



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA EL DISEÑO Y
FABRICACIÓN DE ARCOS DE POLEAS**

Autor: Albiol Hernández, David
Tutor: Rubio Montoya, Francisco José

Valencia, Julio 2017

Resumen

En el presente trabajo de investigación, se ha realizado una simulación de las fases de diseño y desarrollo de un arco de poleas. Debido a la complejidad de los arcos de poleas y de su diseño, es necesaria la utilización de una gran variedad de conocimientos adquiridos en el grado de Ingeniería Mecánica.

Tras un estudio previo al diseño del arco para determinar las características de este con el fin de poder conseguir un diseño óptimo y su correspondiente verificación de las especificaciones del proyecto; también se exponen los conceptos a tener en cuenta para hacer un posible rediseño y mejorar las características de los arcos de poleas a partir de las pruebas realizadas.

Para este trabajo solo se hará un estudio teórico. No se fabricará ningún componente del prototipo y, por lo tanto, tampoco se realizará ninguna prueba real. Solo se explicarán los procedimientos para poder ser llevado a cabo.

Abstract

In the present research work, a simulation of the design and development phases of a pulley arc was carried out. Due to the complexity of the pulley arches and their design, it is necessary to use a great variety of knowledge acquired in the degree of Mechanical Engineering.

After a study before the design of the arc to determine the characteristics of this in order to be able to achieve an optimum design and its corresponding verification of the specifications of the project; Also the concepts to be taken into account to make a possible redesign and improve the characteristics of the pulley arches from the tests performed.

For this work only a theoretical study will be done. No component of the prototype will be manufactured and, therefore, no actual test will be performed. Only the procedures to be carried out will be explained.

Resum

En el present treball de recerca, s'ha realitzat una simulació de les fases de disseny i desenvolupament d'un arc de politges. A causa de la complexitat dels arcs de politges i del seu disseny, és necessària la utilització d'una gran varietat de coneixements adquirits en el grau d'Enginyeria Mecànica.

Després d'un estudi previ al disseny de l'arc per determinar les característiques d'aquest per tal de poder aconseguir un disseny òptim i la seva corresponent verificació de les especificacions del projecte; també s'exposen els conceptes a tenir en compte per fer un possible redisseny i millorar les característiques dels arcs de politges a partir de les proves realitzades.

Per a aquest treball només es farà un estudi teòric. No es fabricarà cap component del prototip i, per tant, tampoc es realitzarà cap prova real. Només s'explicaran els procediments per poder ser dut a terme.

Palabras clave

- Diseño
- Arco de poleas
- Prototipo
- Simulación

Documento 1:

Memoria

Índice de la Memoria

Capítulo 1. Definición del Trabajo	1
1.1. Objetivos del Trabajo	1
1.2. Delimitación del Objeto de Estudio	1
1.3. Plan de Trabajo y Estructura Documental	2
1.4. Medios Empleados para la Elaboración del Trabajo.....	2
1.5. Justificación de la Elección del Tema del Trabajo.....	4
1.6. Justificación de las Asignaturas del Grado Utilizadas	4
Capítulo 2. Conceptos Básicos para el Diseño de Arcos	7
2.1. Datos de Interés sobre los Arcos.....	7
2.2. Historia y Evolución de los Arcos	9
2.3. Otras Armas Derivadas de los Arcos	11
2.4. Conceptos para Determinar las Características de los Arcos.....	13
2.4.1. Curvas de potencia	15
2.4.2. Rendimientos de los arcos	17
2.5. Estudio del Funcionamiento de los arcos convencionales	19
2.5.1. Diferencias entre el modelo teórico y los arcos convencionales reales	19
2.5.2. Partes y geometría de interés del modelo teórico.....	20
2.5.3. Fuerzas de interés del modelo teórico	23
2.5.4. Variables de diseño. Datos previos a los cálculos.....	24
Tabla 1 Datos iniciales para calcular la curva de potencia de un arco convencional	25
2.5.5. Relación entre las variables de diseño. Fórmulas.....	25

2.5.6. Parametrización de las fórmulas. Tabla de resultados	28
Tabla 2 Datos obtenidos con la hoja de cálculo.....	28
2.5.7. Obtención de la curva de potencia	29
2.5.8. Cálculo del rendimiento potencial.....	30
2.5.9. Cálculo del rendimiento cinemático.....	32
Tabla 3 Datos de las flechas disparadas para el cálculo de pérdidas energéticas	32
2.6. Estudio del Funcionamiento de los Arcos de Poleas	33
2.6.1. Diferencias entre el modelo teórico y los arcos de poleas reales	34
2.6.2. Partes y geometría de interés del modelo teórico.....	34
2.6.3. Fuerzas de interés del modelo teórico	37
2.6.4. Variables de diseño. Datos previos a los cálculos.....	39
Tabla 4 Datos iniciales para calcular la curva de potencia de un arco de poleas	40
2.6.5. Relación entre las variables de diseño. Fórmulas.....	40
2.6.6. Parametrización de las fórmulas. Tabla de resultados	43
Tabla 5 Datos obtenidos con la hoja de cálculo.....	44
2.6.7. Obtención de la curva de potencia	45
2.6.8. Cálculo del rendimiento potencial.....	45
2.6.9. Cálculo del rendimiento cinemático.....	46
2.7. Comparación entre los modelos de un arco convencional y de un arco de poleas	47
Capítulo 3. Método para el diseño y fabricación de arcos de poleas	51
3.1. Fases de Diseño y Fabricación de un Arco de Poleas	51

3.2. Fase 1. Análisis de los Componentes de los Arcos de Poleas.....	52
3.2.1. Componentes necesarios para fabricar un arco de poleas	53
3.2.2. Componentes opcionales y accesorios	63
3.3. Fase 2. Estudio del Mercado Actual de los Arcos de Poleas	67
3.3.1. Estudio de las características de distintos tipos de arcos.....	68
3.3.2. Estudio de distintos tipos de poleas.....	74
3.4. Fase 3. Modelo teórico y Cálculos para el Diseño de la Geometría de los Componentes.....	77
3.4.1. Cambios en el modelo teórico del arco de poleas. Poleas oblongas	77
3.4.3. Parámetros iniciales para el diseño del arco.....	81
3.4.3. Relación entre las variables de diseño. Formulas.....	83
3.4.4. Parametrización de las formulas. Tabla de resultados y curvas de potencia.	90
3.5. Fase 4. Diseño y Determinación de los Materiales de los Componentes.....	94
3.5.1. Cuerpo del arco	95
3.5.2. Palas.....	95
3.5.3. Poleas.....	96
3.5.4. Separables	96
3.5.5. Cuerda y cables	97
3.6. Fase 5. Procesos de Fabricación y Costes Aproximados de los Componentes.....	99
3.6.1. Cuerpo del arco	100
3.6.2. Palas.....	101
3.6.3. Poleas.....	101

3.6.4. Separables	102
3.6.5. Cuerda y cables	103
3.7. Fase 6. Ensayos para Determinar las Características Reales	103
Capítulo 4. Conclusiones	109
4.1. Método de Diseño Desarrollado en el Trabajo	109
4.2. Prototipo Diseñado Mediante el Método Desarrollado.....	109
4.3. Verificación del Método de Diseño Desarrollado.....	110
4.4. Mejora del Método y del Diseño del Arco.....	110
4.5. Valoración Personal	111
Bibliografía	113

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Arquero practicando el tiro con arco	7
Ilustración 2 Partes de una flecha	8
Ilustración 3 Arco recurvo. Partes	9
Ilustración 4 Arco compuesto de poleas. Modelo Hellbow Mirage	11
Ilustración 5 Ballesta antigua.....	12
Ilustración 6. Ballesta de poleas actual. Modelo Barnett Ghost 400	13
Ilustración 7 Curva de potencia de los arcos convencionales.....	15
Ilustración 8 Curva de potencia de los arcos de poleas	16
Ilustración 9 Obtención de datos para la definir la curva de potencia de un arco	16
Ilustración 10 Curva de potencia de los arcos de poleas comparada con la curva ideal.....	18
Ilustración 11 Curva de potencia de los arcos convencionales comparada con la curva ideal	17
Ilustración 12 Modelo teórico de un arco convencional. Partes y geometría	20
Ilustración 13 Modelo teórico de un arco convencional. Fuerzas	23
Ilustración 14 Curva de potencia obtenida a partir de la tabla de datos	30
Ilustración 15 Modelo teórico de un arco poleas. Geometría	35
Ilustración 16 Modelo teórico de un arco de poleas. Fuerzas.....	38
Ilustración 17 Curva de potencia del modelo teórico de un arco de poleas.....	45
Ilustración 18 Comparación de las curvas de potencia obtenidas de los modelos de arco convencional y de poleas	48
Ilustración 19 Tipos de cuerpos de los arcos	54
Ilustración 20 Polea.....	55
Ilustración 21 Tipos de poleas según su geometría y forma de la curva de potencia que desarrollan.....	55
Ilustración 22 Detalle de polea	57

Ilustración 23 Separables sin elementos rodantes (izquierda) y con ellos (derecha)	58
Ilustración 24 Composición de las palas de un arco de poleas	59
Ilustración 25 Union entre las palas y el cuerpo del arco	59
Ilustración 26 Carrete de hilo para fabricar cuerdas	62
Ilustración 27 Cuerda para arco	63
Ilustración 28 Silenciadores para arcos.....	64
Ilustración 29 Ubicación de los silenciadores.....	64
Ilustración 30 Mira para caza.....	65
Ilustración 31 Mira para tiro con arco.....	65
Ilustración 32 Arco con estabilizador	66
Ilustración 33 Reposaflechas simple.....	66
Ilustración 34 Reposaflechas de altas prestaciones	67
Ilustración 35 Nock point.....	67
Ilustración 36 Arco con poleas one cam. Modelo Mathews HTR NO Cam.....	75
Ilustración 37 Poleas cam & ½	76
Ilustración 38 Diferencias entre las poleas one cam y cam & ½	76
Ilustración 39 Ejemplo de representación mediante una gráfica del perfil una polea en coordenadas cartesianas	78
Ilustración 40 Parámetros para definir el radio de la polea pequeña	79
Ilustración 41 Parámetros para definir el radio de la polea grande.....	80
Ilustración 42 Forma del perfil de la polea pequeña diseñada.....	84
Ilustración 43 Forma del perfil de la polea grande diseñada	84
Ilustración 44 Perfil de la polea pequeña diseñada en coordenadas polares.....	85
Ilustración 45 Perfil de la polea grande diseñada en coordenadas polares	85
Ilustración 46 Función $\theta_1(\Phi)$ definida en dos tramos para obtener mayor precisión.....	87

Ilustración 47 Curvas de potencia de las cuatro configuraciones del arco analizadas.....	92
Ilustración 48 Dinamómetro	104
Ilustración 49 Cronógrafo para flechas	106

Índice de Tablas

Tabla 1 Datos iniciales para calcular la curva de potencia de un arco convencional	25
Tabla 2 Datos obtenidos con la hoja de cálculo.....	28
Tabla 3 Datos de las flechas disparadas para el cálculo de pérdidas energéticas	32
Tabla 4 Datos iniciales para calcular la curva de potencia de un arco de poleas	40
Tabla 5 Datos obtenidos con la hoja de cálculo.....	44
Tabla 6 Datos para el cálculo de la velocidad teórica de las flechas	47
Tabla 7 Comparación de los datos obtenidos con los modelos de arco convencional y de poleas	48
Tabla 8 Comparación de algunos arcos de poleas existentes en el mercado	71
Tabla 9 Valores de las características principales para el diseño del arco de poleas.....	73
Tabla 10 Características del arco diseñado con cuatro configuraciones distintas de apertura y fuerza de tensado máximas y mínimas	90
Tabla 11 Datos para el diseño de los componentes del arco.....	93
Tabla 12 Puntos del perfil de las poleas para su diseño.....	94

Índice de Fórmulas

Ecuación 1	26
Ecuación 2	26
Ecuación 3	26
Ecuación 4	26
Ecuación 5	27
Ecuación 6	27
Ecuación 7	27
Ecuación 8	27
Ecuación 9	29
Ecuación 10	31
Ecuación 11	31
Ecuación 12	31
Ecuación 13	31
Ecuación 14	31
Ecuación 15	32
Ecuación 16	33
Ecuación 17	41
Ecuación 18	41
Ecuación 19	41
Ecuación 20	41
Ecuación 21	41
Ecuación 22	41
Ecuación 23	41
Ecuación 24	42

Ecuación 25	42
Ecuación 26	42
Ecuación 27	42
Ecuación 28	42
Ecuación 29	42
Ecuación 30	42
Ecuación 31	42
Ecuación 32	42
Ecuación 33	42
Ecuación 34	46
Ecuación 35	46
Ecuación 36	46
Ecuación 37	46
Ecuación 38	46
Ecuación 39	47
Ecuación 40	47
Ecuación 41	86
Ecuación 42	86
Ecuación 43	86
Ecuación 44	86
Ecuación 45	86
Ecuación 46	86
Ecuación 47	86
Ecuación 48	87
Ecuación 49	87

Ecuación 50.....	87
Ecuación 51.....	87
Ecuación 52.....	88
Ecuación 53.....	88
Ecuación 54.....	88
Ecuación 55.....	88
Ecuación 56.....	88
Ecuación 57.....	88
Ecuación 58.....	88
Ecuación 59.....	89
Ecuación 60.....	89
Ecuación 61.....	89
Ecuación 62.....	89
Ecuación 63.....	89
Ecuación 64.....	89
Ecuación 65.....	89
Ecuación 66.....	89
Ecuación 67.....	89
Ecuación 68.....	89

Capítulo 1. Definición del Trabajo

Este capítulo introductorio se utiliza para guiar al lector del presente trabajo hacia una mejor comprensión del mismo. En él se delimitará el objeto de estudio y los objetivos derivados del mismo y su alcance. Además, se incluirá la estructura documental utilizada junto con los medios empleados para la elaboración del trabajo y su correspondiente justificación del tema, así como, de las asignaturas del grado utilizadas necesarias para poder ser realizado.

1.1. Objetivos del Trabajo

Este trabajo se centra en la investigación de un método para el diseño y fabricación de arcos de poleas junto con el diseño de uno de estos arcos y de unos procedimientos para verificar, a partir del arco diseñado, que este método desarrollado es válido.

Este trabajo puede servir como base tanto para el diseño y fabricación de los arcos de poleas como para el desarrollo de otros trabajos y métodos de diseño y fabricación de otros productos de características similares.

El objetivo principal de este trabajo es el de establecer un método que permita diseñar y fabricar arcos de poleas de la forma más completa y óptima posible.

Para cumplir con este objetivo es necesario establecer otros objetivos secundarios que permitan verificar que el método desarrollado es válido. Para ello habrá que diseñar un arco, desarrollar un procedimiento para poder comparar las características reales del arco con las características que se habían establecido para su diseño y verificar que el método desarrollado es válido.

1.2. Delimitación del Objeto de Estudio

Para verificar que el método de diseño y fabricación desarrollado en este trabajo es válido, habría que fabricar el prototipo resultante y realizar en él, una serie de pruebas y ensayos necesarios que suponen una gran inversión económica de la que no se dispone. Debido a esta

limitación, este trabajo se delimita a la redacción de unos documentos en los que se detallan el método de investigación desarrollado junto con el diseño del prototipo obtenido de los cálculos realizados y el procedimiento para verificar que este método es válido.

1.3. Plan de Trabajo y Estructura Documental

Este trabajo se ha desarrollado según el plan de trabajo que indica la norma UNE 157001:2014 sobre los criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico y está estructurado en los siguientes documentos:

- Una memoria en la que se describe el método para el diseño y la fabricación de arcos de poleas junto con el diseño de un arco.
- Un presupuesto donde se detallan los costes de desarrollo de la memoria y del diseño del arco, de la fabricación del arco y de los recursos necesarios para realización de las pruebas y ensayos del arco.
- Los planos y documentos obtenidos y necesarios para la fabricación del arco.

La redacción del trabajo se ha realizado según la sexta edición del *Manual de publicaciones de la APA*, el cuál fija un estándar para la elaboración y redacción de documentos.

1.4. Medios Empleados para la Elaboración del Trabajo

Para la obtención del presente trabajo solo se han desarrollado documentos teóricos, por lo tanto, no ha sido necesario utilizar ni adquirir ningún material de laboratorio. A continuación, enumeraremos los medios y las características del ordenador y del software utilizado para el desarrollo de este trabajo:

- **Ordenador Personal:** El *software* que se utiliza para la elaboración de este trabajo es muy potente y requiere que el ordenador que se vaya a usar tenga una capacidad de computación y una memoria altas para poder trabajar con fluidez. El ordenador que se ha usado es un portátil que cuenta con un procesador Intel® Core I5-5200U, una tarjeta gráfica Intel® HD *Graphics* 5500 y una memoria RAM de 4GB. Es

recomendable utilizar un ordenador que cuente con unas características mejores, sin embargo, con este se ha podido trabajar con suficiente fluidez.

- **Paquete de software de Microsoft Office 2016:** De este paquete se ha usado el editor de textos *Word*, para la redacción del trabajo, la hoja de cálculo *Excel* y el editor de presentaciones *Power Point* para el desarrollo de una presentación sobre el trabajo. Este software se ha elegido por ser el más completo y utilizado para la creación y edición de documentos.
- **Paquete de software de Siemens NX 10:** Se ha utilizado los módulos de diseño y análisis de este *software* principalmente por la experiencia y los conocimientos que se tienen sobre el uso de este. Este *software* tiene además unas características que lo convierten en una herramienta de diseño muy completa y eficiente.
- **Navegador web Google Chrome:** Este software ha sido muy útil para la obtención de la información y datos necesarios para poder desarrollar el trabajo. También se hubiera podido buscar esta información en alguna biblioteca que tenga libros relacionados con los arcos y su diseño o poniéndose en contacto con alguien que sea aficionado al deporte del tiro con arco o a alguna asociación de caza con arco o de tiro con arco. No obstante, se ha decidido utilizar solo este navegador, ya que ha proporcionado la información necesaria y además ha permitido la obtención de esta información de forma rápida.

Para este trabajo se ha dedicado indudable cantidad de tiempo para el diseño de los componentes y los planos del arco mediante el software de diseño *Siemens NX*. En esta memoria no se hará ninguna mención de la forma de usar el *software* para diseñar las piezas y hacer los planos, ya que el método propuesto está orientado solo a aportar los conocimientos necesarios para poder diseñar y fabricar de los arcos.

1.5. Justificación de la Elección del Tema del Trabajo

El Trabajo de Fin de Grado es una asignatura que el alumno deberá superar para poder obtener su título. Consiste en un trabajo original para demostrar por parte del alumno que se han adquirido unos conocimientos, capacidades y aptitudes previstas en el grado y que se es capaz de aplicar estos conocimientos a un caso real relacionado con la ingeniería mecánica.

La elección de este tema para desarrollar en el trabajo de fin de grado se justifica varias razones, tanto académicas como personales.

La principal razón académica por la que se ha elegido este tema es que con la elaboración de este trabajo se desarrolla un método de diseño que no se ha impartido concretamente en el grado en ingeniería mecánica y que puede servir como referencia a la hora de diseñar cualquier máquina. Del mismo modo, la elección de este tema permite usar una gran cantidad de conocimientos adquiridos durante el grado.

Las razones personales por la que se ha elegido desarrollar este tema son las siguientes:

- Un gran interés personal en el funcionamiento peculiar de estos arcos y la capacidad de aportarles un rendimiento mucho mayor que el de los arcos convencionales.
- La oportunidad de poder elaborar un trabajo original y práctico, que pueda interesar a otras personas.
- La posibilidad de mejorar los conocimientos adquiridos a lo largo del grado y poder aplicarlos a un caso real.

1.6. Justificación de las Asignaturas del Grado Utilizadas

Para la elaboración de este trabajo son necesarios utilizar los conocimientos adquiridos en el grado relacionados con las asignaturas de la mención de diseño de máquinas. A continuación, se indicarán las asignaturas y conocimientos que se han usado para poder elaborar el trabajo:

- **Sistemas de Producción y Fabricación:** Para poder decidir que materiales y métodos de fabricación son los más apropiados a la hora de diseñar un arco para que su fabricación cumpla con los parámetros de diseño establecidos y que a su vez su coste de fabricación no sea más grande de lo debido.
- **Máquinas y Mecanismos, Diseño de Maquinas I y II y Dinámica de Sistemas Multicuerpo:** Se han usado los conocimientos de estas asignaturas para poder realizar los cálculos necesarios para definir las características geométricas que debe tener el arco para que este cumpla con las características generales que se hayan establecido.
- **Dibujo Asistido por ordenador, Técnicas Computacionales en Ingeniería Mecánica y Dinámica de Sistemas Multicuerpo:** Con estas asignaturas se ha podido adquirir conocimientos básicos para usar software de diseño y análisis. Gracias a este trabajo y a la realización de prácticas de empresa en *Istobal* se ha adquirido un conocimiento mucho mayor sobre el uso de este tipo de software.
- **Oficina Técnica:** Esta asignatura ha servido como base para elaborar el trabajo de forma concisa y ordenada. Aunque en este trabajo no se ha elaborado ningún pliego de condiciones, esta asignatura también ha sido útil para desarrollar un método de diseño de arcos de poleas útil y que sea aplicable a un caso real.

Capítulo 2. Conceptos Básicos para el Diseño de Arcos

En este capítulo se incluye toda la información de interés relacionada con los arcos, como los conceptos básicos, su historia y la evolución a lo largo del tiempo y algunas variantes existentes.

