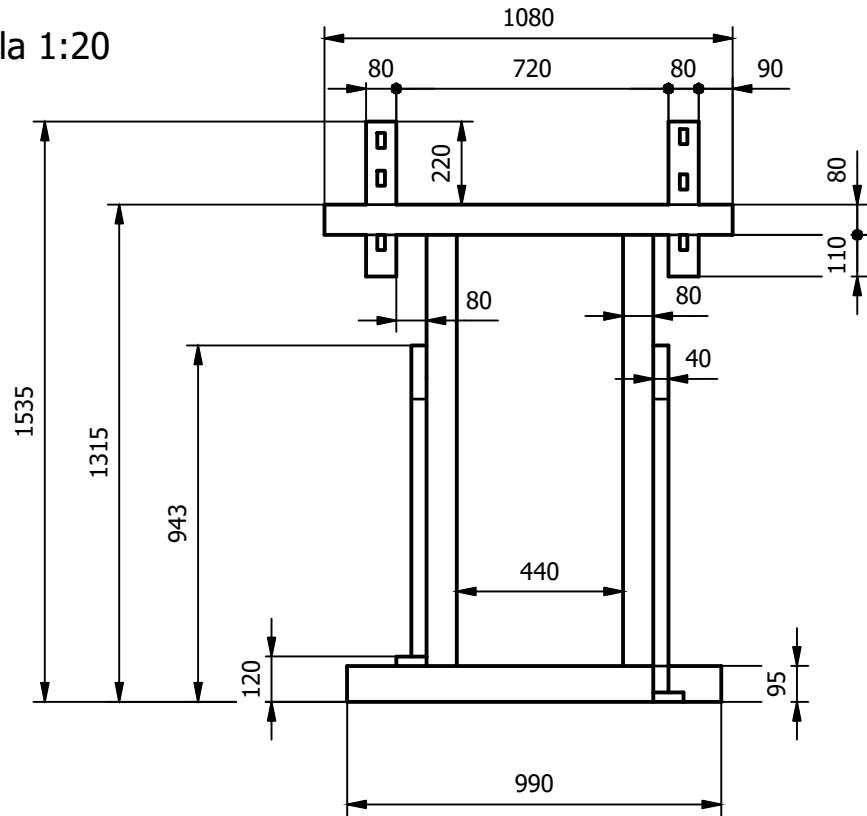


22 Escala 1:1

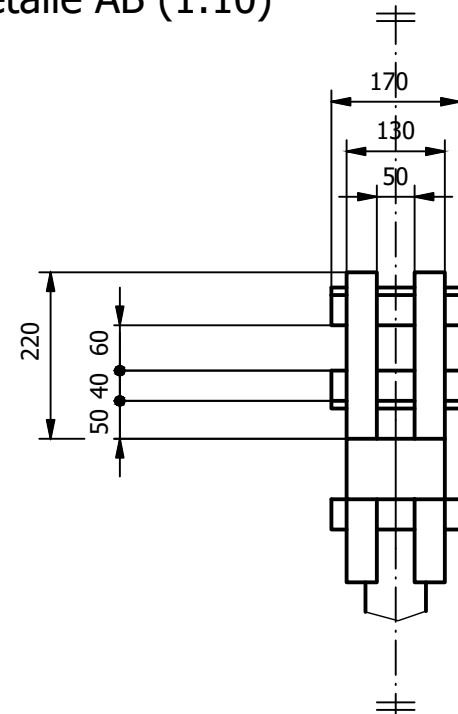


Dibujado	Pedro Jesús Pancorbo Rico	Trabajo Final del Grado en Ingeniería Mecánica	
Comprobado	Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola	Modelado tridimensional, documentación geométrica, recreación virtual y análisis estático del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina	
Fecha	Mayo 2019		
Escala 1:1 1:2 1:5	Plano de detalle de las marcas: 12-18-22-24		Plano N° 6/9