Esta información a priori resulta ser superflua para justificar o explicar el método de diseño que se propone en el trabajo. No obstante, y tras la realización de la correspondiente investigación y diseño desarrollado dicha información resulta ser interesante y puede ayudar a comprender mejor.

2.1. Datos de Interés sobre los Arcos.

El arco es un arma que se usa para lanzar unos proyectiles denominados flechas. Los arcos se hicieron tan populares por ser un arma simple, fácil de usar y efectiva si la persona que lo usaba tenía experiencia. La persona que usa o practica el tiro con arco se denomina arquero o arquera.

Ilustración 1 Arquero practicando el tiro con arco

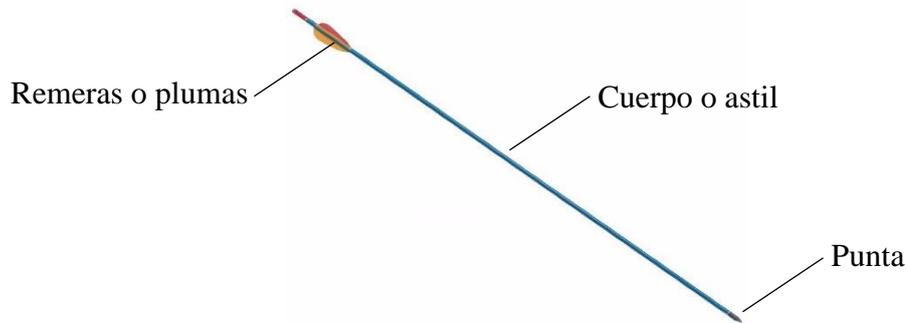


Fuente: Internet

Las flechas están compuestas de un cuerpo o astil en forma de palo o varilla, una punta en la parte delantera del astil y un emplumado en la parte trasera que hace que la flecha viaje siempre con la punta por delante y sin cambiar su orientación. La forma de las flechas no ha

cambiado mucho a lo largo del tiempo, pero los materiales que se usan para fabricar sus partes han ido evolucionando, aportando mejores características y mayor precisión.

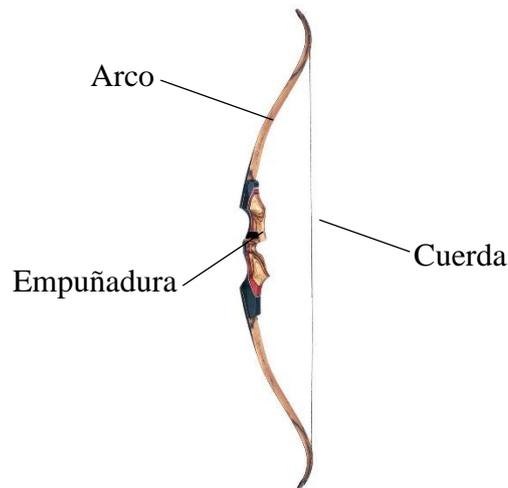
Ilustración 2 Partes de una flecha



Fuente: Internet

Los elementos principales del arco son un cuerpo en forma de arco, normalmente de madera o de metal con una empuñadura en la parte central y una cuerda que va unida a los dos extremos de este. El principio de funcionamiento de los arcos es el siguiente: La persona que va a tirar con el arco coge el arco por la empuñadura con una mano y por la cuerda con la otra mano, situando la parte central de la flecha sobre un soporte situado cerca de la empuñadura o sobre la mano que está en la empuñadura en caso de no tener soporte y la parte trasera de la flecha sobre la cuerda, donde se encuentra la otra mano. Cuando se tira de la cuerda hacia atrás esta se tensa y se produce una flexión en los extremos del arco, acumulando energía potencial en este. Al soltar la cuerda, esta energía almacenada se transmite a la flecha en forma de energía cinética, la cual sale disparada hacia donde este dirigida en ese momento. Dependiendo de si la persona que tira con el arco es diestra o zurda, esta cogerá la empuñadura del arco con una mano o con la otra.

Ilustración 3 Arco recurvo. Partes



Fuente: Internet

La potencia a la que son lanzadas las flechas depende tanto de la fuerza que tenga de la persona que tira con el arco, como de la energía que pueda transmitir el arco a la flecha. La precisión con la que son lanzadas las flechas dependerá de la experiencia que tenga la persona que tira con el arco y de la precisión que el arco pueda aportar a esta.

El arco ha sido un arma muy importante a lo largo de la historia que ha sido muy utilizado tanto para la caza como para la guerra hasta la invención de la pólvora y de las armas de fuego en el siglo XVI, las cuales fueron sustituyendo a los arcos poco a poco. Los arcos más antiguos que se han encontrado hasta la fecha han aparecido en Dinamarca y están fechados alrededor del año 9000 antes de Cristo. Su uso se extendió por todos los continentes excepto por Australia. Actualmente los arcos se usan para la caza y sobre todo para el deporte del tiro con arco; su uso prácticamente ha desaparecido en la guerra.

2.2. Historia y Evolución de los Arcos

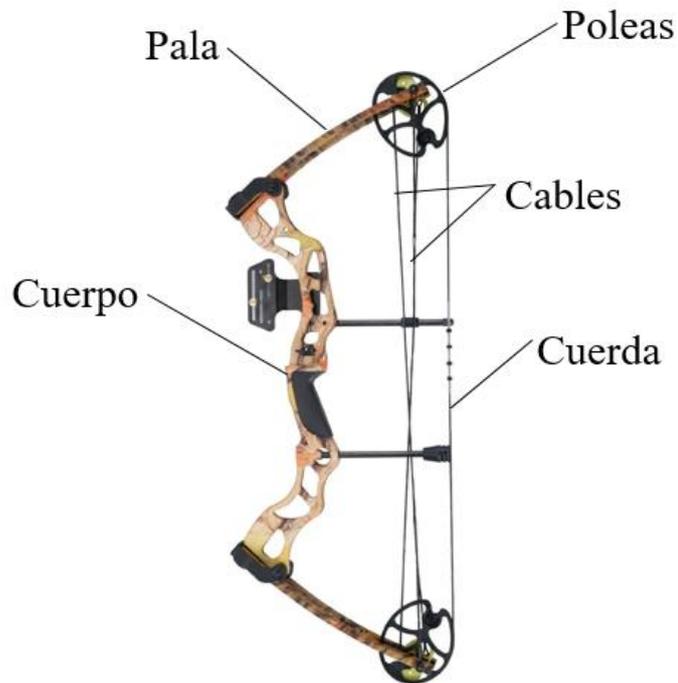
El diseño y los materiales de los arcos han sufrido muchos cambios a lo largo de la historia. Los primeros arcos tenían un diseño sencillo y estaban hechos de madera. Luego aparecieron los arcos recurvos, que permitían almacenar más energía y por lo tanto lanzar las flechas con mayor potencia. Los materiales también fueron evolucionando y se empezaron a utilizar

materiales como huesos y tendones junto con la madera para mejorar las características de estos. Este tipo de arcos que usan diversos materiales se denominan arcos compuestos. Actualmente se usan materiales como madera laminada, metales, fibra de vidrio, y fibra de carbono; todos ellos ligeros y resistentes. También el uso de accesorios como las miras o los estabilizadores han hecho que los arcos sean mucho más precisos y fáciles de utilizar.

Uno de los últimos avances en cuanto al diseño de los arcos han sido los arcos de poleas. Gracias a la incorporación de unas poleas a los extremos del arco se ha conseguido aumentar la potencia de estos, a la vez que se ha reducido la fuerza necesaria para disparar las flechas. Actualmente existen muchos diseños de arcos poleas, cada uno con sus ventajas e inconvenientes, aunque el principio de funcionamiento que hace que este tipo de arcos sean tan potentes es el mismo.

Los arcos de poleas son un invento relativamente reciente. Los primeros arcos de poleas fueron desarrollados y patentados por *Holless Wilbur Allen* en los años 1960 en los Estados Unidos con la ayuda del fabricante de arcos *Tom Jeggings*. La primera patente fue presentada el 23 de junio de 1966 con el número de publicación: US 3486495 A.

Ilustración 4 Partes de un arco de poleas.



Fuente: Internet

2.3. Otras Armas Derivadas de los Arcos

A lo largo de la historia han aparecido muchas armas derivadas de los arcos, cada una con características que ofrecían ventajas e inconvenientes a la hora de disparar las flechas, aunque todas utilizaban el mismo principio de almacenar la energía en un cuerpo en forma de arco y una cuerda. Una de estas variantes son las ballestas. El uso de estas empezó a extenderse a partir del siglo X en Occidente.

Ilustración 5 Ballesta antigua

Fuente: Internet

Las ballestas están compuestas por un arco y un soporte que permite tensar la cuerda y mantenerla tensada sin necesidad de que la persona que la usa tenga que estar todo el rato ejerciendo fuerza hasta que suelta la flecha. Esto permite que se pueda disparar la flecha presionando un gatillo y sin hacer fuerza para tensar la cuerda, aunque la cuerda se tiene que tensar cada vez que se dispare una flecha. Otra ventaja que tienen es que estas pueden tener una mayor potencia, ya que no se tiene que ejercer fuerza durante todo el tiempo el tiempo que este la cuerda tensada. Esto también permite que al no tener que estar ejerciendo fuerza mientras se apunta, la persona que usa la ballesta tenga una mejor precisión. Los inconvenientes que tienen las ballestas es que estas son más pesadas, voluminosas y complejas que los arcos. Las ballestas también han tenido una evolución similar a la de los arcos, incorporando mejores materiales e incluso poleas en los diseños más actuales.

Ilustración 6. Ballesta de poleas actual. Modelo Barnett Ghost 400

Fuente: Internet

En este trabajo no se tendrán en cuenta las ballestas, ya que su forma de utilizarlas es distinta a la de los arcos, además de que estas no se usan en el deporte del tiro con arco.

2.4. Conceptos para Determinar las Características de los Arcos

A la hora de diseñar un arco es necesario conocer las características que definen las cualidades de los arcos y que permiten comparar los arcos para determinar cuáles son los que tienen unas cualidades mejores y que cambios se pueden hacer en ellos para mejorarlas.

Por una parte, está la precisión que tiene un arco cuando se dispara una flecha con él. Esta depende de factores ajenos al arco, como las características de la flecha que se usa (rigidez, peso...), la distancia desde donde se dispara la flecha hasta el punto donde se encuentra el objetivo, las condiciones ambientales (viento y temperatura) y la destreza de la persona que dispara con el arco y de factores relacionados con el arco, como la velocidad de la flecha y su orientación a lo largo de su recorrido. Estos factores afectan en mayor o menor medida y son muy variables, con lo que la precisión que se puede conseguir con un arco es muy difícil de determinar. Actualmente se usa método para determinar la precisión de los arcos que consiste en usar una cámara que grabe a un elevado número de fotogramas por segundo para poder ver y analizar el movimiento de las flechas cuando se disparan.

Por otra parte, está la potencia de un arco, esta equivale a la cantidad de energía que un arco puede transmitir a la flecha cuando esta se dispara y afecta a la velocidad que esta puede adquirir. Dependiendo de la potencia del arco, será necesario ejercer mayor o menor fuerza para lanzar la flecha o tensar la cuerda en mayor o menor medida. Esto es un factor importante, ya que dependiendo de la estatura de la persona que va a usar un arco y de la fuerza que sea capaz de ejercer, el arco deberá tener una potencia mayor o menor. Esta potencia también dependerá del uso se le vaya a dar al arco. Si va a ser usado para la práctica de tiro con arco no es necesario que este tenga una potencia muy elevada. Sin embargo, si va a ser usado para cazar animales, este deberá tener una potencia mayor, con la que se pueda abatir a las presas. Dependiendo del tamaño del animal que se vaya a cazar, la potencia del arco tiene que ser mayor o menor y en muchos casos esto está determinado por unas leyes.

La potencia que puede desarrollar un arco depende de la geometría y los materiales de los componentes con los que este está fabricado y que se pueden establecer mediante cálculos y estudios teóricos. Es por esto que, a la hora de diseñar un arco, las características de este, estarán determinadas en gran medida por su potencia.

Para poder determinar la potencia que tienen los arcos se usa un gráfico que permite conocer la fuerza que se tiene que ejercer en cada punto del tensado del arco. Este gráfico se denomina curva de potencia y es muy útil para conocer la energía que el arco es capaz de transmitir a la flecha, es decir, su potencia, la fuerza máxima que se tiene que ejercer para tensarlo y su apertura.

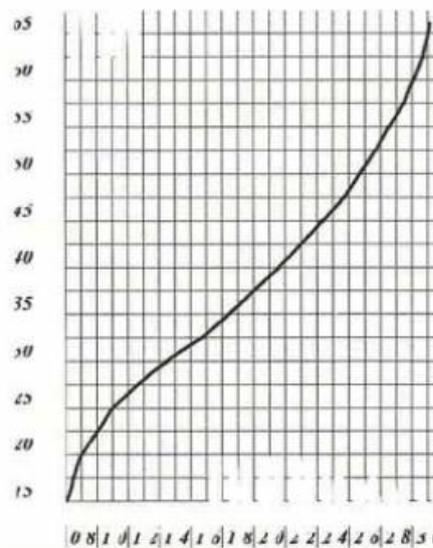
Como el método que se va a desarrollar es un primer estudio sobre como diseñar arcos, este se va a centrar solo en la potencia que estos pueden desarrollar. Por eso, para poder hacer los cálculos necesarios para determinar la potencia que este debe tener, se partirá de las curvas de potencia para desarrollar un modelo teórico de un arco de poleas con el que se puedan hacer cálculos y obtener los datos necesarios para poder hacer su diseño.

2.4.1. Curvas de potencia

La curva de potencia es un gráfico que se usa para poder determinar las características, tanto de un arco convencional como de uno de poleas. Esa curva es una función que permite ver la fuerza que se tiene que ejercer en cada punto de la apertura de los arcos, es decir permite representar la fuerza de tensado en función de la apertura. Con esta curva se puede calcular la potencia, la fuerza necesaria para tensarlos, la apertura y el rendimiento de cualquier arco.

La principal diferencia que hay entre los arcos convencionales y los de poleas se puede ver gracias a las curvas de potencia. En los arcos convencionales la fuerza que se ejerce para tenerlo es, más o menos, proporcional a la apertura, lo que produce que cuanto más se tense el arco, más fuerza se tenga que ejercer para mantenerlo tensado (véase Ilustración 7).

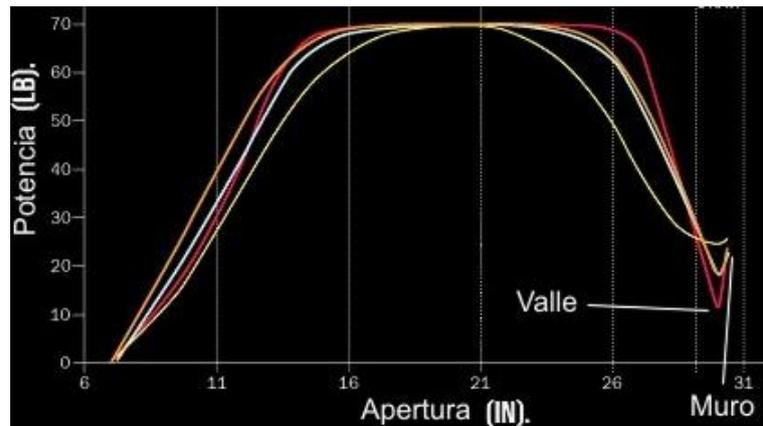
Ilustración 7 Curva de potencia de los arcos convencionales



Fuente: Internet

En los arcos de poleas ocurre algo muy distinto. En la primera parte del tensado la fuerza aumenta rápidamente hasta un punto donde se estabiliza y pasa a una segunda zona donde se mantiene constante. Luego esta fuerza vuelve a disminuir hasta el punto de apertura máxima del arco. Esta zona se denomina valle y es una zona donde se puede mantener el arco tensado sin necesidad de ejercer demasiada fuerza. Si se continúa tensando el arco una vez alcanzado este punto, esta fuerza vuelve a aumentar. Esta zona se denomina muro (véase Ilustración 8).

Ilustración 8 Curva de potencia de los arcos de poleas



Fuente: Internet

La curva de potencia real de un arco se puede calcular de forma sencilla usando una cinta métrica, un dinamómetro y una estructura que permita sujetar el arco y tensarlo mientras se mide la fuerza y la apertura. Para dibujar una curva de potencia real basta con medir la fuerza de tensado del arco en distintos puntos de la apertura del arco e introducirlos en una gráfica con la ayuda de una hoja de cálculo (véase Ilustración 9).

Ilustración 9 Obtención de datos para la definir la curva de potencia de un arco



Fuente: Internet

Si se tiene en cuenta que el producto de la fuerza por el desplazamiento da como resultado un trabajo, el cual se traduce en la acumulación de una energía potencial en las palas del arco, con una curva de potencia se puede calcular la cantidad de esta energía que un arco puede

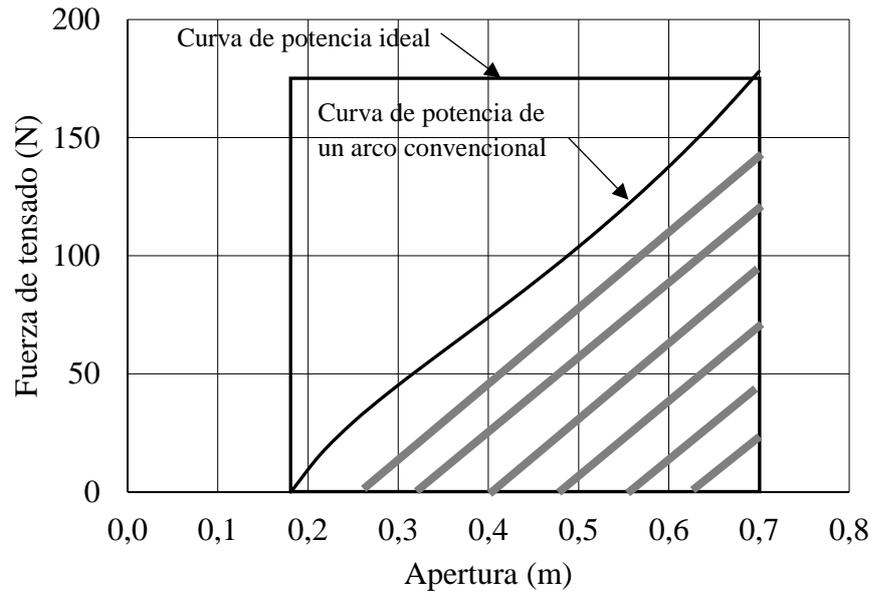
almacenar cuando se tensa. Cuanto mayor sea la energía que almacene un arco, mayor será la velocidad y la potencia a la que lanzará las flechas. La obtención de esta energía a partir de las curvas de potencia se estudiará en detalle en los puntos 2.5 y 2.6.

2.4.2. Rendimientos de los arcos

A partir de las curvas de potencia se puede calcular un rendimiento con el que se podrá comparar la fuerza que se tiene que ejercer para tensarlo con la cantidad de energía potencial que este puede almacenar. La curva de potencia ideal sería una curva en la que, desde el principio hasta el final del tensado, la fuerza tuviera un valor constante y que al final no se tuviera que ejercer fuerza para mantenerlo tensado. Con esto se conseguiría un rendimiento de almacenamiento de la energía potencial del 100%, es decir, se conseguiría almacenar la mayor cantidad de energía ejerciendo la menor fuerza posible, pero un arco con estas características es geoméricamente imposible de construir (véase Ilustraciones 10 y 11).

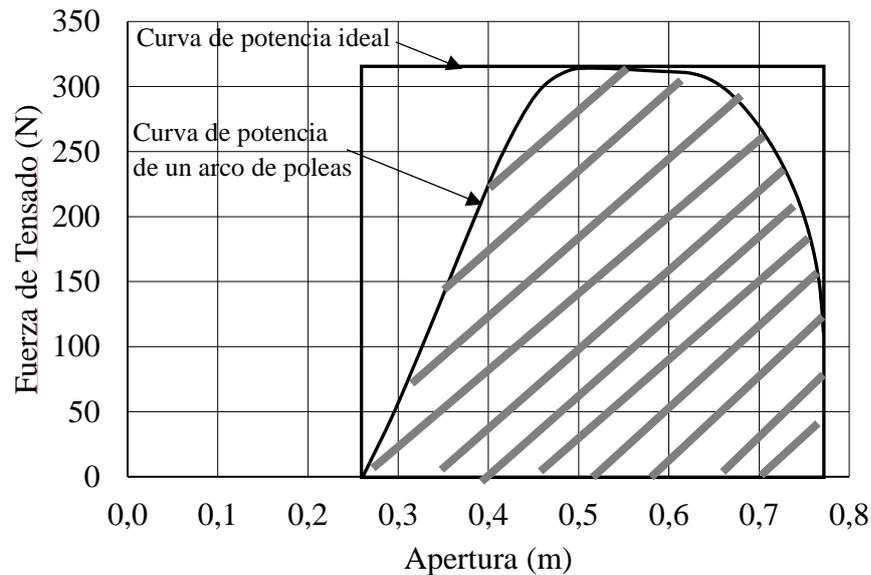
Este rendimiento se denominará *rendimiento potencial* y su símbolo será η_p . La obtención de este rendimiento a partir de las curvas de potencia se estudiará con más detalle en los puntos 2.5 y 2.6. Si se compara la curva de potencia de un arco convencional con la de un arco de poleas teniendo en cuenta sus curvas de potencia ideales, se puede observar que el área que ocupan estas curvas reales respecto a las ideales es mayor en los arcos de poleas (ver Ilustraciones 10 y 11). Con esto se puede determinar que entre un arco convencional y uno de poleas que tengan la misma apertura y la misma fuerza de tensado máxima, con el de poleas se podrá almacenar más energía y lanzar las flechas con más velocidad.

Ilustración 10 Curva de potencia de los arcos convencionales comparada con la curva ideal



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 11 Curva de potencia de los arcos de poleas comparada con la curva ideal



Fuente: Elaboración propia

Otro rendimiento que es útil para hacer el diseño de un arco es el de la energía que se pierde al soltar la flecha respecto a la cantidad de energía que puede almacenar el arco. Esta pérdida se produce porque no toda la energía se transmite a la flecha, sino que se transmite también a las partes móviles del arco, como las palas o las poleas en el caso de los arcos de poleas. Este

rendimiento no depende de la curva de potencia de los arcos, aunque la energía final transmitida a la flecha dependerá de estos dos rendimientos. Calcular este rendimiento es importante para hacer el diseño de un arco, ya que este rendimiento dependerá de si las partes móviles del arco, que es donde mayor energía se pierde, están debidamente diseñadas. Este rendimiento se denominará *rendimiento cinético* y su símbolo será η_c .

2.5. Estudio del Funcionamiento de los arcos convencionales

En este apartado se analizará el funcionamiento de los arcos convencionales para poder estudiar sus características y poder obtener sus curvas de potencia para calcular su rendimiento potencial y cinético (véase puntos 2.4.1 y 2.4.2) Para ello se ha desarrollado un modelo teórico en dos dimensiones de estos arcos, donde se podrá estudiar su funcionamiento y las fuerzas y desplazamientos que se generan en las distintas partes del arco cuando este se tensa de la forma más sencilla y completa posible. En este modelo se realizarán unos cálculos con el fin de relacionar la apertura del arco con la fuerza necesaria para tensarlo y obtener unos datos con los que se podrá hacer una curva de potencia y obtener su rendimiento potencial. Para poder hacer los cálculos se tendrá que partir de unos parámetros que definirán el arco. El desarrollo de este modelo se muestra con más detalle en los siguientes puntos del apartado 2.5.

2.5.1. Diferencias entre el modelo teórico y los arcos convencionales reales

Para este modelo teórico se deberán tener en cuenta las siguientes hipótesis que lo diferencian de los arcos reales (véase Ilustración 12):

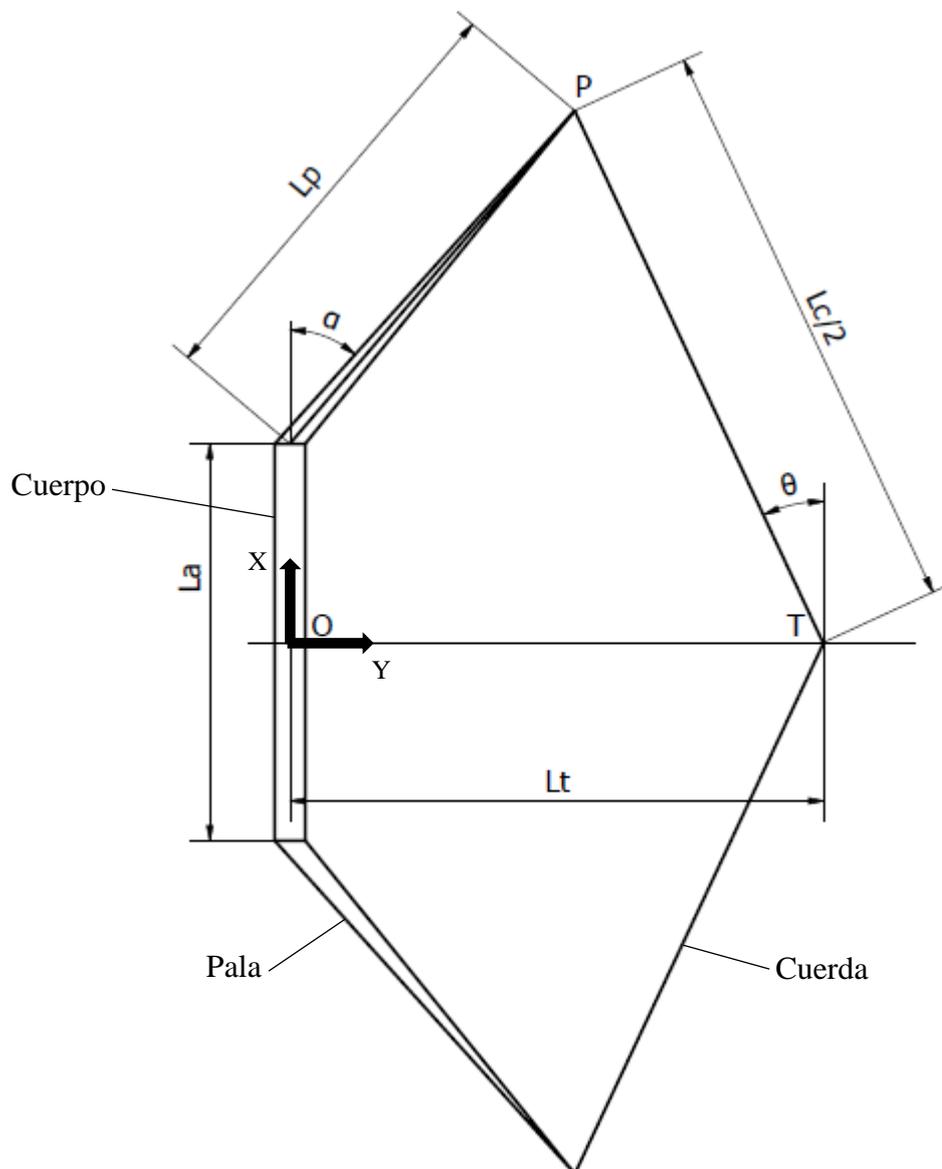
- Se supondrá que la geometría y las fuerzas y tensiones que aparecen en el arco son simétricas. El eje de simetría será el que pasa por el centro del cuerpo del arco y por el punto por el que se tensa la cuerda. Este eje también será donde se posiciona la flecha.

- El punto donde se sujetará el arco será el punto O, es decir, donde se aplicará la fuerza que compense a la de tensado.
- En el caso real, las palas de los arcos son curvadas o de geometría compleja y estas se curvan al tensar el arco. Además, la unión entre el cuerpo y las palas es una unión fija, que no permite rotaciones entre estas partes. Para este modelo las palas se supondrán que son rectas y rígidas y que la unión entre las palas y el cuerpo será móvil, produciéndose una fuerza torsora entre estas. Gracias a este cambio se consiguen simplificar los cálculos para hacer el análisis dinámico de este tipo de arcos sin que varíen demasiado los resultados teóricos obtenidos respecto de los reales.

2.5.2. Partes y geometría de interés del modelo teórico

En la Ilustración 12 se muestran las distintas partes del modelo teórico de un arco convencional y las dimensiones y puntos que se deben tener en cuenta para hacer los cálculos:

Ilustración 12 Modelo teórico de un arco convencional. Partes y geometría



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan los puntos y longitudes de la Ilustración 12:

- **O**: Es el punto donde se encuentra el centro del cuerpo del arco. Este punto es también donde se encuentra el origen de coordenadas y se considerará como un punto fijo.
- **T**: es el punto donde se aplicará la fuerza para tensar la cuerda y donde se posicionará la parte trasera de la flecha. La posición de este punto dependerá de la longitud de tensado del arco.

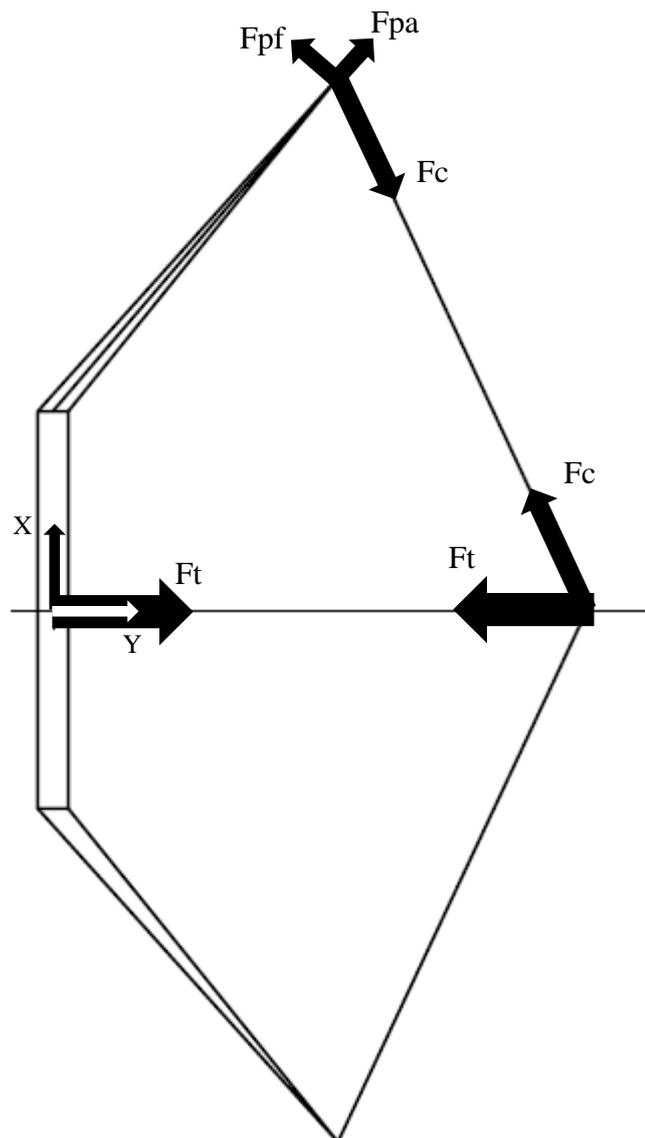
- **P:** Es el punto donde la cuerda se une con el extremo de la pala. La posición de este punto dependerá de la longitud de tensado del arco.
- **La:** Es la longitud del cuerpo del arco. Los extremos de este se localizarán en el punto más alejado del centro donde se apoyen las palas. Esta longitud es constante y dependerá de la longitud del cuerpo del arco.
- **Lp:** Es la longitud de las palas del arco. Los extremos de esta serán, por un lado, el punto más alejado del cuerpo del arco donde apoya la pala con el cuerpo y por el otro lado, el punto donde se sujeta la cuerda, es decir el punto P. Esta longitud será constante y dependerá de la longitud de las palas.
- **Lt:** Es la longitud entre el punto O y el punto T. Esta longitud es la apertura del arco y dependerá de la fuerza de tensado que se ejerza.
- **Lc:** Es la longitud de la cuerda. En la ilustración se muestra como $Lc/2$ porque esta es la longitud de la mitad de la cuerda, que va desde el punto P hasta el punto T. Este valor siempre será constante.
- **θ :** Es el ángulo que adquiere la cuerda respecto del eje Y de coordenadas cuando esta se tensa. Este ángulo tendrá un valor de 0 cuando el arco este destensado y será positivo cuando el arco se tense.
- **α :** Es el ángulo que hay entre las palas y el arco y el eje Y de coordenadas. Este valor es constante en cuanto al funcionamiento real, pero para este modelo se supondrá variable, según se especifica en el punto 2.5.1.

Las variables que tengan un subíndice 0, significa que su valor es el del punto inicial del tensado y si tiene un subíndice f, que su valor es el del punto final o de máxima apertura.

2.5.3. Fuerzas de interés del modelo teórico

En la Ilustración 13 se muestran las principales fuerzas que aparecen entre los distintas partes del modelo teórico del arco convencional (véase Ilustración 12) y que se tendrán en cuenta para hacer los cálculos.

Ilustración 13 Modelo teórico de un arco convencional. Fuerzas



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan las fuerzas de la Ilustración 13:

- **F_c**: Es la tensión de la cuerda. La dirección de esta será la misma que la de la cuerda. Hay que tener en cuenta que esta tensión aparece tanto en la mitad superior como en la inferior de la cuerda.

- **Ft:** Es la fuerza de tensado. Esta será la suma de la componente X de las fuerzas F_c de las dos mitades de la cuerda.
- **Fpf:** Es la componente flectora de la fuerza que se genera en la pala debido a la suma de las tensiones de la cuerda. Esta fuerza dependerá del ángulo de las palas (α).
- **Fpa:** Es la componente axial de la fuerza que se genera en la pala debido a la suma de las tensiones de la cuerda (F_c). Esta puede ser de tracción o de compresión. Esta dependerá del ángulo de la cuerda (θ).

Hay que tener en cuenta que la fuerza real que ejercen las palas estará definida en función de su deformación y de su rigidez. Como en el modelo teórico se ha establecido un modelo de palas rígido, por lo que la fuerza que ejercerán las palas se calculará mediante una fuerza torsora que aparece entre el cuerpo y las palas y que estará definida en función del ángulo que haya entre el cuerpo y las palas y un factor de rigidez que se obtendrá a partir de la fuerza de tensado final y la tensión inicial de la cuerda.

2.5.4. Variables de diseño. Datos previos a los cálculos

Para poder hacer los cálculos se tienen que definir previamente algunos parámetros descritos en el punto 2.5.2 y 2.5.3 que definirán las características del arco. Los parámetros que son necesarios definir son los siguientes:

- **Lc:** Longitud de la cuerda
- **La:** Longitud del cuerpo
- **Lto:** Apertura inicial
- **Ltr:** Apertura final del arco
- **Ftr:** Fuerza en el punto de apertura final
- **Fco:** Tensión de la cuerda en el punto de apertura inicial

Para poder hacer los cálculos se usarán los parámetros iniciales de un arco real, los cuales servirán de ejemplo para determinar si el modelo teórico desarrollado sirve para obtener las curvas de potencia de los arcos convencionales. En la tabla 1 se muestran los valores de los parámetros descritos en este punto, seleccionados para hacer los cálculos.

Tabla 1
Datos iniciales para calcular la curva de potencia de un arco convencional

La (m)	Lc (m)	Lt ₀ (m)	Lt _f (m)	Ft _f (N)	Fc ₀ (N)
0,525	1,55	0,181	0,7	178	221

Elaboración propia

Los datos de la tabla 1 se han obtenido midiendo la geometría y las fuerzas reales de un arco, con la ayuda de un dinamómetro y una cinta métrica. El arco que se ha usado tiene una apertura de 28" (70cm) y una fuerza de tensado de 40Lb (178N).

2.5.5. Relación entre las variables de diseño. Fórmulas

El resultado que interesa obtener de estos cálculos es la fuerza de tensado (Ft) en función de la apertura (Lt). Después de desarrollar y simplificar las fórmulas que relacionan los parámetros descritos en los puntos 2.5.2 y 2.5.3, se ha llegado a la conclusión de que no es posible obtener una función que relacione directamente Ft con Lt, ya que no se puede despejar Ft y es necesario hacer iteraciones. Por ello se ha elaborado una tabla (ver Tabla 2), con la ayuda de una hoja de cálculo, en la que se muestran varios puntos de la apertura (Lt) y la fuerza de tensado (Ft) que se genera en cada uno.

En la tabla elaborada (ver Tabla 2), además de estos dos parámetros, se han añadido otros que son necesarios para hacer los cálculos y que además son útiles para hacer el diseño de un arco convencional. Estos son los parámetros descritos en los puntos 2.5.2 y 2.5.3 que se usan en la tabla:

- θ : Ángulo de la cuerda con el eje vertical (eje Y)
- α : Ángulo de la pala con el eje vertical (eje Y)

- **Lt**: Apertura del arco
- **Fpf**: Fuerza flectora de la pala
- **Fpa**: Fuerza axial de la pala
- **Fc**: Tensión de la cuerda
- **Ft**: Fuerza de tensado

Para elaborar la tabla se han usado unas fórmulas (véase Fórmulas 1 a 8) que relacionan los parámetros que se usan en la tabla. Estas ecuaciones se muestran simplificadas lo máximo posible.

A continuación, se describen los pasos y las formulas utilizadas para elaborar la tabla.

El primer paso para obtener las ecuaciones es determinar la fuerza de tensado (Ft) en función de alguna variable geométrica. Esta variable es el ángulo de la cuerda (θ).

$$Ft = 2 * \sin \theta * Fc \quad [1]$$

Como también se desconoce la fuerza de tensado (Fc) se tiene que desarrollar una fórmula que relacione la fuerza flectora de la pala (Fpf) con la fuerza de tensión de la cuerda (Fc).

$$Fc = Fpf * \frac{\sin \alpha + \frac{\cos \alpha}{\tan \alpha}}{\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\tan \alpha}} \quad [2]$$

La fuerza axial de la pala (Fap) se definirá a partir de la fuerza flectora de la pala (Fpf) de la tensión de la cuerda (Fc) y de sus ángulos (α y θ).

$$Fpa = \frac{Fpf * \cos \alpha - Fc * \sin \theta}{\sin \alpha} \quad [3]$$

La fuerza flectora (Fpf) se tendrá que definir en función del ángulo de las palas (α), pero antes de esto se tienen que desarrollar otras ecuaciones. Interesa obtener el ángulo de las palas (α) en función del ángulo de la cuerda (θ) para dejar todas las variables en función de este ángulo, ya que es la forma más sencilla de hacer los cálculos.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{Lc * \cos \theta - La}{2}}{Lp} \right) \quad [4]$$

También se tiene que calcular la longitud de las palas (Lp), que será un valor constante.

$$Lp = \sqrt{Lt_0^2 + \left(\frac{Lc-La}{2}\right)^2} \quad [5]$$

La longitud de tensado (Lt) también se pondrá en función del ángulo de la cuerda (θ).

$$Lt = Lp * \sin \alpha + Lc * \sin \theta$$

Con estas fórmulas se puede crear una hoja de cálculo donde se establezcan los datos iniciales (véase tabla 1) y la longitud de las palas (Lp) y una tabla donde se pongan las fórmulas para obtener α , Lt, Fc y Ft en función de θ . Una vez hecho esto se crearán varias filas o puntos con un rango de valores de θ , hasta que se llegue al punto donde Lt coincida con la apertura máxima. Se puede usar la función *solver* para ayudar a conseguir este punto. Entre el punto inicial y el de apertura máxima se pueden insertar más filas, tantas como se considere necesario. Cuantas más filas haya más precisa será la curva de potencia, pero más números habrá.

Para completar la tabla se tienen que insertar a continuación los datos del punto inicial y el punto de apertura máxima a partir de los datos iniciales del arco. La tensión inicial de la cuerda y la fuerza de tensado final son datos conocidos que se pueden sustituir por las formulas y completar así todos los datos de esas dos filas.

Una vez se tienen estas dos filas completas se tiene que crear una función lineal que permita obtener la fuerza flectora (Fpf) de la pala en función de su ángulo (α). Para ello se hará una regresión a partir de los datos de los puntos inicial y final, que ya son conocidos.

$$Fpf = x_{Fpf(\Phi)} * \alpha + c_{Fpf(\Phi)} \quad [6]$$

$$x_{Fpf(\Phi)} = \frac{Fpf_f - Fpf_0}{\alpha_f - \alpha_0} \quad [7]$$

$$c_{Fpf(\Phi)} = Fpf_0 - x_{Fpf(\Phi)} * \alpha_0 \quad [8]$$

Una vez se tiene esta función se puede obtener la fuerza flectora de las palas (Fpf) en cada punto la apertura (La) y completar toda la tabla.

2.5.6. Parametrización de las fórmulas. Tabla de resultados

Esta es la tabla elaborada con ayuda de la hoja de cálculo, usando las fórmulas del punto 2.5.5 (véase Fórmulas 1 a 8) y los datos iniciales del punto 2.5.4 definidos como ejemplo para hacer los cálculos (ver Tabla 1).

Tabla 2
Datos obtenidos con la hoja de cálculo

θ (rad)	α (rad)	Lt (m)	Fpf (N)	Fpa (N)	Fc (N)	Ft (N)
0,00	0,339	0,181	73,3	207,4	220,0	0,0
0,04	0,343	0,214	74,3	184,5	198,9	15,9
0,08	0,353	0,250	77,3	167,4	184,4	29,5
0,12	0,369	0,289	82,3	154,6	175,1	41,9
0,16	0,391	0,330	88,8	144,6	169,7	54,1
0,20	0,417	0,374	96,7	136,4	167,2	66,4
0,24	0,446	0,419	105,7	129,1	166,9	79,3
0,28	0,479	0,465	115,7	122,0	168,1	92,9
0,32	0,515	0,511	126,5	114,6	170,7	107,4
0,36	0,552	0,558	137,9	106,7	174,4	122,8
0,40	0,591	0,605	149,8	98,1	179,0	139,4
0,44	0,632	0,651	162,1	88,4	184,6	157,3
0,48	0,676	0,700	175,7	76,7	191,7	178,0

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 2 y de los cálculos realizados con ayuda de la hoja de cálculo se obtienen estas conclusiones.

A partir de la ecuación obtenida para calcular la fuerza flectora de las palas (véase Formulas 6 a 8) se puede establecer un coeficiente de rigidez en función y el ángulo de las palas en el

punto donde no se genera ninguna fuerza, es decir su ángulo en el caso de que no hubiera cuerda.