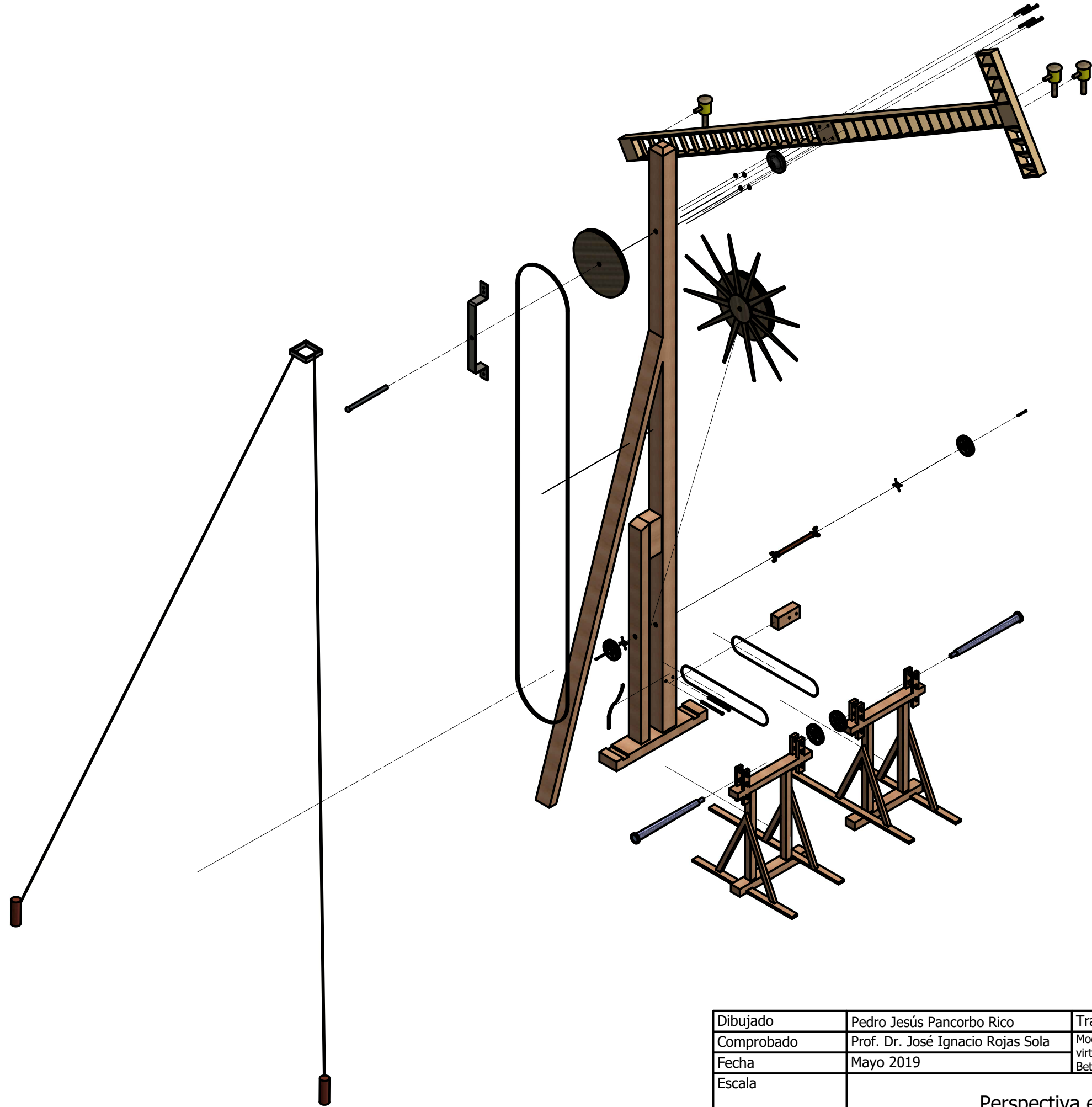
9 Escala 1:20



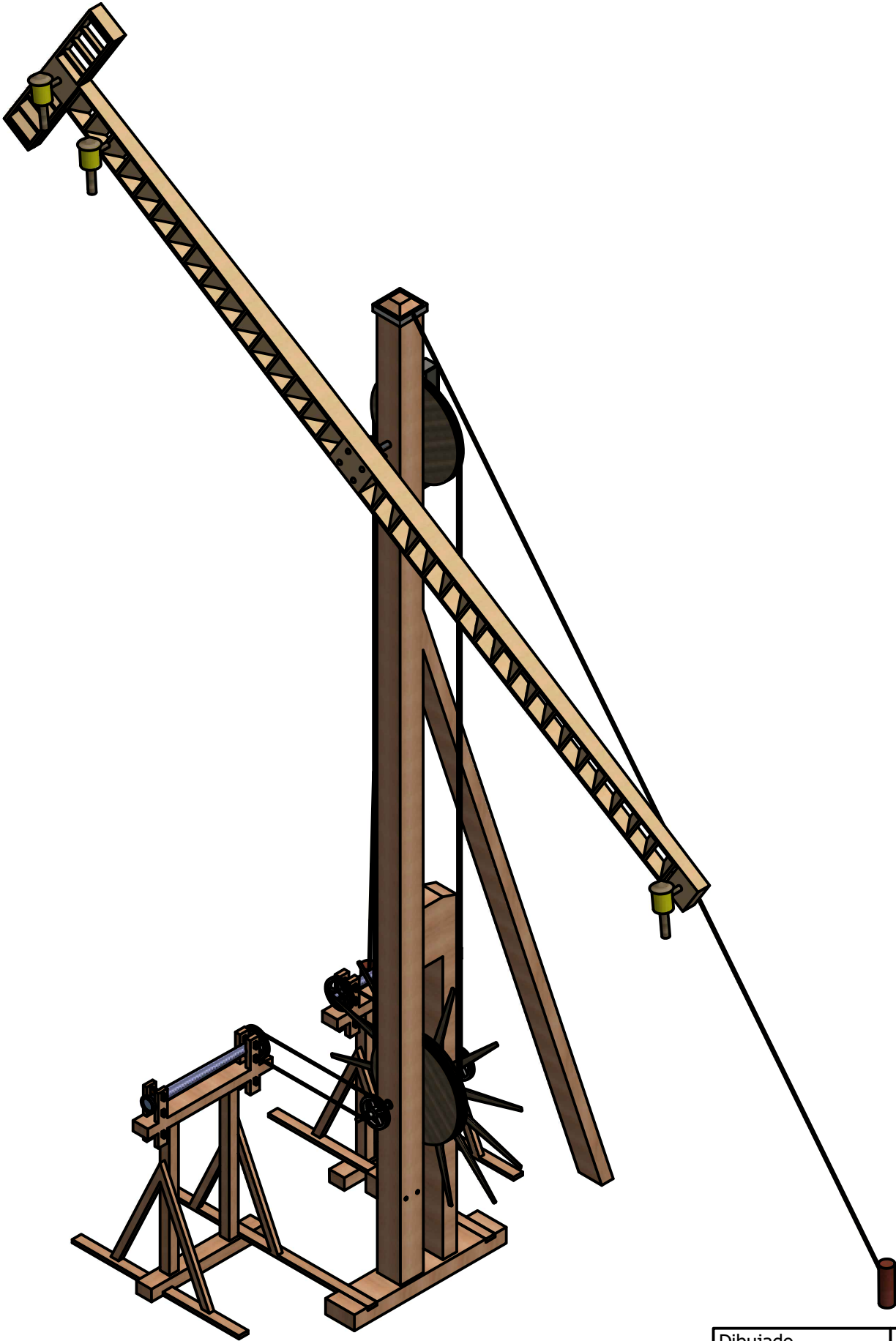
Detalle AB (1:10)



Dibujado	Pedro Jesús Pancorbo Rico	Trabajo Final del Grado en Ingeniería Mecánica	
Comprobado	Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola	Modelado tridimensional, documentación geométrica, recreación virtual y análisis estático del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina	
Fecha	Mayo 2019		
Escala 1:10 1:20	Plano de detalle de la marca 9		Plano N° 7/9



Dibujado	Pedro Jesús Pancorbo Rico	Trabajo Final del Grado en Ingeniería Mecánica	
Comprobado	Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola	Modelado tridimensional, documentación geométrica, recreación virtual y análisis estático del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina	
Fecha	Mayo 2019		
Escala	Perspectiva estallada		Plano N° 8/9



Dibujado	Pedro Jesús Pancorbo Rico	Trabajo Final del Grado en Ingeniería Mecánica	
Comprobado	Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola	Modelado tridimensional, documentación geométrica, recreación virtual y análisis estático del telégrafo óptico de Agustín de Betancourt y Molina	
Fecha	Mayo 2019		
Escala	Perspectiva axonométrica isométrica		Plano N° 9/9