El coeficiente de rigidez se define con el símbolo K_p y es el valor de x_{Fpf} en la función de la fuerza flectora, que en el caso analizado es de 304 N/rad. (véase Formulas 6 a 8 y Tabla 2)

El ángulo de reposo de las palas se puede definir como α_{rep} y se puede obtener despejando el término m de la función e igualando la fuerza flectora a 0 (véase Formulas 6 a 8 y Tabla 2).

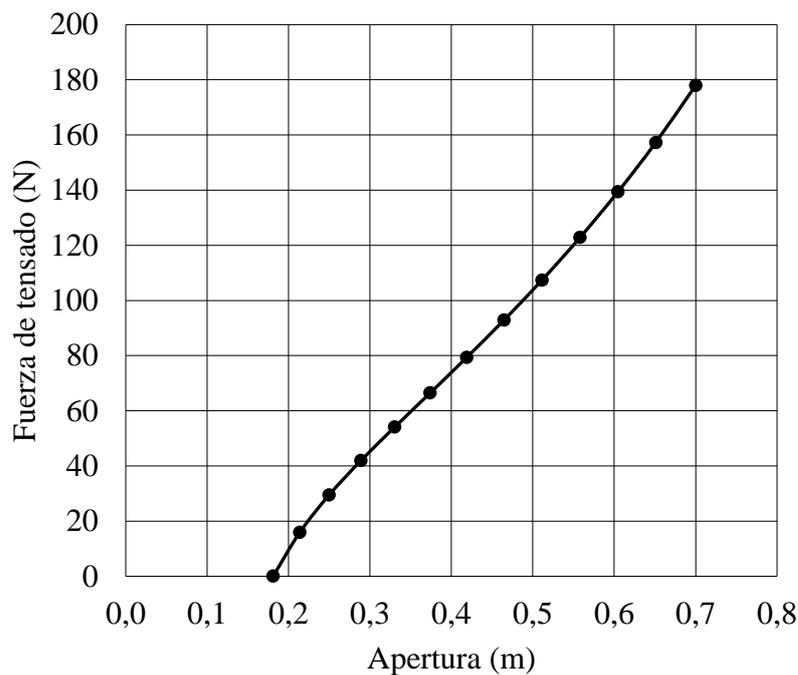
$$\alpha_{rep} = -\frac{c_{Fpf}}{x_{Fpf}} = 0,099rad \quad [9]$$

Estos dos valores son de gran utilidad a la hora de diseñar las palas de un arco.

2.5.7. Obtención de la curva de potencia

A partir de los datos de la tabla elaborada (véase Tabla 2) se podrá crear una gráfica poniendo los valores las columnas de la fuerza de tensado (F_t) en el eje Y y la apertura (L_t) en el eje X para crear la curva de potencia de este arco. Se ha utilizado la función de gráfico de dispersión para obtener la curva que une los puntos representados en la gráfica.

Ilustración 14 Curva de potencia obtenida a partir de la tabla de datos



Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver, la curva obtenida es similar a las curvas de potencia reales de este tipo arcos (véase Ilustración 7), así que se puede concluir que el método propuesto para el cálculo teórico de las curvas de potencia de este tipo de arcos es válido.

2.5.8. Cálculo del rendimiento potencial

Para obtener el rendimiento potencial del arco descrito en el punto 2.4.2. se deberá calcular la energía potencial que almacena este a partir de la gráfica obtenida y dividirla por la energía máxima que se podría almacenar.

Para obtener la energía almacenada en el arco se deben seguir los siguientes pasos:

- Obtener la función de la curva de potencia (véase Ilustración 14). Esta se puede obtener usando la función de estimación lineal de la hoja de cálculo y será una función de tipo polinómica.

Esta es la ecuación obtenida mediante la hoja de cálculo, de la fuerza de tensado (F_t) en función de la apertura (L_t) (véase Ilustración 14).

$$Ft(Lt) = 794,69 * Lt^3 - 994,34 * Lt^2 + 701,09 * Lt - 97,39 \quad [10]$$

- Calcular el valor de la integral definida de la función de la curva de potencia (véase Fórmula 10) entre la apertura final (Lt_0) e inicial (Lt_f) del arco (véase Tabla 2). Este valor se definirá con el símbolo E_p

$$E_p = \int_{Lt_0}^{Lt_f} Ft(Lt) d(Lt) \quad [11]$$

Este es el resultado de la integral definida (véase Ecuación 10) de la función de la curva de potencia obtenida (véase Ecuación 10).

$$E_p(J) = \left[\frac{794,69}{4} * Lt_f^4 - \frac{994,34}{3} * Lt_f^3 + \frac{701,09}{2} * Lt_f^2 - 97,39 * Lt_f \right] - \left[\frac{794,69}{4} * Lt_0^4 - \frac{994,34}{3} * Lt_0^3 + \frac{701,09}{2} * Lt_0^2 - 97,39 * Lt_0 \right] = 45,5J \quad [12]$$

El cálculo para obtener la energía potencial máxima, explicada en el punto 2.4.2, se definirá con el símbolo E_{max} , se obtiene multiplicando la fuerza de tensado máxima ($F_{t_{max}}$) por la apertura final (Lt_0) menos la inicial (Lt_f) del arco (véase Tabla 2).

$$E_{p_{max}}(J) = F_{Max} * (Lt_f - Lt_0) = 178 * (0.7 - 0.181) = 92,84J \quad [13]$$

Una vez obtenidas la energía que se puede acumular en el arco (E_p) y la máxima que se podría almacenar ($E_{p_{max}}$) se puede calcular el rendimiento potencial del arco (η_p), descrito en el punto 2.4.2, usando la siguiente ecuación.

$$\eta_p(\%) = 100 * \frac{E_p}{E_{p_{max}}} = 100 * \frac{45.5}{92.84} = 49.2\% \quad [14]$$

Un rendimiento potencial (η_p) entorno al 50% es el que tienen los arcos convencionales. Es muy difícil diseñar un arco convencional que tenga un rendimiento mucho mayor del 50%.

Se han hecho algunas pruebas con la hoja de cálculo elaborada, modificando los parámetros iniciales de diseño (véase Tabla 2) y se ha podido observar que aumentando o reduciendo la tensión inicial de la cuerda (F_c) se puede aumentar o reducir ligeramente el rendimiento del arco. Con esto se consigue explicar porque los arcos convencionales recorvos,

que generan una tensión inicial de la cuerda mayor, desarrollan potencias mayores (véase Ilustración 3).

Con estas pruebas realizadas con la hoja de cálculo se verifica que este método de cálculo desarrollado para diseñar arcos convencionales es válido y se llega a la conclusión de la tensión inicial que generen las palas sobre la cuerda determina en gran medida el rendimiento de este tipo de arcos.

2.5.9. Cálculo del rendimiento cinemático

Para calcular el rendimiento cinético, explicado en el apartado 2.4.2, se deberá calcular la energía que el arco transmite a la flecha, la cual se definirá con el símbolo (E_c) y dividirlo por la energía potencial (E_p) que es capaz de almacenar el arco. Para ello se tiene que conocer el peso de la flecha y la velocidad que adquiere cuando esta se separa de la cuerda.

Como no ha sido posible medir la velocidad de las flechas disparadas con el arco estudiado, ya que se requiere un equipo de medición especial del que no se dispone, se ha establecido una velocidad que suelen adquirir las flechas que se disparan con este tipo de arcos a partir de datos obtenidos en Internet. El peso de la flecha se ha podido medir con una báscula. En la tabla 3 se muestran los valores de la masa de la flecha (m_f) y la velocidad que esta adquiere (v_f).

Tabla 3

Datos de las flechas disparadas para el cálculo de pérdidas energéticas

m_f (Kg)	v_f (m/s)
0,029	53

Fuente: Elaboración propia e Internet

La energía que adquiere la flecha (E_c) es fácil de calcular una vez se conocen estos dos datos, basta con aplicar la ecuación de la energía cinética.

$$E_c(J) = \frac{1}{2} * m_f * v_f^2 = \frac{1}{2} * 0,029 * 53^2 = 41,01J \quad [15]$$

Finalmente basta con dividir la energía cinética (véase formula 15) por el de la energía potencial que almacena el arco (véase formula 12) para obtener el rendimiento cinemático (η_c)

$$\eta_c (\%) = \frac{E_c}{E_p} * 100 = \frac{41,01}{45,5} * 100 = 90,2\% \quad [16]$$

Con este rendimiento (véase Formula 16) se observa que las pérdidas que tiene el arco analizado no son demasiado grandes.

2.6. Estudio del Funcionamiento de los Arcos de Poleas

En este apartado se hará el mismo estudio hecho en el punto 2.5, pero en lugar de estudiar los arcos convencionales se estudiarán los arcos de poleas (véase Ilustración 4).

Estos son los principios de los arcos de poleas que permiten comprender como funcionan:

- Los arcos de poleas tienen un cuerpo y dos palas, una en cada extremo, al igual que en los arcos convencionales.
- En el modelo teórico propuesto, en el extremo de cada pala hay dos poleas, una de mayor tamaño que la otra y las dos pueden ser completamente redondas o tener una forma oblonga, aunque el número o la forma de las poleas puede variar dependiendo del arco. Las dos poleas están unidas de forma que, si se genera una fuerza angular sobre una, esta fuerza se transmite a la otra.
- El arco consta de una cuerda y dos cables, aunque este número también puede variar dependiendo del tipo de arco.
- La cuerda es la que une las poleas de mayor tamaño de cada pala, esta es sobre la que se sujeta la flecha y sobre la que se ejerce la fuerza de tensado. Esta cuerda transmite la fuerza de tensado a las poleas y generan una fuerza angular sobre estas.
- Cada cable une la polea de menor tamaño de una pala con el extremo de la pala opuesta. Estos cables transmiten la fuerza angular que se genera en las poleas a las palas, generando una flexión en estas.

Para el estudio del funcionamiento de los arcos de poleas se desarrollará un modelo teórico simple de los arcos de poleas y explicarán las hipótesis que diferencian este modelo de los arcos de poleas reales, para así analizar los componentes principales y las fuerzas.

2.6.1. Diferencias entre el modelo teórico y los arcos de poleas reales

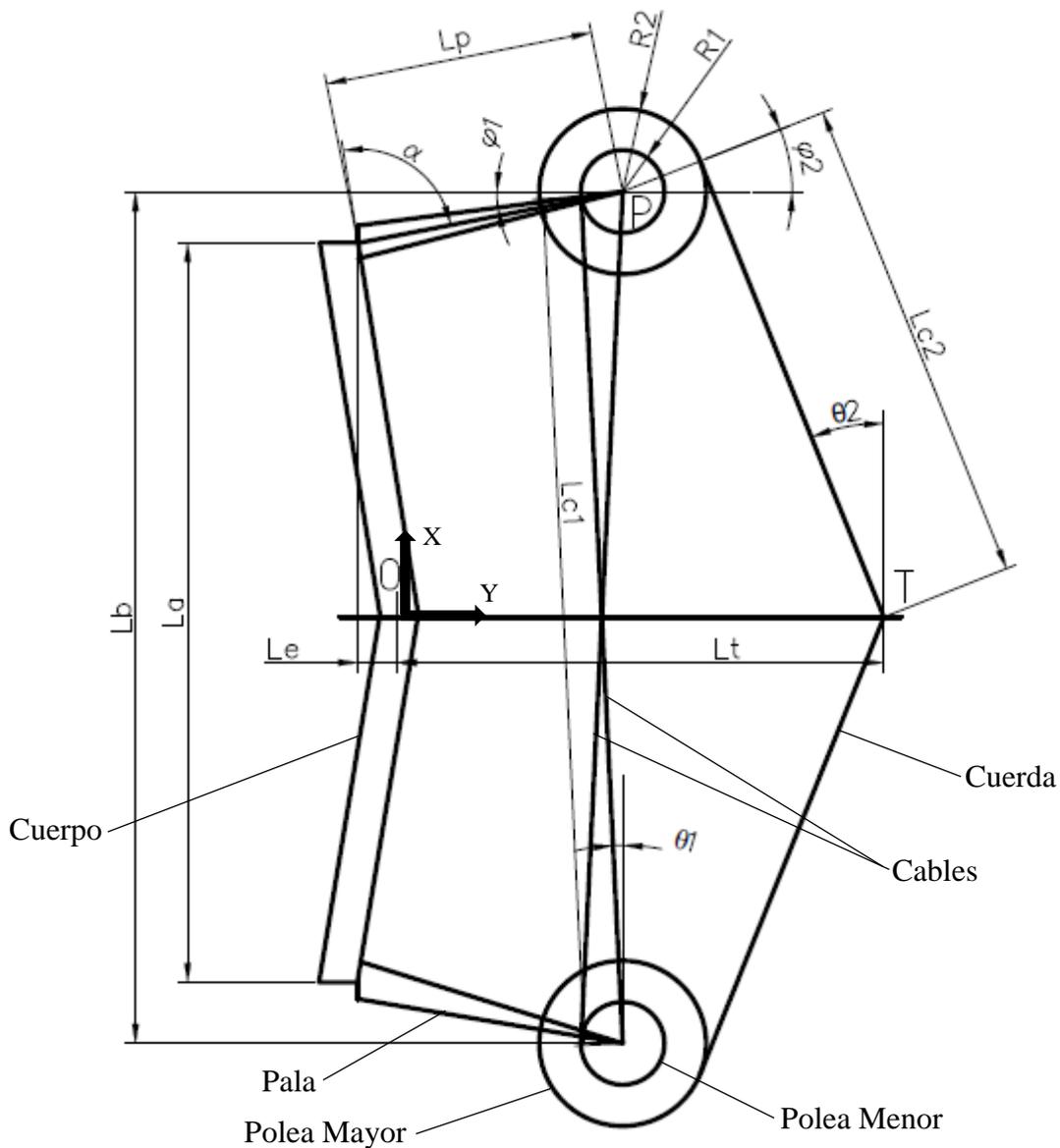
Para este modelo teórico se deberán tener en cuenta las siguientes diferencias que distingue el modelo teórico de los arcos de poleas reales:

- Se supondrá que la geometría y las fuerzas y tensiones que aparecen en el arco son simétricas. El eje de simetría será el que pasa por el centro del cuerpo del arco y por el punto por el que se tensa la cuerda. Este eje también será donde este posicionada la flecha.
- El punto donde se sujetará el arco será el punto O, es decir, donde se aplicará la fuerza que compense a la de tensado.
- Al igual que en el modelo teórico del arco convencional (véase Ilustración 12), las palas son rígidas y la unión entre las palas y el cuerpo será móvil, produciéndose una fuerza torsora que estará definida en función del ángulo entre las palas y el cuerpo. Como se ha podido observar que con este cambio respecto de las poleas reales se obtienen unos resultados semejantes y además simplifica los cálculos, se seguirá utilizando este cambio para los arcos de poleas.
- Las poleas de la parte superior e inferior serán idénticas. Tanto la polea mayor como la menor serán completamente redondas. Aunque los arcos reales tienen poleas oblongas, en este modelo se usarán poleas redondas para simplificar los cálculos y comprobar que los cálculos realizados son válidos.

2.6.2. Partes y geometría de interés del modelo teórico

En la ilustración 15 se muestran las distintas partes del modelo teórico de un arco convencional y las dimensiones y puntos que se deben tener en cuenta para hacer los cálculos.

Ilustración 15 Modelo teórico de un arco poleas. Geometría



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen los símbolos de la ilustración 15:

- **O:** Es el punto donde se encuentra el centro del cuerpo del arco. Este punto está situado en el origen de coordenadas y se considerará como un punto fijo.
- **T:** Es el punto donde se aplica la fuerza para tensar la cuerda y donde se posiciona la parte trasera de la flecha.
- **P:** Es el punto donde los centros de las poleas se unen con el extremo de la pala. La posición de este punto dependerá de la longitud de tensado del arco.

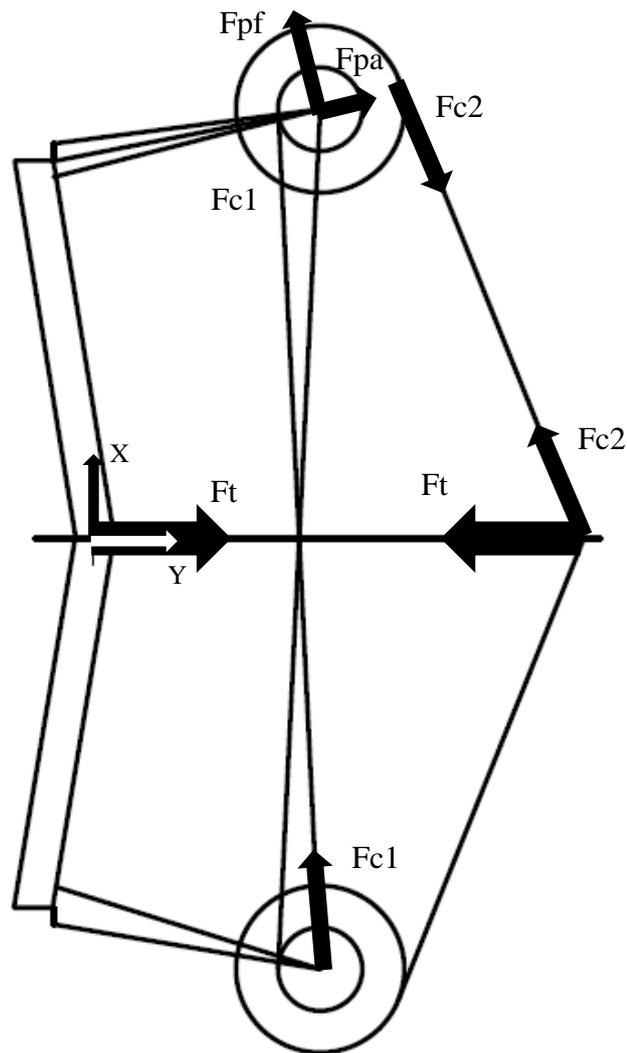
- **La:** Es la longitud del cuerpo del arco. Los extremos de este se localizan en el punto más alejado del centro donde se apoyen las palas. Esta longitud es constante y depende de la longitud del cuerpo del arco.
- **Lp:** Es la longitud de las palas del arco. Los extremos de esta son, por un lado, el punto más alejado del cuerpo del arco donde apoya la pala con el cuerpo y por el otro lado, el punto donde se estas se unen con las poleas, es decir el punto P. Esta longitud es constante y depende de la longitud de las palas.
- **Le:** Es la distancia en el eje horizontal entre el punto donde se sujeta el arco (O) y el punto donde la pala se une con el cuerpo.
- **R1:** Es el radio de la polea de menor tamaño. El centro de la polea es el centro del círculo, donde se unen las poleas con las palas (P)
- **R2:** Es el radio de la polea de mayor tamaño. El centro de la polea es el centro del círculo, donde se unen las poleas con las palas (P)
- **Lt:** Es la longitud entre el punto O y el punto T. Esta longitud es la apertura del arco y dependerá de la fuerza de tensado que se ejerza.
- **Lc1:** Es la longitud del cable que va desde el punto P hasta su punto de tangencia con la polea menor. Este valor será variable.
- **Lc2:** Es la longitud de la cuerda que va desde el punto donde se ejerce la fuerza de tensado hasta su punto de tangencia con la polea mayor. Este valor es variable, ya que solo se tiene en cuenta la parte de la cuerda que no está en contacto con la polea y cuando la polea gire al tensarse, esta longitud irá aumentando.
- **Lb:** Es la longitud entre los ejes de las poleas. Su valor inicial es conocido, pero luego este se definirá en función del ángulo entre las palas y el cuerpo del arco
- **$\theta 1$:** Es el ángulo que adquiere el cable respecto del eje Y de coordenadas.

- θ_2 : Es el ángulo que adquiere la cuerda respecto del eje Y de coordenadas cuando esta se tensa. Este ángulo tendrá un valor de 0 cuando el arco este destensado y será positivo cuando el arco se tense.
- μ_1 : Es el ángulo que hay entre el eje X de coordenadas y la recta que pasa entre el centro de las poleas y el punto de tangencia del cable con la polea menor.
- μ_2 : Es el ángulo que hay entre el eje X de coordenadas y la recta que pasa entre el centro de las poleas y el punto de tangencia de la cuerda con la polea mayor.
- α : Es el ángulo que hay entre las palas el eje Y de coordenadas. Este valor es constante en cuanto al funcionamiento real, pero para este modelo se supondrá variable.

Al igual que en el estudio de los arcos convencionales, las variables que tengan un subíndice “0”, su valor es el del punto inicial del tensado y si tiene un subíndice “f”, su valor es el del punto final.

2.6.3. Fuerzas de interés del modelo teórico

Ilustración 16 Modelo teórico de un arco de poleas. Fuerzas



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan las fuerzas mostradas en la ilustración 16:

- **Fc₁**: Es la tensión del cable. Esta fuerza se genera por la flexión de la pala y crea un momento en la polea menor
- **Fc₂**: Es la tensión de la cuerda. Esta tensión esta generada por la fuerza angular que generan la polea mayor.
- **Ft**: Es la fuerza de tensado. Esta será la suma de la componente X de las fuerzas Fc₂ de las dos mitades de la cuerda.
- **Fpf**: Es la componente flectora de la fuerza que se genera en la pala debido a la suma de las tensiones de la cuerda y los dos cables. Al igual que en el modelo

teórico de un arco convencional, la fuerza flectora de la pala estará definida en función del ángulo entre el cuerpo del arco y las palas (α).

- **Fpa:** Es la componente axial de la fuerza que se genera en la pala debido a la suma de las tensiones de la cuerda y los dos cables. Esta puede ser de tracción o de compresión. Esta dependerá de la fuerza flectora de la pala, de la cuerda y de los cables.

2.6.4. Variables de diseño. Datos previos a los cálculos

Al igual que en el modelo teórico de los arcos convencionales, explicado en el punto 2.5, hay que partir de unos datos iniciales para poder realizar los cálculos y obtener una curva de potencia a partir de estos. Como los componentes y el funcionamiento del modelo teórico de un arco de poleas varía respecto al modelo de un arco convencional, también es necesario definir unos nuevos parámetros iniciales (véase Ilustración 15), que son los siguientes:

- **Lp:** Longitud de la cuerda
- **La:** Longitud del cuerpo
- **R1:** Radio de la polea menor
- **R2:** Radio de la polea mayor
- **Lto:** Apertura inicial
- **Ltr:** Apertura final del arco
- **Ftr:** Fuerza en el punto de apertura final
- **Fco:** Tensión de la cuerda en el punto de apertura inicial

Para comparar mejor los resultados obtenidos con este modelo con el modelo de un arco de poleas convencional (véase punto 2.5), la geometría de las palas y el cuerpo deberá de ser la misma. Por ello la longitud de las palas (L_p) y el cuerpo (L_a) y el ángulo inicial de las palas (α_0) serán los mismos que los del modelo teórico de un arco convencional (véase Tabla 1). El valor de la fuerza de tensado inicial (F_{c0}) se sustituirá por el del ángulo de las palas en reposo

(α_{rep}) obtenido con el estudio del funcionamiento de los arcos convencionales (véase Fórmula 9). La apertura inicial (Lt_0) también será mayor, ya que las poleas añaden una separación entre los extremos de las palas y la cuerda. Este aumento de la separación se corresponde con el radio de la polea mayor ($R1$). En la tabla 2 se muestran los valores de los parámetros descritos en este punto, seleccionados para hacer los cálculos.

Tabla 4

Datos iniciales para calcular la curva de potencia de un arco de poleas

La(m)	Lp(m)	R1(m)	R2(m)	Lt ₀ (m)	Lt _f (m)	Ft _f (N)	α_0 (rad)
0,525	1,55	0,035	0,01	0,216	0,7	178	0,339

Elaboración propia

2.6.5. Relación entre las variables de diseño. Fórmulas

Como el modelo teórico varía respecto al modelo teórico de un arco convencional (véase punto 2.5), también es necesario volver a definir las ecuaciones para hacer los cálculos y desarrollar una hoja de cálculo para obtener la curva de potencia.

Para poder desarrollar la hoja de cálculo será necesario establecer una variable con la que relacionar todos los parámetros geométricos y todas las fuerzas (véase Ilustraciones 15 y 16). La mejor forma de hacerlo es definir una nueva variable que será el ángulo girado de las poleas al tensar la cuerda y se definirá con el símbolo Φ . Existe el problema de que no todos los parámetros se pueden establecer directamente con esta variable, Con los parámetros que no se pueda hacer esto, se creará una tabla con varios puntos donde se relacionen esos parámetros con Φ y mediante la función de estimación lineal se definirá una función de ese parámetro en función de Φ . Estas funciones se utilizarán luego en otra tabla donde se relacionarán todos estos parámetros.

Los primeros parámetros que se tienen que definir son la distancia entre los ejes de las poleas, el ángulo de los cables y el ángulo girado de las poleas. Estos dependerán del radio de la polea menor y la distancia inicial entre los ejes de las poleas.

$$\Phi = \frac{1}{\tan \theta_{1_0}} - \frac{1}{\tan \theta_1} + \theta_{1_0} - \theta_1 \quad [17]$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{R_1}{Lb}\right) \quad [18]$$

Con esta tabla se creará una tabla asignando valores a Lb de forma que estos vayan disminuyendo desde su valor inicial hasta un valor donde Φ sea alrededor de 4,5. Este valor se corresponde con el giro que tienen las poleas normalmente. Con la tabla obtenida se crearán las gráficas de Lb y θ_1 en función de Φ para ayudar a crear la función de estas y se usará la función de estimación lineal para crear estas funciones. En este caso las dos funciones que se obtienen son lineales y se usaran los siguientes símbolos para definir las funciones.

$$Lb(\Phi) = x_{1_{Lb(\Phi)}} * \Phi + c_{Lb(\Phi)} \quad [19]$$

$$\theta_1(\Phi) = x_{1_{\theta_1(\Phi)}} * \Phi + c_{\theta_1(\Phi)} \quad [20]$$

Una vez hecho esto se creará otra tabla para establecer θ_2 y Lc2 en función de Φ asignando variables a θ_2 y conociendo R2 y la función de Lb en función de Φ .

$$\Phi = \frac{c_{Lb(\Phi)} * \sec \theta_2 - Lb_0 - 2 * \tan \theta_2}{2 * R_2 - x_{1_{Lb(\Phi)}} * \sec \theta_2} \quad [21]$$

$$Lc2 = \frac{Lb_0}{2} + (\theta_2 + \Phi) * R_2 \quad [22]$$

La función que se obtiene de L2 es lineal y de θ_2 es radical, pero para definir esta última se usará una función polinómica de grado 6 con la que se queda bastante ajustada, ya que es más sencillo obtener funcione polinómicas con la hoja de cálculo.

Una vez se tienen estas cuatro ecuaciones se creará una tercera tabla donde se definan varios puntos con esos cuatro parámetros en función de Φ mediante las funciones obtenidas en las tablas anteriores y los parámetros que falta por definir que se podrán obtener con las fórmulas que se muestran a continuación. Lo primero es conocer la longitud de las palas (Lp), la cual se obtiene con la ecuación 23.

$$Lp = \sqrt{\left(\frac{R_1 - La}{2}\right)^2 + (Lt_0 - R_2)^2} \quad [23]$$

Con las ecuaciones de la 24 a la29 se pueden obtener los valores de los parámetros que faltan para completar la tabla.

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{Lb-La}{2*Lp} \quad [24]$$

$$Lt = Lc2 * \sin \theta 2 + R2 * \cos \theta 2 + Lp * \sin \alpha \quad [25]$$

$$Fpa = Fpf * \frac{\left(\frac{2*R2*\sin \theta 1+R1*\cos \theta 2}{R1*\sin \theta 2} \right) * \cos \alpha - \sin \alpha}{\left(\frac{2*R2*\sin \theta 1+R1*\cos \theta 2}{R1*\sin \theta 2} \right) * \sin \alpha + \cos \alpha} \quad [26]$$

$$Fc2 = \frac{Fpf*\cos \alpha - Fpa*\sin \alpha}{\sin \theta 2} \quad [27]$$

$$Fc1 = Fc2 * \frac{R2}{R1} \quad [28]$$

$$Ft = 2 * Fc2 * \sin \theta 2 \quad [29]$$

La fuerza flectora de la pala viene definida por una función lineal que dependerá de sus valores inicial y final, al igual que en el modelo teórico de un arco convencional, por lo que se deberán completar los datos de la primera y última fila de la tabla, los cuales se corresponden con los valores de apertura inicial y final del arco y de los que se conocen los datos suficientes para completar todos los valores de las filas. Para esto se puede usar la función *solver* de la hoja de cálculo para ayudar a obtener los resultados.

$$Fpf = x_{Fpf(\Phi)} * \alpha + c_{Fpf(\Phi)} \quad [30]$$

$$x_{Fpf(\Phi)} = \frac{Fpf_f - Fpf_0}{\alpha_f - \alpha_0} \quad [31]$$

$$c_{Fpf(\Phi)} = Fpf_0 - x_{Fpf(\Phi)} * \alpha_0 \quad [32]$$

Para hallar los valores inicial y final de este parámetro se hará a partir de la tensión de la cuerda (Fc2), usando ecuación 33.

$$Fpf = \frac{Fc2 * \sin \theta 2}{\cos \alpha - \frac{\left(\frac{2*R2*\sin \theta 1+R1*\cos \theta 2}{R1*\sin \theta 2} \right) * \cos \alpha - \sin \alpha}{\left(\frac{2*R2*\sin \theta 1+R1*\cos \theta 2}{R1*\sin \theta 2} \right) * \sin \alpha + \cos \alpha}} \quad [33]$$

Con estas fórmulas de la 30 a la 33 y datos iniciales definidos (véase tabla 4) se podrá elaborar la tabla (véase Tabla 5) y obtener la curva de potencia (ver Ilustración 17) del arco usando una hoja de cálculo.

2.6.6. Parametrización de las fórmulas. Tabla de resultados

Como no se tiene ninguna referencia de los radios de las poleas (R_1 y R_2), ya que no es usual que estas sean completamente redondas, además de que los arcos de poleas no suelen ser tan largos como los convencionales, se han ido probando varios valores para los radios hasta que se han determinado unos que aportan un rendimiento potencial (η_p) mayor (véase Tabla 4). Se ha tenido en cuenta que las poleas de los arcos rotan entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de vuelta, para determinar los radios.

La tabla 5 muestra la tabla con los valores de los parámetros L_t , α , F_{pf} , F_{pa} , F_{c1} , F_{c2} y F_t obtenida con la hoja de cálculo, desarrollada a partir de los valores iniciales definidos (véase Tabla 4) y las formulas desarrolladas en el punto 2.6.5.

Tabla 5
 Datos obtenidos con la hoja de cálculo

Lt (m)	α (rad)	Fpf (N)	Fpa (N)	Fc1 (N)	Fc2 (N)	Ft (N)
0,216	0,339	118,3	335	1216	347	0
0,235	0,339	118,3	311	1140	326	16
0,259	0,340	118,6	286	1059	303	33
0,281	0,341	118,9	266	997	285	46
0,318	0,342	119,6	236	907	259	67
0,349	0,344	120,3	216	848	242	81
0,386	0,346	121,3	196	790	226	95
0,430	0,349	123,0	177	738	211	110
0,468	0,353	124,9	163	705	201	121
0,511	0,358	127,5	151	677	193	133
0,554	0,364	130,1	139	653	187	144
0,597	0,369	132,6	129	633	181	155
0,637	0,374	135,1	120	620	177	164
0,671	0,379	137,6	114	612	175	172
0,700	0,384	140,1	109	610	174	178

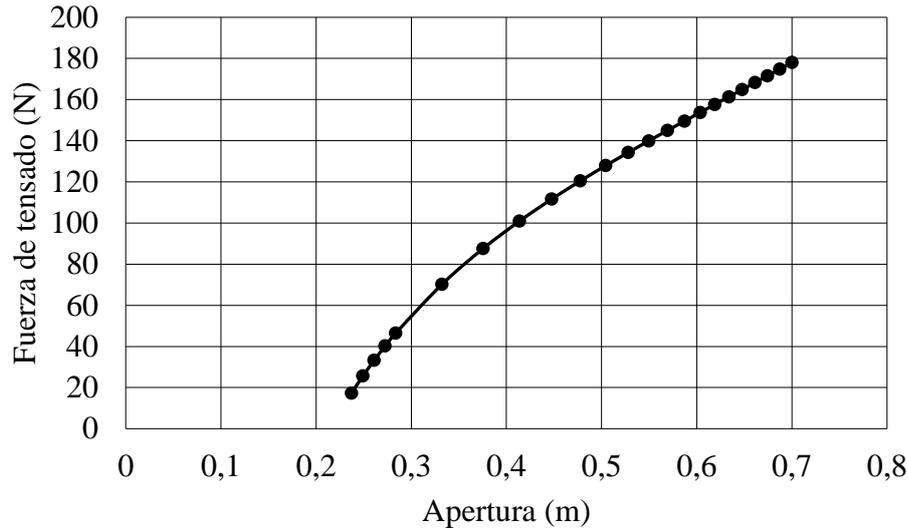
Fuente: Elaboración propia

Para los cálculos realizados con la hoja de cálculo del modelo teórico de un arco de poleas de este punto, la única diferencia que hay respecto a los valores iniciales del estudio del arco de poleas convencional (véase punto 2.5) es el coeficiente de rigidez de las palas. Se ha determinado un valor de 492 N/rad para que la fuerza de tensado final (F_{t_f}) sea la misma en los dos casos (véase formulas 6 a 8).

2.6.7. Obtención de la curva de potencia

En la ilustración 17 se muestra la curva de potencia obtenida con los valores de la Fuerza de Tensado (F_t) situados en el eje Y y la apertura (L_t) situada en el eje X que se muestran en la tabla 5 usando un gráfico de dispersión en la hoja de cálculo elaborada.

Ilustración 17 Curva de potencia del modelo teórico de un arco de poleas



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la ilustración 17 se puede observar que la curva que se ha obtenido es más convexa que la obtenida con el modelo de arco convencional (véase Ilustración 14 y punto 2.4.2), por lo que su rendimiento se supone que será mayor. No obstante, la forma de esta curva está lejos de parecerse a la de los arcos de poleas. La comparación entre las curvas de potencia obtenidas de los modelos teóricos de un arco convencional y un arco de poleas se detalla mejor en el punto 2.7.

2.6.8. Cálculo del rendimiento potencial

El rendimiento potencial (η_p) para este modelo se calculará de la misma forma que se ha calculado en el modelo teórico del arco convencional (véase punto 2.5.8). Para ello se obtendrá el valor fuerza de tensado (F_t) en función de la apertura del arco (L_t) usando la

función de estimación lineal de la hoja de cálculo y los datos de la curva de potencia obtenida (véase Ilustración 17 y tabla 5) y se calculará la energía potencial almacenada (E_p).

La ecuación 34 es la función polinómica obtenida mediante la función de estimación lineal de la hoja de cálculo de la fuerza de tensado (Lt) en función de la apertura (Lt).

$$Ft(Lt) = 1220,2 * Lt^3 - 2065 * Lt^2 + 1418,6 * Lt - 220,7 \quad [34]$$

La ecuación 35 es la integral definida de la función entre la apertura inicial (Lt_0) y la final (Lt_f), con la que se obtiene la energía que puede almacenar el arco al tensarse.

$$E_p = \int_{Lt_0}^{Lt_f} Ft(Lt) d(Lt) \quad [35]$$

La ecuación 35 muestra el resultado de la integral definida (E_p) (véase Ecuación 35) de la función de la curva de potencia obtenida ($Ft(Lt)$) (véase Fórmula 34).

$$E_p(J) = \left[\frac{1220,2}{4} * Lt_f^4 - \frac{2065}{3} * Lt_f^3 + \frac{1418,6}{2} * Lt_f^2 - 220,7 * Lt_f \right] - \left[\frac{1220,2}{4} * Lt_0^4 - \frac{2065}{3} * Lt_0^3 + \frac{1418,6}{2} * Lt_0^2 - 220,7 * Lt_0 \right] = 51J \quad [36]$$

El cálculo para obtener la energía potencial máxima, explicada en el punto 2.4.2, se definirá con el símbolo E_{max} , se obtiene multiplicando la fuerza de tensado máxima (Ft_{max}) por la apertura final (Lt_0) menos la inicial (Lt_f) del arco (véase Tabla 5).

$$E_{max}(J) = F_{fax} * (Lt_f - Lt_0) = 178 * (0,7 - 0,216) = 86,2J \quad [37]$$

Una vez obtenidas la energía que se puede acumular en el arco (E_p) y la máxima que se podría almacenar ($E_{p_{max}}$) se puede calcular el rendimiento potencial del arco (η_p), descrito en el punto 2.4.2, usando la siguiente ecuación.

$$\eta_p(\%) = 100 * \frac{E_p}{E_{max}} = 100 * \frac{51}{86,2} = 59,2\% \quad [38]$$

2.6.9. Cálculo del rendimiento cinemático

Como el modelo teórico que se ha desarrollado es demasiado simple y no se ha podido comparar con ningún arco de poleas, no ha sido posible determinar la velocidad de las flechas disparadas (v_f) con un arco con las características obtenidas con este modelo teórico. En vez

de eso se establecerá un rendimiento cinemático (η_c) (véase punto 2.4.2) y a partir de este, se determinará la velocidad teórica de las flechas disparadas (v_f).

Como las pérdidas de energía son mayores en los arcos de poleas que en los arcos convencionales, se establecerá un rendimiento (η_c) del 85%, un poco menor para este modelo respecto al modelo anterior. Para poder comparar el modelo teórico del arco convencional con el del arco de poleas, se usará el mismo peso para la flecha (ver Tabla 6).

Tabla 6
Datos para el cálculo de la velocidad teórica de las flechas

m_f (Kg)	η_c (%)
0,0292	85

Fuente: Elaboración propia e Internet

Para el estudio hecho con los parámetros de diseño establecidos en el punto 2.6.4 (véase Tabla 4), la energía de la flecha se calculará a partir de la energía potencial (E_p) que puede acumular el arco (véase ecuación 36) y el rendimiento cinético establecido (véase tabla 6).

$$E_c(J) = E_p * \frac{\eta_c}{100} = 51 * \frac{85}{100} = 43,4J \quad [39]$$

Una vez se conoce la energía de la flecha (véase ecuación 39) y el peso de la flecha (véase tabla 6) se puede calcular su velocidad.

$$v_f \left(\frac{m}{s} \right) = \sqrt{E_c * \frac{2}{m_f}} = \sqrt{43,4 * \frac{2}{0.0292}} = 54,5m/s \quad [40]$$

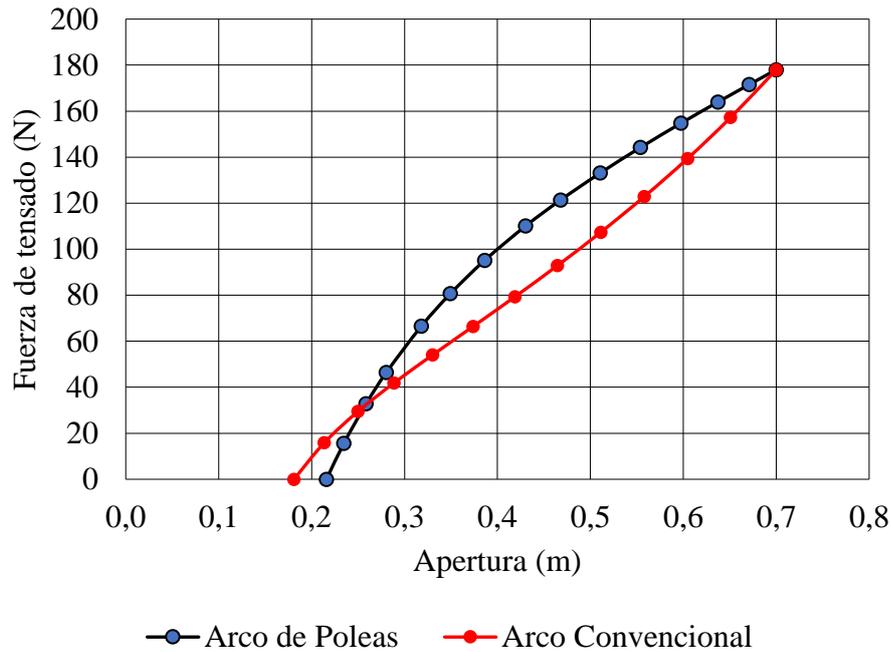
2.7. Comparación entre los modelos de un arco convencional y de un arco de poleas

En este apartado se comparan los resultados de los dos modelos teóricos desarrollados en los puntos 2.5 y 2.6 para verificar que los cálculos realizados son válidos y que se pueden usar para hacer el diseño de un arco.

En primer lugar, se comparan las curvas de potencia obtenidas con los dos arcos (véase Ilustración 18). La fuerza de tensado máxima ($F_{t_{max}}$) y la apertura (L_t) son las mismas, así como los parámetros iniciales de diseño (véase tablas 1 y 4). No obstante, se puede ver que la

curva del arco de poleas es más convexa y por lo tanto la energía potencial que este puede almacenar será mayor, a pesar de que la apertura inicial (F_{t0}) sea mayor en el arco convencional.

Ilustración 18 Comparación de las curvas de potencia obtenidas de los modelos de arco convencional y de poleas



Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se pueden observar mejor los datos del coeficiente de rigidez de las palas (K), la apertura inicial (L_{t0}) la Energía potencial (E_p), energía cinética (E_c), rendimiento potencial (η_p) y rendimiento cinético (η_c) obtenidos en los puntos 2.5 y 2.6.

Tabla 7

Comparación de los datos obtenidos con los modelos de arco convencional y de poleas

Arco	K (N/rad)	L_{t0} (m)	E_p (J)	E_c (J)	η_p (%)	η_c (%)
Convencional	304	0,181	45,5	41	49,3	90,1
Poleas	492	0,216	51	43,4	59,2	85

Fuente: Elaboración propia

Los cambios que hay entre los parámetros de diseño de los dos modelos es la rigidez de las palas y la apertura inicial (véase tabla 7), pero se puede considerar que los dos arcos tienen

las mismas características excepto por las poleas. Las rigideces de las palas (K) deben de ser distintas porque es la única manera de hacer coincidir las fuerzas de tensado máxima ($F_{t_{max}}$) y la diferencia de la apertura inicial se debe a que el radio de las poleas ($R1$ y $R2$) incrementan este valor.

Si se observan los rendimientos y las energías (véase tabla 7), se puede observar que añadiendo unas poleas a los extremos de las palas de un arco se consigue efectivamente aumentar la energía que este es capaz de almacenar sin aumentar la fuerza máxima ejercida ($F_{t_{max}}$) y sin tener que tensar más el arco. También se observa que pesar de que el rendimiento cinemático (η_c) es algo menor en los arcos de poleas debido a que sus partes móviles tienen mayor peso y hace que se pierda más energía que en los arcos convencionales, la energía final transmitida a la flecha sigue siendo mayor en los arcos de poleas.

Se han hecho cálculos con la hoja de cálculo y las formulas elaboradas (véase punto 2.6.5) estableciendo el radio de la polea mayor ($R2$) con un valor de 0, lo que equivaldría a un arco convencional y los resultados han sido los mismos que los obtenidos con el modelo teórico de un arco convencional (véase puntos 2.5.6 y 2.5.7). Con esto se puede determinar que estos dos modelos son válidos para hacer cálculos para el diseño.

Sin embargo, el modelo teórico de un arco de poleas no es muy preciso, ya que los cálculos solo se pueden hacer, partiendo de que las poleas son completamente redondas. Se han hecho pruebas con la hoja de cálculo elaborada cambiando los valores de los parametros iniciales de diseño (véase Tabla 4) y el rendimiento potencial (η_p) no se ha conseguido mejorar más del 65%. Además, no se ha conseguido que la fuerza de tensado (F_t) vuelva a disminuir en el punto de máxima apertura ($L_{t_{max}}$) y esta es una característica importante en un arco de poleas (véase punto 2.4.1).

Con esto se llega a la conclusión de que este modelo no basta para diseñar un arco de poleas eficiente, por lo que hay que modificar el modelo de forma que el radio de las poleas ($R1$ y

R2) sea variable y esté definido por algún parámetro. Esta modificación implica que se tienen que volver a definir los cálculos para que se puedan obtener resultados válidos. Este nuevo modelo se desarrollará en el punto 3.5.3 donde se tomará como base el estudio y los modelos teóricos desarrollados en los puntos 2.5 y 2.6 para diseñar un nuevo modelo teórico donde se puedan diseñar unas poleas que tengan una geometría que aporte un mayor rendimiento potencial (η_p) al arco que se va a diseñar.

Capítulo 3. Método para el diseño y fabricación de arcos de poleas

En este capítulo se va proceder a explicar el método de diseño y fabricación de arcos de poleas. Simultáneamente al desarrollo de las distintas fases en las que está dividida el método se irá desarrollando el diseño de un arco. De esta manera se podrá observar cómo se tiene que ir aplicando el método propuesto. Para la correcta aplicación del método es necesario que se sigan en orden las distintas fases en las que este está dividido. Es importante seguir el orden descrito, ya que para aplicar una fase son necesarios los datos y la información obtenidos de las fases anteriores. Estas fases se describen con mayor detalle en el siguiente apartado.

3.1. Fases de Diseño y Fabricación de un Arco de Poleas

Las fases principales en las que se divide este trabajo son las siguientes:

1. **Análisis de los componentes de los arcos de poleas.** Esta fase servirá para obtener un conocimiento lo más amplio posible de los componentes y piezas que son necesarios para fabricar los arcos de poleas y su función.
2. **Estudio del mercado actual de los arcos de poleas.** Este apartado servirá para comparar los distintos tipos de arcos de poleas que existen en el mercado y así poder decidir cuáles son las características que debe tener el arco que se va a diseñar. Con esto se conseguirá diseñar un arco con unas características que estén al nivel de las de los arcos que existen en el mercado.
3. **Modelo teórico y cálculos para el diseño de la geometría de los componentes.**
En esta fase se desarrollará un nuevo modelo teórico de arco de poleas con sus respectivas fórmulas, para poder definir la geometría de las poleas y hacer un diseño mejor que con el modelo teórico desarrollado en el apartado 2.6.
4. **Diseño y determinación de los materiales de los componentes.** En esta fase se determinarán los materiales y la geometría de los componentes necesarios para

la fabricación de un arco de poleas a partir de los cálculos realizados en la fase anterior y se hará un diseño en 3D estos mediante el paquete de software *Siemens NX* con el fin de dibujar unos planos que servirán para fabricar estos componentes.

5. **Procesos de fabricación de los componentes.** En este apartado se determinará cuál es la mejor manera de fabricar los componentes a partir de los planos dibujados para que su coste de fabricación sea lo más reducido posible.
6. **Pruebas y ensayos para determinar las características reales.** Esta fase servirá para verificar que el modelo teórico desarrollado para el diseño de este tipo de arcos es válido y que las características reales del arco coinciden con las que se habían establecido en el diseño. En ella se describirán los pasos que se deben seguir para realizar estas pruebas.
7. **Rediseño y mejora.** En esta fase se establecerán unos conceptos a tener en cuenta en el caso que se quieran hacer modificaciones en el diseño original, a partir de los resultados obtenidos en las pruebas descritas en la fase anterior, para mejorar sus características

Para las fases de pruebas y ensayos, rediseño y mejora solo se explicarán los pasos a seguir para su desarrollo. No se desarrollarán estas fases porque el trabajo se centra solo en la parte de desarrollo de la memoria. Además, para llevar a cabo estos pasos se debería invertir dinero y más tiempo para fabricar un prototipo y realizar las pruebas y ensayos con este.

3.2. Fase 1. Análisis de los Componentes de los Arcos de Poleas

Esta primera fase servirá para definir cuáles son las piezas y componentes de un arco de poleas y qué función desempeñan. También se compararán las distintas configuraciones y materiales para establecer cuál es mejor usar para el arco que se va a diseñar. Con esto se

determinará que componentes son necesarios para diseñar y fabricar un arco de poleas y cuales son opcionales.

3.2.1. Componentes necesarios para fabricar un arco de poleas

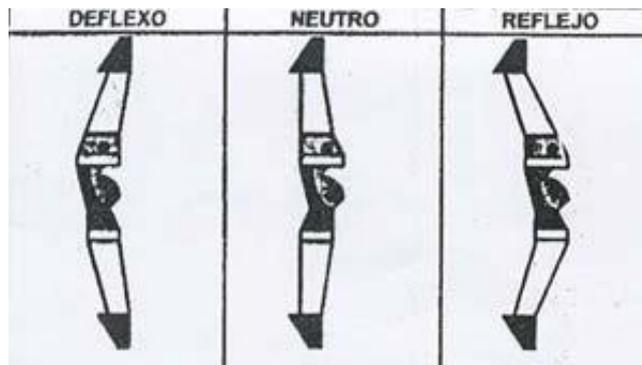
En este punto se enuncian y describen los componentes que son necesarios para fabricar un arco de poleas. Estos componentes están específicamente diseñados para cada arco y es poco frecuente que alguno de estos componentes sirva para otros arcos. Es por eso que estos componentes se diseñarán a partir de unos cálculos realizados previamente de forma que su fabricación no sea demasiado costosa.

En la siguiente imagen se muestran los componentes que se tendrán que diseñar:

- **Cuerpo:** Los cuerpos de los arcos convencionales y de los de poleas suelen ser parecidos. Se suele usar madera para los arcos convencionales y materiales más ligeros y resistentes como el aluminio o la fibra de carbono para los de poleas, ya que estos tienen que soportar fuerzas y tensiones mayores a la vez que tienen que mantener su rigidez. En los arcos de mayor potencia, los puntos de unión del cuerpo con las palas suelen ser más amplios para que la fuerza flectora que se produce en estos puntos no genere tensiones tan elevadas en el cuerpo.

Existen tres tipos e cuerpos en función de la posición de la empuñadura respecto al punto de unión de estos con las palas. La forma que tenga el cuerpo influirá sobre todo en la estabilidad y el manejo.

Ilustración 19 Tipos de cuerpos de los arcos



Fuente: Internet

A continuación, se detallan los tres tipos de cuerpos:

- El cuerpo **deflexo**, es el que tiene la empuñadura por delante del extremo inicial de las palas. Los arcos que usan este tipo de cuerpo tienen a ser más estables y fáciles de manejar por lo que son los más indicados para los principiantes. Con este tipo de cuerpo los arcos tienen una potencia menor, por lo que pueden ser disparados con los dedos.
 - Cuerpo **neutro**, las características de los arcos que utilizan este tipo de cuerpo están entre las de los cuerpos deflexos y los reflejos. Con este tipo de cuerpo, los arcos todavía se pueden disparar con los dedos.
 - Cuerpo **reflejo**, los arcos que usan este tipo de cuerpo son más inestables y difíciles de manejar. Por el contrario, con estos arcos se consiguen unas potencias y velocidades en las flechas mayores que con los otros dos tipos de cuerpo. Con este tipo de arcos se tiene que usar un disparador para poder lanzar las flechas, ya que las elevadas potencias que tienen no permiten el lanzamiento con los dedos. El uso de arcos con este tipo de cuerpo solo está recomendado para arqueros expertos.
- **Poleas:** Son los componentes más característicos de los arcos de poleas. Según la geometría que tengan, el arco tendrá mayor o menor capacidad de almacenar

energía cuando se tensa, por eso, si se quiere que el arco tenga un buen rendimiento, el diseño de estos componentes debe de ser preciso y se tiene que encontrar la geometría que mejor funcione. Suelen usarse materiales ligeros, rígidos y resistentes. El aluminio es el más utilizado por cumplir con estas características.

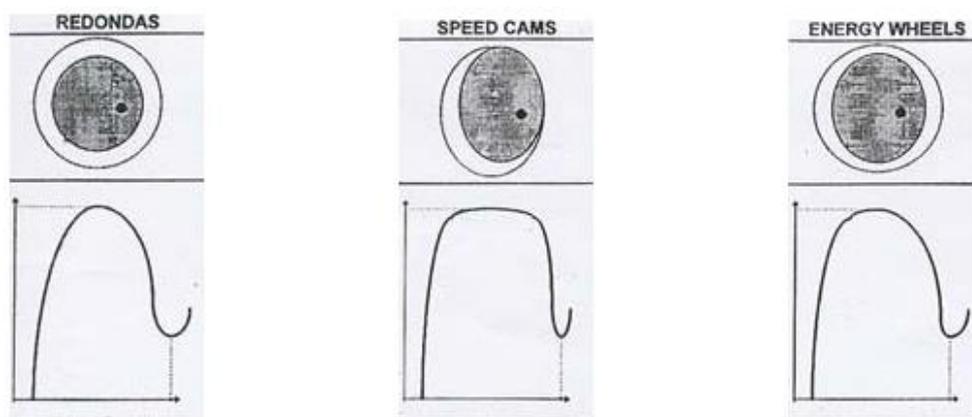
Ilustración 20 Polea



Fuente: Internet

Según su forma, se pueden distinguir tres tipos de poleas, cada una con variaciones en su geometría que aportan al arco un rendimiento mayor o menor:

Ilustración 21 Tipos de poleas según su geometría y forma de la curva de potencia que desarrollan



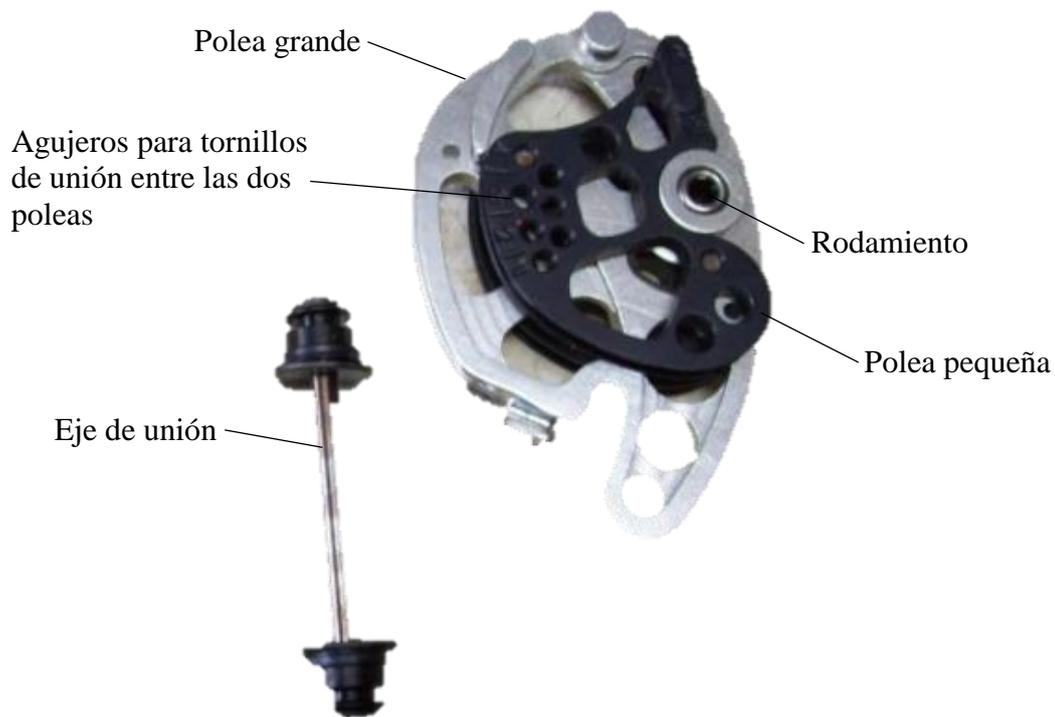
Fuente: Internet

- **Redondas:** son las que tienen una geometría más sencilla ya que su forma es redonda y aporta una salida de la flecha suave y uniforme. Se suelen usar en arcos de menores prestaciones.
- **Energy wheels:** en este tipo de poleas el módulo menor tiene una geometría asimétrica, mientras que el módulo mayor tiene una forma redonda. Los arcos que incorporan este tipo de poleas aportan más energía a las flechas ya que la curva de la gráfica fuerza-apertura es más amplia que en los que incorporan poleas redondas.
- **Speed cam:** son las poleas que aportan mayor rendimiento y prestaciones a las flechas disparadas. En este tipo de poleas la geometría de los dos módulos es asimétrico por lo que su diseño y fabricación es más complejo. En la gráfica de fuerza-apertura se puede ver que la curva presenta una apertura casi máxima. Este tipo de poleas son las más usadas en los arcos de altas prestaciones y dependiendo del fabricante se puede encontrar una gran variedad de este tipo de poleas, cada una con sus propias características.

La unión entre la pala y la polea se suele hacer mediante un pequeño eje que se sujeta con una arandela de seguridad en cada en cada extremo para evitar que este se salga de su sitio. Este eje solo está sometido a fuerzas flectoras, no se ejerce ninguna fuerza axial sobre este. Entre el eje y la polea se suele poner un rodamiento para evitar la fricción entre estas dos partes y reducir su desgaste, ya que las poleas adquieren velocidades elevadas cuando se disparan las flechas. En los arcos de bajas prestaciones se ponen casquillos en lugar de rodamientos.

La unión entre la polea mayor y la menor se hace con uno o varios tornillos, de forma que el ángulo entre la grande y la pequeña se puede regular. Con esto se consigue variar la apertura de tensado del arco.

Ilustración 22 Detalle de polea



Fuente: Internet

Todo esto se tiene que tener en cuenta a la hora de diseñar el arco para que este cuente con unas características similares a los arcos que se pueden encontrar en el mercado.

- **Separacables:** El separacables es un elemento en forma de palo que se sitúa cerca del centro del cuerpo de los arcos y su función principal es hacer que los dos cables no estén en contacto y su movimiento sea más suave al disparar el arco, evitando así el desgaste de estos componentes. Las fuerzas que tiene que soportar son pequeñas. La parte del separacables que sujeta los cables puede ser una pieza que se desliza por el tubo o estar formada por dos elementos rotativos que reducen la fricción de los cables y el ruido al disparar el arco. El diseño de este componente es sencillo.

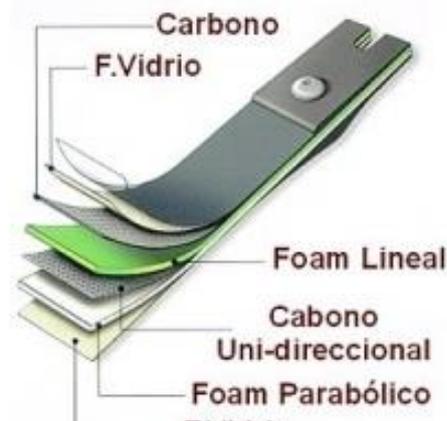
Ilustración 23 Separacables sin elementos rodantes (izquierda) y con ellos (derecha)



Fuente: Internet

- **Palas:** Son los elementos donde se almacena la fuerza que tensa los cables y la cuerda de los arcos. Estas deben de tener una gran resistencia y, al mismo tiempo, ser flexibles. En los arcos de poleas se suelen utilizar materiales compuestos, como la madera, la fibra de vidrio o la fibra de carbono, que cumplen con estas características, además de ser ligeros. La fibra de vidrio y la fibra de carbono se usan más en los arcos de poleas y la madera en los arcos convencionales debido a que en los primeros, las fuerzas que tienen que soportar son mayores. Para la fabricación de estos componentes se fabrica primero una placa de fibra de vidrio con la forma del perfil de las palas y luego se cortan en varias piezas para obtener la forma final. El mejor método para cortar la forma de las palas con precisión es mediante una cortadora de chorro de agua controlada por ordenador.

Ilustración 24 Composición de las palas de un arco de poleas



Fuente: Internet

La unión entre las palas y el cuerpo se suele hacer mediante un tornillo que soporta toda la fuerza flectora de las palas y a su vez sirve para regular la fuerza que las palas ejercen sobre los cables y la cuerda. En este extremo de las palas se suele poner algún elemento que permita sujetar el tornillo a esta.

Ilustración 25 Unión entre las palas y el cuerpo del arco



Fuente: Internet

- **Cables y cuerda:** Estos elementos están sometidos a tensiones elevadas, vibraciones y fricción entre los elementos con los que está en contacto, por eso,

para que aporten un buen rendimiento al arco que se va a diseñar, tienen que tener las siguientes cualidades:

- Resistencia: Las cuerdas deben tener una resistencia que les permita soportar las tensiones a las que están sometidas y un elevado número de ciclos de tensado y disparo.
- Poca elasticidad: Las cuerdas deben de ser lo menos elásticas posible, para que estas absorban la menor cantidad de energía del arco en la deformación que sufren al tensarse. También hay que tener en cuenta que una elasticidad menor supone que se transmitan más tensiones a los otros componentes del arco, por lo que estos sufren un mayor deterioro, sobre todo si son de madera.
- Ligereza: Otra cualidad importante es el peso de las cuerdas. La cuerda alcanza velocidades elevadas al disparar el arco, por lo que cuanto menor sea el peso, menor será la energía que se no se transfiera a la flecha.

Las cuerdas están fabricadas con hilos más finos de materiales que cuentan con las características descritas anteriormente. Dependiendo de la tensión que tengan que soportar las cuerdas, estas estarán fabricadas con un número mayor o menor de hilos. Las zonas donde se produce más rozamiento con otros componentes del arco, como sus extremos, la zona que está en contacto con las poleas y la zona por donde se tensa la cuerda, suelen estar cubiertas con hilo de los mismos materiales para evitar un desgaste excesivo que puede causar su rotura.

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de materiales con los que fabricar las cuerdas de los arcos. Estos son tres tipos de hilo utilizados habitualmente:

- *Dacrón*: Es un hilo compuesto de fibras de poliéster. Se caracteriza por tener un alto coeficiente de elasticidad (12%). Su resistencia a la fricción es baja, por lo que la durabilidad de las cuerdas de este material es baja. Su resistencia a la tracción es de 50 lb por hilo.
- *Fast Flight*: Los hilos están compuestos por fibras de polietileno. Su coeficiente de elasticidad es casi nulo (2%) y tiene una resistencia a la tracción de 95 lb por hilo. Su resistencia a la fricción es muy elevada, por lo que las cuerdas fabricadas con este material son muy fiables.
- *Formula 8225*: Este hilo está fabricado también con fibras de polietileno, aunque el proceso de filamentación que se usa para su fabricación hace que este sea más fino y resistente a la tracción que el *fast flight*, 155lb por hilo. También tienen una gran resistencia a la fricción. Su elasticidad es casi nula por lo que los materiales de los otros componentes del arco que usan cuerdas de este material deben de poder soportar las tensiones que estas producen.

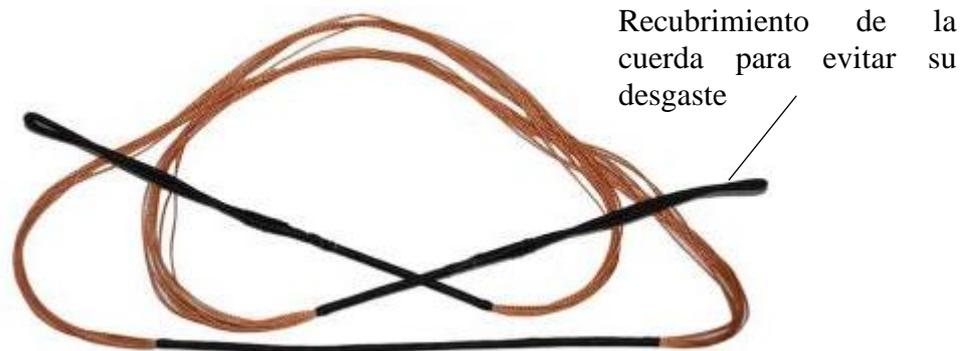
Ilustración 26 Carrete de hilo para fabricar cuerdas

Fuente: Internet

Por lo general las cuerdas para los arcos que tienen una fuerza máxima de entre 45 y 50 lb se suelen tener entre 16 y 18 hilos, aunque esta cantidad varía según las preferencias del arquero. Cuando se instalan las cuerdas en los arcos se les suele dar unas vueltas para que los hilos queden más compactados y ordenados. Se suele dar una vuelta por cada 3 pulgadas de longitud de la cuerda. Estos valores se tendrán en cuenta a la hora de diseñar la cuerda y los cables del arco.

Para el diseño y fabricación de estos componentes se hará un plano donde se especifique su longitud, material del hilo, número de hilos de los que están compuestas, número de vueltas que deben de tener, las zonas donde se debe de recubrir la cuerda con hilo y el material de este hilo.

Ilustración 27 Cuerda para arco



Recubrimiento de la cuerda para evitar su desgaste

Fuente: Internet

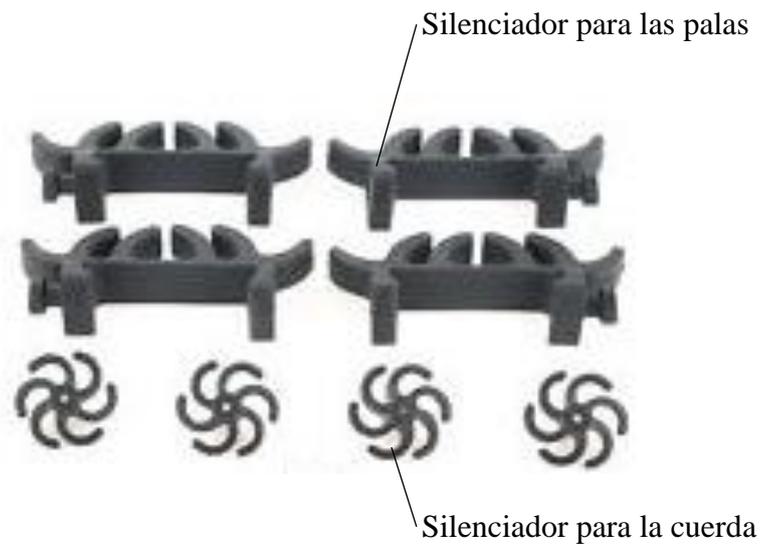
3.2.2. Componentes opcionales y accesorios

Estos componentes son opcionales a la hora de diseñar un arco, ya que estos no son necesarios para que los arcos funcionen. No obstante, la incorporación de estos componentes sirve de ayuda a la hora de apuntar o disparar las flechas y aportan mayor precisión y comodidad.

Para el diseño del arco que se va a hacer en este trabajo no se va a diseñar ninguno de estos componentes, puesto que estos se pueden conseguir en el mercado de forma sencilla. No obstante, sí que se tendrá en cuenta a la hora de diseñar el arco, que estos componentes se puedan incorporar al arco.

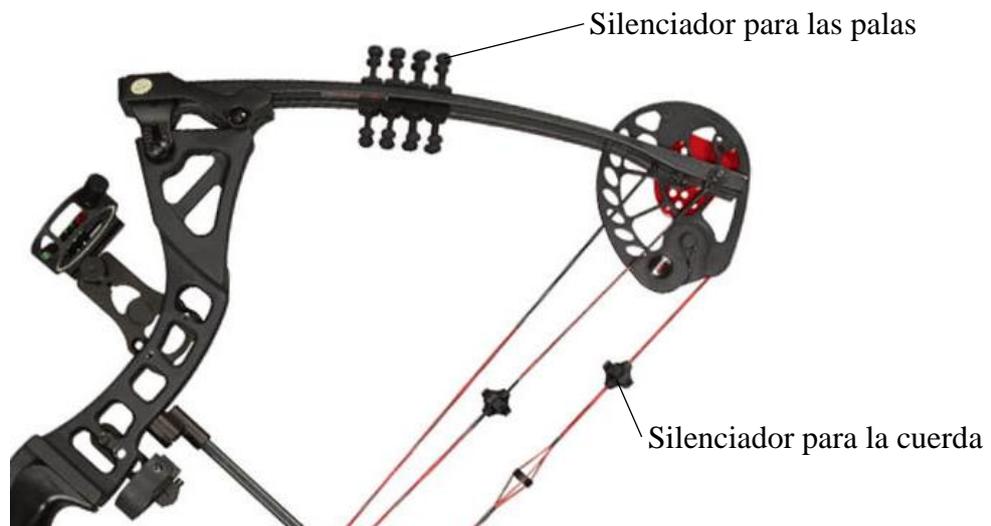
- **Silenciadores:** Estos son piezas de goma que se incorporan en distintas partes de los arcos, generalmente las palas, y los extremos del cuerpo y la cuerda, para reducir las vibraciones y el sonido que se producen al dispararlos y así, mejorar su comodidad al usarlos. Estos silenciadores se pueden instalar sencillamente en la cuerda, pero se deberá tener en cuenta a la hora de diseñar las palas, que estos se puedan instalar sobre ellas.

Ilustración 28 Silenciadores para arcos



Fuente: Internet

Ilustración 29 Ubicación de los silenciadores



Fuente: Internet

- **Mira:** Aportan una mayor precisión al disparar con los arcos. Dependiendo de si el arco se va a utilizar para caza o para la práctica del tiro con arco, se utiliza un tipo de mira u otro. Estas van sujetas normalmente con dos tornillos en la parte central del cuerpo del arco, así que, se deberá tener en cuenta al diseñar el arco de incorporar dos agujeros o roscas para poder instalarle una mira

Ilustración 30 Mira para caza



Fuente: Internet

Ilustración 31 Mira para tiro con arco



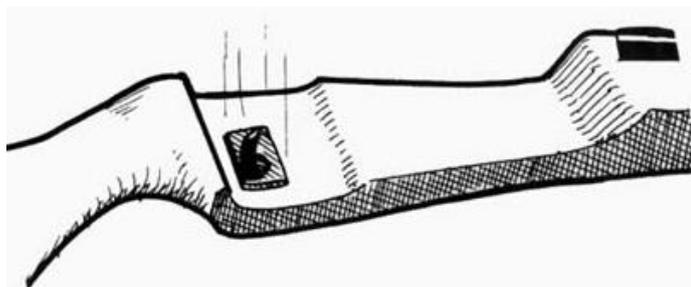
Fuente: Internet

- **Estabilizadores:** Este componente ayuda a mantener el arco estable a la hora de disparar con el arco. Estos no se suelen usar en la caza, ya que son voluminosos y dificultan el transporte y el manejo del arco. Para el arco que se va a diseñar no se usará ningún estabilizador, ya que este componente no se suele utilizar normalmente.

Ilustración 32 Arco con estabilizador

Fuente: Internet

- **Reposaflechas:** Sirve para sujetar la flecha sobre la parte central del arco. Este componente es esencial, aunque siempre se incorpora como un opcional, ya que existen gran variedad de reposa flechas que, dependiendo de sus características harán que la trayectoria de la flecha tenga mayor o menor precisión. Hay que tener en cuenta a la hora de diseñar el arco, de que se pueda instalar un reposaflechas.

Ilustración 33 Reposaflechas simple

Fuente: Internet

Ilustración 34 Reposaflechas de altas prestaciones



Fuente: Internet

- **Nock Point:** Son unos anillos que se colocan en el centro de la cuerda y que ayudan a colocar la flecha sobre la cuerda a la altura correcta.

Ilustración 35 Nock point



Fuente: Internet

3.3. Fase 2. Estudio del Mercado Actual de los Arcos de Poleas

En esta fase se hará un estudio de algunos arcos disponibles en el mercado actual para obtener las principales características de estos y poder compararlas. Esta información servirá para hacer el diseño del arco de forma que este tenga unas características similares a las de los demás arcos. El estudio se divide en dos partes, una primera en la que se tendrán en cuenta

las características principales de los arcos que se enuncian más adelante y otra parte en la que se estudiarán los distintos tipos de poleas, su funcionamiento y las ventajas e inconvenientes que tiene cada tipo.

Para hacer un primer diseño de un arco se buscará que su nivel de calidad sea similar al de los arcos de prestaciones medias y precio asequible disponibles en el mercado, ya que su principal propósito es verificar que el método de diseño funciona. Además, si no se quiere invertir demasiado dinero en la fabricación del prototipo para realizar las pruebas y ensayos requeridos, los procesos de fabricación y los materiales deberán de ser económicos. En este primer diseño también interesa desarrollar un arco que sea versátil. Por ello, su potencia y su apertura se deberán ajustar para que puedan ser usados por personas adultas de diversas estaturas y para su uso tanto para caza como para la práctica del tiro con arco. Esto será útil en el caso de que se quiera observar el comportamiento del arco con distintos tipos de uso.

3.3.1. Estudio de las características de distintos tipos de arcos

Para hacer este estudio se buscará información sobre distintos arcos que cuenten con unas características adecuadas a las que deberá tener el primer diseño de arco desarrollado con este modelo.

En este estudio se deberán comparar las siguientes características de varios arcos disponibles en el mercado. Aunque puede haber más, estas son las características esenciales para hacer el diseño del arco:

- **Coste:** Para esta característica hay que distinguir entre el coste de fabricación y precio de venta. Este último dependerá del primero y de los beneficios que se quieran obtener con la venta del arco diseñado. Para hacer el diseño interesa establecer un coste de fabricación máximo y mínimo para que el precio de venta sea adecuado a las características y calidad del arco diseñado. Dependiendo de la calidad de los materiales y de los procesos de fabricación este coste será mayor o

menor. Por lo general el coste de fabricación es 3 veces menor que el precio de venta, así que el coste del arco diseñado se determinará a partir del precio de venta medio de los arcos comparados en este estudio y de esta relación.

- **Peso:** El peso de un arco es una característica importante, ya que este debe de ser lo más ligero posible para que el arco pueda ser lo más cómodo y manejable posible. Para esta característica se establecerá un peso máximo a partir de los pesos de los arcos estudiados en esta fase.
- **Fuerza de tensado:** La característica principal a tener en cuenta será la fuerza máxima de tensado, ya que, dependiendo de si este va a ser usado para la caza o para la práctica del tiro con arco, esta fuerza será mayor o menor. Es por esto que los arcos estudiados deberán tener unas fuerzas de tensado similares. Para el tiro con arco de competición se suelen usar potencias de hasta 45 lb, aunque esta puede ser mayor y para la caza con arco la potencia mínima legal para usarlos en España son 45 lb. Esto es comprensible, ya que, si se usa un arco para cazar, este debe tener suficiente potencia para abatir los animales que se vayan a cazar. Dependiendo del tamaño de las presas, el arco que se usará será de mayor o menor potencia. Como el arco que se va a diseñar está destinado a ser usado tanto para competición como para caza la fuerza mínima de este será de entre 30 y 45 lb. Al mismo tiempo la fuerza máxima de este será de entre 60 y 70 lb, ya que, arcos con potencias mayores no se suelen usar para cazar y son difíciles de manejar debido a la fuerza que se tiene que ejercer para tensarlos. Por lo tanto, en este estudio, los arcos analizados tendrán una fuerza de entre 30 y 70 lb.
- **Apertura (Lt):** Esta longitud dependerá de la estatura de la persona que use el arco y en la mayoría de estos arcos la apertura es regulable, por ello en el arco que se va

a diseñar, esta tendrá un rango que se definirá a partir de los arcos estudiados en esta fase.

- **Distancia entre los ejes de las poleas (L_b):** Con esta característica se puede definir el tamaño de los arcos. Esta distancia también está relacionada con la potencia que desarrolla un arco.
- **Apertura inicial o “*brace height*” (L_{t0}):** Esta característica permite conocer el tipo de cuerpo que tienen los arcos y es un dato que se debe conocer para poder hacer los cálculos para el diseño del arco.
- **Cadencia final o “*let off*”:** Es importante conocer este dato de los arcos estudiados para establecer una cadencia similar en el arco que se va a diseñar.
- **Velocidad de las flechas disparadas (v_f):** Esta característica es la que permite medir de la forma más directa la potencia que desarrolla un arco, por eso es un dato importante a tener en cuenta para comparar los arcos estudiados en esta fase.

Una vez establecidas las características de los arcos que se van a estudiar se seleccionarán unos arcos con características similares, teniendo en cuenta que la fuerza máxima de tensado (F_t) se tiene que ajustar a los valores que va a tener el arco que se va a diseñar y el precio no tiene que ser excesivo. En la tabla 8 se muestran los arcos analizados con las características descritas al inicio de este punto.

Tabla 8
Comparación de algunos arcos de poleas existentes en el mercado

Modelo	<i>Mission Riot 2012</i>	<i>PSE Drive R</i>	<i>PSE Phenom SD</i>	<i>Mathews Creed XS</i>	<i>Hoyt Defiant Turbo 2016</i>
Imagen					
Fuerza de tensado máxima	15-70 lb	40-70 lb	30-60 lb	50-70 lb	30-70 lb
Apertura	19"-30"	25"-30,5"	27,5"-33"	26"-30"	24"-30"
Distancia entre ejes	31"	30"	36"	28"	33"
Apertura inicial	7"	6,75"	7,25"	7,5"	6"
Cadencia	80%	75%	75%	80%	-
Velocidad de las flechas disparadas	310 fps	336 fps	328 fps	321 fps	350 fps
Peso	4,3 lb	3,8 lb	4,3 lb	3,8 lb	4,2 lb
Precio	369€	515 €	665 €	740 €	895 €

Fuente: Internet

Estas son los resultados que se obtienen de la tabla 8 anterior para determinar las características del arco que se va a diseñar con este método:

- Las fuerzas máximas y mínimas son similares a las fuerzas que se quieren obtener para el diseño del arco, por lo que las características de estos sirven como referencia para determinar las del arco que se va a diseñar.
- La apertura de los arcos está entre las 19” y 33” esto dependerá sobre todo de la estatura de la persona, cuanto más alta sea esta, más grande será la apertura del arco para que esta pueda usar el arco con comodidad. La apertura más óptima para una persona de 175 cm de estatura son 28”. A partir de esta referencia se puede obtener mediante proporcionalidad la apertura para cualquier estatura. Para definir la apertura del arco se escogerá una estatura de los usuarios de entre 150 cm y 190 cm. Por lo que las aperturas serán de entre 24” y 31”. Se puede observar que los arcos analizados tienen una apertura similar.
- Para la distancia entre ejes y la apertura inicial se puede observar que la primera alcanza valores de entre 28” y 36” y la segunda entre 6” y 7,5”. Estos son valores típicos de los arcos con cuerpo reflejo, por lo que el arco que se va a diseñar tendrá este tipo de cuerpo y estos rangos de distancias.
- En los arcos analizados la cadencia de la fuerza final de tensado tiene valores de entre 75% y 80%, por lo que se intentará que el arco que se va a diseñar alcance este valor.
- En cuanto al peso, este tiene unos valores de entre 3,8 y 4,3 lb. Esto dependerá sobre todo de los materiales usados para la fabricación del arco. Para el arco que se va a diseñar se establecerá un peso máximo de 4,3 lb.
- Respecto al precio de los arcos estudiados, este tiene valores muy variados, desde los 369€ hasta los 895€. Para este estudio no se han incluido arcos fabricados en

fibra de carbono, ya que esta característica hace que estos alcancen precios de unos 1200€. Con estos datos y teniendo en cuenta que el coste de fabricación es unas 2 veces mayor que el precio de venta, para el arco que se va a diseñar se establecerá un coste de fabricación de entre 200 y 450€.

- Finalmente, la velocidad de las flechas servirá como referencia para calcular un rendimiento cinemático aproximado del arco que se va a diseñar. Para poder comparar la velocidad real de las flechas disparadas con este arco con los estudiados será necesario fabricar un prototipo y hacer las debidas pruebas y ensayos.

En la tabla 9 se muestran los valores de las características que deberá tener el arco que se va a diseñar y que se usarán para el desarrollo de las siguientes fases en unidades de medida anglosajonas y su conversión en el sistema internacional, ya que los cálculos del punto 3.4 se harán utilizando las unidades del sistema internacional.

Tabla 9

Valores de las características principales para el diseño del arco de poleas

	Unidades anglosajonas	Unidades del SI
Fuerza de tensado máxima ($F_{t_{max}}$)	30 - 70 lb	135 - 320 N
Apertura (Lt)	25" - 30"	0,640 - 0,770 m
Distancia entre ejes (Lb)	28" - 36"	0,710 - 0,910 m
Apertura inicial (Lt ₀)	6" - 7,5"	0,150 - 0,190
Cadencia	75 - 80 %	75 - 80 %
Peso	Max. 4,3 lb	Max 2 kg
Coste de fabricación	200 - 450 €	200 - 450 €
Velocidad de las flechas disparadas (vf)	325 fps	100 m/s

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Estudio de distintos tipos de poleas

En el mercado actual existen varios tipos de poleas que hacen que la forma en que se aplican las fuerzas sea diferente. Cada tipo presenta sus ventajas e inconvenientes, que influirán en la potencia, el manejo y la precisión del arco. En este apartado se estudiarán algunos de los principales tipos de poleas para decidir qué tipo se usará para el diseño del arco o si se puede desarrollar un tipo nuevo de poleas.

A continuación, se detallan varios tipos de poleas

- ***One cam* o *sigle cam*:** Este tipo de poleas usan una polea completamente redonda en la parte superior del arco y una oblonga con un módulo mayor y otro menor. Este tipo de poleas tienen la ventaja de que no se produce ningún desajuste en los cables, por lo que el mantenimiento del arco es más sencillo. Sin embargo, el tener poleas diferentes produce que el centro de la cuerda no siga una trayectoria recta y las flechas disparadas sufran un ligero desvío.

Ilustración 36 Arco con poleas one cam. Modelo Mathews HTR NO Cam



Fuente: Internet

- **Cam & 1/2:** Estas poleas se caracterizan por su gran rendimiento y porque además no se produce ningún desajuste de los cables, facilitando así su mantenimiento. Este tipo de poleas ha sido desarrollado y patentado por el fabricante de arcos *Hoyt* y se considera como el mejor tipo de poleas desarrollado hasta la fecha. Es por eso por lo que este tipo de poleas es el más utilizado en estos arcos.

Ilustración 37 Poleas cam & 1/2



Fuente: Internet

En la ilustración 38 se muestra una tabla donde se detallan las principales diferencias entre estos dos tipos de poleas según el fabricante Hoyt.

Ilustración 38 Diferencias entre las poleas one cam y cam & 1/2

One Cam	CAM & 1/2
Velocidad 306 fps	Velocidad 310 fps
Poca Vibración	Poca Vibración
Silenciosas	Silenciosas
No Sincronismo	No Sincronismo
Muro muy definido	Muro muy definido con Módulos 75%
-----	Muro Blando con Módulos 65%
-----	Arco y Poleas Simétricas
-----	Tracción en línea del Nock
-----	Apertura Progresiva con Módulos 65%
Let-Off Alto	Let-Off Alto
-----	Arrastre de Tensión en Muro
Rodamientos en polea baja	Rodamientos en las dos Poleas

Fuente: Internet

Como en el modelo teórico de un arco de poleas desarrollado en los puntos 2.6 y 3.4, las poleas son completamente simétricas, el diseño de estas estará basado en las del tipo cam & 1/2. Por supuesto las poleas que se diseñen serán más simples que estas y la sincronización de los cables se deberá de tener en cuenta para que este desajuste no afecte al correcto funcionamiento del arco.

3.4. Fase 3. Modelo teórico y Cálculos para el Diseño de la Geometría de los Componentes

En esta fase se desarrollará un modelo teórico de un arco de poleas a partir del modelo teórico desarrollado en el punto 2.6 que permita hacer cálculos con poleas que tengan una forma oblonga y así poder obtener la información necesaria para diseñar un arco de poleas con un rendimiento potencial (η_p) mayor que si se utilizaran poleas completamente redondas.

3.4.1. Cambios en el modelo teórico del arco de poleas. Poleas oblongas

Para poder hacer cálculos usando unas poleas oblongas se deberán hacer los siguientes cambios al modelo teórico de un arco de poleas (ver punto 2.6):

- Como las poleas ya no tendrán un radio constante la forma de definir las se debe cambiar. Por eso la nueva forma de definir el perfil de las poleas será mediante puntos. La forma más útil de trabajar con la información de estos perfiles en la hoja de cálculo es mediante la creación de una tabla donde se muestre la posición de cada punto mediante unas coordenadas. Se puede usar una combinación de coordenadas polares y cartesianas para definir el perfil de las poleas, pero para hacer los cálculos solo se usarán las coordenadas polares.

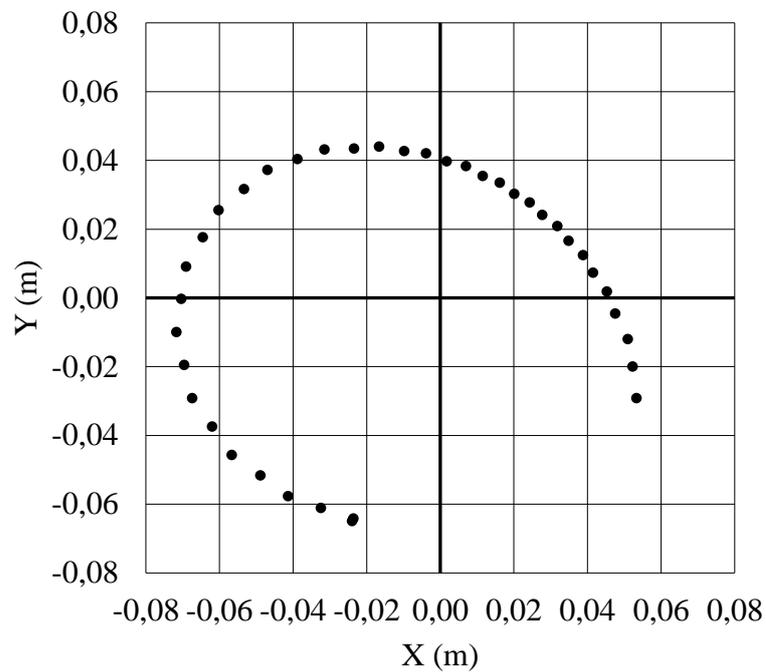
Usar una gráfica para representar los puntos en coordenadas cartesianas puede ayudar a determinar el perfil de las poleas (ver Ilustración 39).

El centro de las poleas estará situado en el origen de las coordenadas.

Se pueden definir tantos puntos como sea necesario, cuando más puntos se creen, más precisión se conseguirá en los cálculos.

Por lo general las poleas giran entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de vuelta para tensar el arco por completo, por lo que no será necesario definir la parte del perfil de las poleas que no se usa.

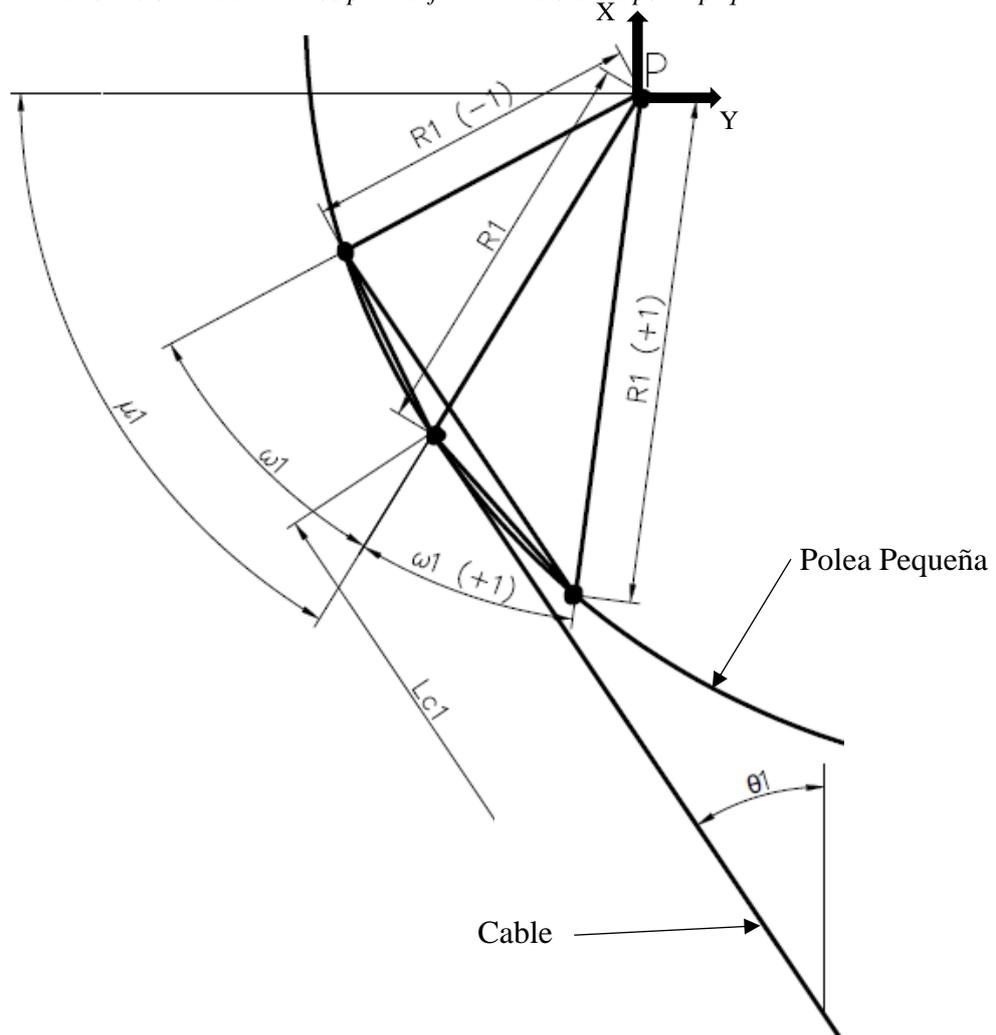
Ilustración 39 Ejemplo de representación mediante una gráfica del perfil una polea en coordenadas cartesianas



Fuente: Elaboración propia

- Como en este nuevo modelo teórico el radio está definido por puntos, el cálculo de los movimientos de los componentes y de las fuerzas al tensar el arco deberá hacerse punto por punto.
- Para realizar los cálculos con esta manera de definir las poleas se establecerán los parámetros que se muestran en las siguientes imágenes, además de los que ya se han establecido en los puntos 2.6.2 y 2.6.3

Ilustración 40 Parámetros para definir el radio de la polea pequeña



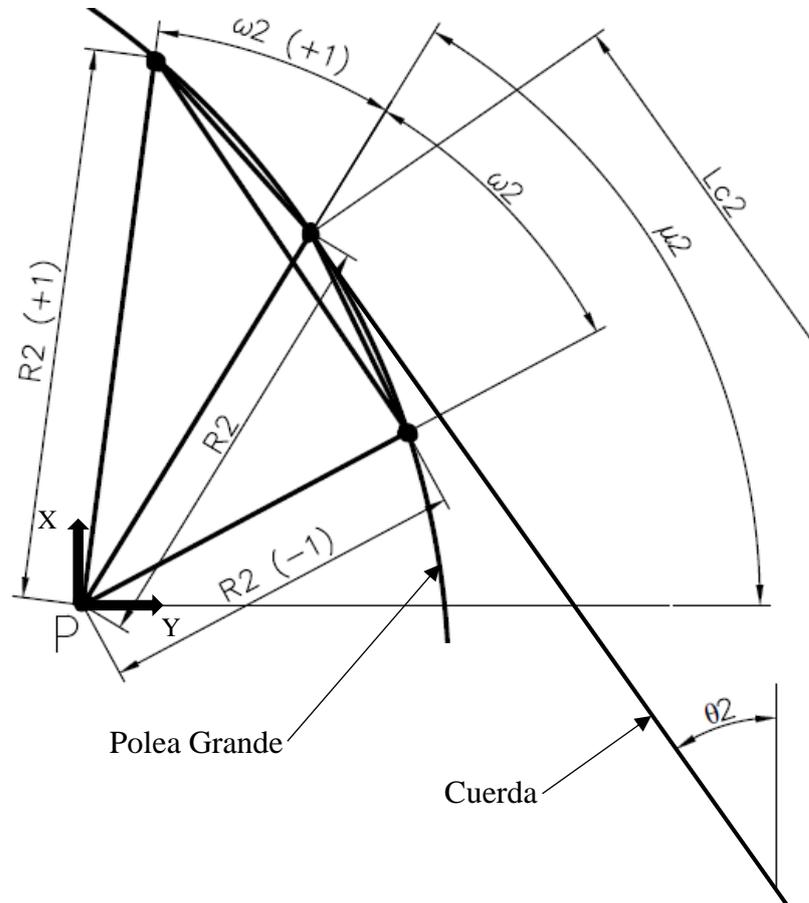
Fuente: Elaboración propia

Estas son las descripciones de los símbolos que se muestran en la imagen anterior:

- **P**: Es el centro de las poleas, donde se encuentran sus ejes de rotación.
- **R1**: Es el valor del radio de la polea pequeña en cada punto definido de ésta.
- **Lc1**: La longitud del cable. Esta va desde el punto P de una pala hasta el punto R1 de la polea del lado opuesto y además la línea que crea el cable es tangente a la polea en el punto R1 estudiado.
- **μ1**: es el ángulo entre la línea que pasa por el punto R1 y el punto P y el eje X de coordenadas.
- **θ1**: Es el ángulo de los cables respecto de eje Y de coordenadas.

- ω_1 : Es el ángulo que hay entre la línea que pasa por el punto R_1 y el punto P y la que pasa por el punto $R_{1(-)}$ y el punto P .

Ilustración 41 Parámetros para definir el radio de la polea grande



Fuente: Elaboración propia

Estas son las descripciones de los símbolos que se muestran en las imágenes:

- **P**: Es el centro de las poleas, donde se encuentran sus ejes de rotación.
- **R2**: Es el valor del radio de la polea grande en cada punto definido de ésta.
- **Lc2**: La longitud de la cuerda. Esta va desde el punto donde se tensa la cuerda hasta el punto R_2 de la polea y además la línea que crea la cuerda es tangente a la polea en el punto R_2 estudiado.
- μ_2 : Es el ángulo entre la línea que pasa por el punto R_2 y el punto P y el eje horizontal de coordenadas.
- θ_2 : Es el ángulo de la cuerda respecto de eje vertical de coordenadas.

- ω_2 : Es el ángulo que hay entre la línea que pasa por el punto R2 y el punto P y la que pasa por el punto R2₍₋₁₎ y el punto P.

Cuando alguno de estos valores lleve el subíndice ₍₋₁₎ o ₍₊₁₎ significa que es el valor en el punto anterior o siguiente del punto establecido para hacer los cálculos, y si lleva el subíndice ₍₀₎ o _(f) significa que es el punto inicial o final del tensado.

3.4.3. Parámetros iniciales para el diseño del arco

En este punto se enuncian los parámetros que influyen en las características del arco y como afecta la variación de estos parámetros a las características a la hora de hacer el diseño de un arco (ver Ilustración 15).

- **Lb₀**: Es la distancia inicial entre los ejes de las poleas. Cuanto mayor sea esta longitud, menor deberán de ser el radio de la polea grande para que la apertura se ajuste a unos valores correctos para poder tensar el arco cómodamente. Este valor se ha definido en la fase de estudio de mercado.
- **Lt₀**: Es el valor de la apertura inicial. Cuanto menor sea este valor más cortas serán las palas, pero mayor será el recorrido cuando se tense la cuerda y más energía se almacenará. Este valor se ha definido en la fase de estudio de mercado.
- **La**: Es la longitud entre los puntos de unión de las palas con el cuerpo del arco. Este valor afectará al ángulo y longitud de las palas, junto con los valores de Lb₀ y Lt₀. Esta longitud se deberá ajustar para que el ángulo de las palas sea tal que estas estén en posición un poco por encima de la horizontal. Este es el ángulo que suelen tener las palas en los arcos de poleas.
- **R1 y R2**: Según la geometría que tengan las poleas del arco, este será capaz de almacenar una energía potencial mayor o menor. El diseño de esta geometría es complicado y requiere que se prueben distintas formas para determinar cómo afecta a la curva de potencia, para determinar cuál es la mejor. Después de estudiar

algunas formas en las tablas desarrolladas con la hoja de cálculo se han observado algunos cambios ocurren al cambiar la geometría de las poleas y que se deben tener en cuenta a la hora de diseñarlas:

- Cuando menor sea la relación $R2/R1$ en cada punto estudiado mayor será la tensión que se transfiere a la cuerda y menor en los cables, por lo que interesa que al principio del tensado esta relación se mantenga lo más baja posible para que la fuerza de tensado aumente rápidamente y que al final del tensado esta relación aumente para que la fuerza vuelva a disminuir.
- Es más sencillo definir la geometría de las poleas si el radio de la polea pequeña al inicio del tensado es constante y se va variando solo el radio de la grande.
- En el punto apertura final (L_{t0}) se puede disminuir la fuerza de tesado reduciendo el radio de la polea pequeña. Se ha observado que cuanto antes se empieza a reducir el radio de la polea pequeña antes empezará a disminuir esta fuerza de tensado (F_t), independientemente del radio de la polea mayor ($R2$). Con esto se puede definir un ángulo de rotación de la polea pequeña respecto de la grande que permita disminuir la fuerza de tensado antes o después y definir con esto un ajuste para determinar la apertura del arco. Este ángulo de rotación se definirá como Giro P1.
- α_{rep} : Es el ángulo de las palas (α) cuando no actúa ninguna fuerza sobre ellas, es decir, cuando no actúa ninguna fuerza sobre ellas. Este valor servirá para diseñar la unión entre las palas y el cuerpo del arco. Este ángulo afectará a la fuerza de tensado (F_t). En el arco que se va a diseñar este valor se podrá modificar mediante un tornillo de ajuste que unirá el cuerpo con las palas.

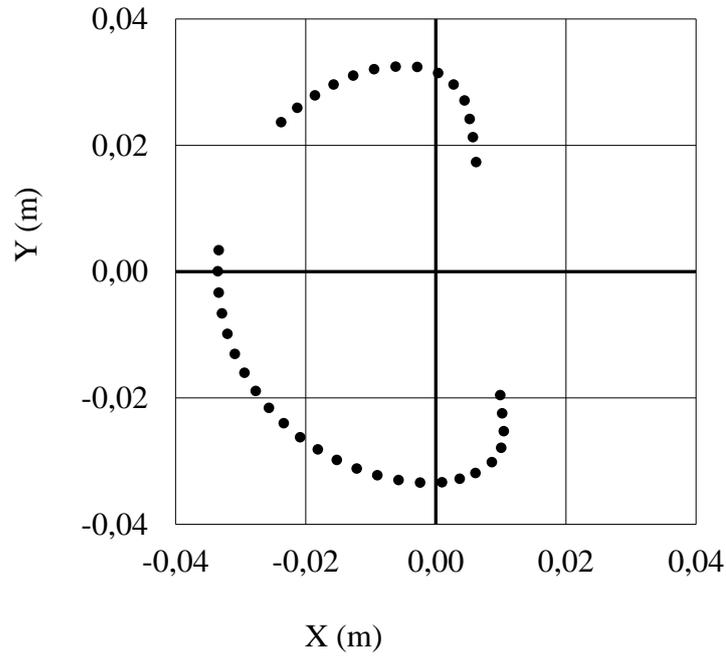
- **K_p**: Es el valor de la rigidez de las palas y se mide en N/rad este valor afectará a la fuerza de tensado (F_t) y su valor es siempre el mismo. Este valor servirá para diseñar las palas del arco.

3.4.3. Relación entre las variables de diseño. Formulas

Como la forma de definir las poleas es diferente en este nuevo modelo teórico, se tienen que definir también unas nuevas ecuaciones para usar con la hoja de cálculo y poder crear una tabla con los valores de los parámetros que interesa conocer (ver punto) para obtener la curva de potencia y los datos necesarios para diseñar un arco de poleas. A continuación, se detalla el procedimiento para crear elaborar una hoja de cálculo con la que obtener los datos necesarios para hacer el diseño del arco de poleas.

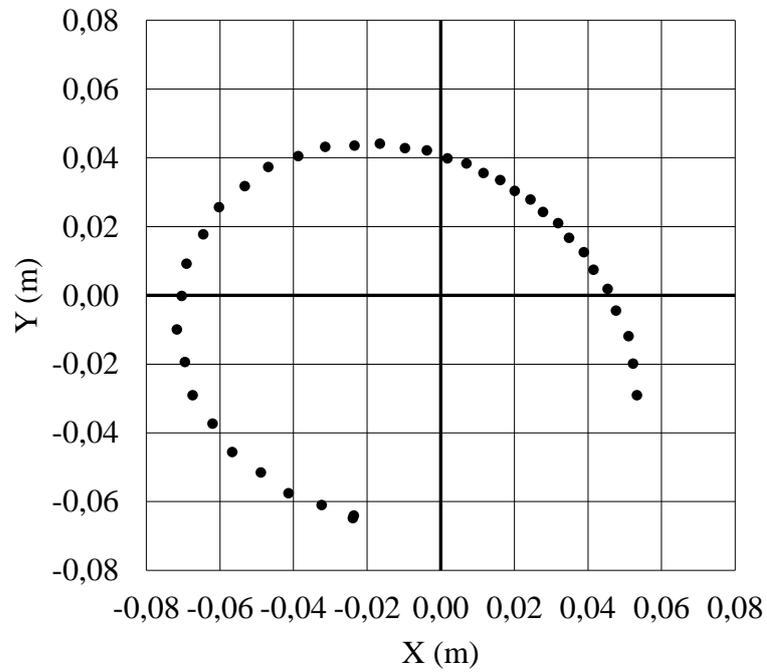
Se empezará creando unas tablas con los puntos necesarios para definir el perfil de las poleas en coordenadas polares y cartesianas y se crearán unas graficas con los puntos en coordenadas cartesianas para ayudar a definir estos perfiles. Para el arco que se va a diseñar se han definido 37 puntos para la polea pequeña y 38 para la grande. Las ilustraciones 42 y 43 muestran las gráficas de los perfiles de las poleas que se han desarrollado para el diseño del arco en coordenadas cartesianas. Después de hacer un estudio probando distintos perfiles para las poleas con el modelo que se va a describir en este punto, se ha determinado que estos perfiles son los que aportan un mayor rendimiento potencial al arco que se va a diseñar.

Ilustración 42 Forma del perfil de la polea pequeña diseñada en coordenadas cartesianas



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 43 Forma del perfil de la polea grande diseñada en coordenadas cartesianas

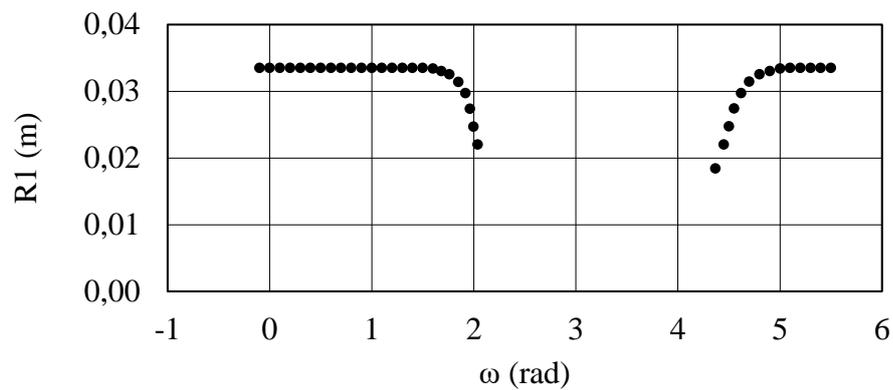


Fuente: Elaboración propia

En la polea pequeña (véase Ilustración 42) se observa una zona donde no hay puntos. Esto es porque esta zona de la polea describe una línea recta y en los cálculos se ha observado que no es necesario establecer tantos puntos esta zona. Tampoco se han definido las zonas del perfil de las poleas que no son necesarios para los cálculos (véase Ilustraciones 42 y 43).

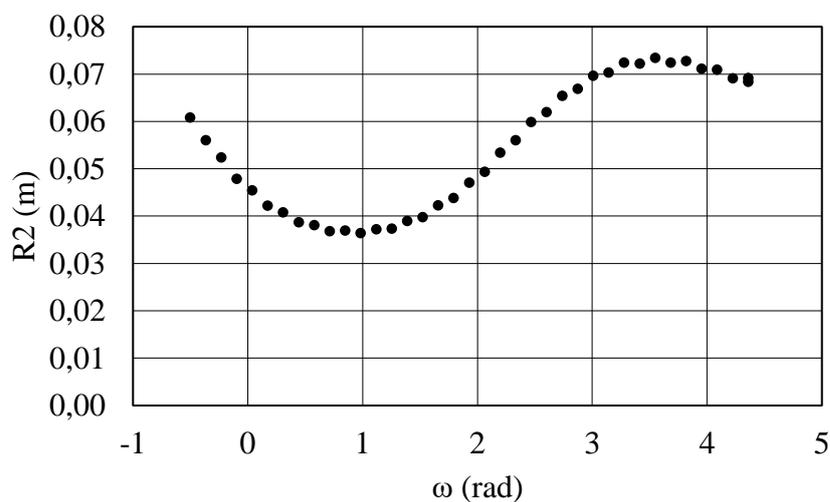
En las ilustraciones 44 y 45 se muestran las gráficas con los perfiles de las poleas en coordenadas polares para ayudar a definirlos.

Ilustración 44 Perfil de la polea pequeña diseñada en coordenadas polares



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 45 Perfil de la polea grande diseñada en coordenadas polares



Fuente: Elaboración propia

Una vez se han definido los puntos de los perfiles de las poleas se creará una segunda tabla donde se relacionarán los parámetros θ_1 , μ_1 , L_b , L_{c1} y Φ a partir de los valores de ω_1 y R_1 .

También será necesario definir la distancia entre ejes inicial (Lb_0), que e; para el arco que se va a diseñar se ha determinado que el valor más óptimo es 0,8m (vease Tabla 9). Se tendrán que definir estos valores para todos los puntos del perfil de la polea pequeña (véase Ilustración 44). A continuación, se muestran las fórmulas que se necesitan para crear esta tabla.

Primero se definirán los valores iniciales de los parámetros indicados mediante las ecuaciones 41,42 y 43. El valor inicial de Lb se definirá como una variable de diseño, que en caso del arco que se va a diseñar se ha determinado que el valor más óptimo es de 0,8m (véase Tabla 9).

$$\theta_{1_0} = \sin^{-1}(R_{1_0}/Lb_0) \quad [41]$$

$$Lc_{1_0} = R_{1_0}/\tan \theta_1 \quad [42]$$

$$\Phi_0 = 0 \quad [43]$$

El parámetro μ_1 no se puede obtener directamente ya que la ecuación desarrollada es compleja y este valor no se puede despejar. Por eso la ecuación se resolverá usando la función *solver* de la hoja de cálculo. La ecuación 44 servirá para obtener el valor de μ_1 en todos los puntos de la tabla

$$0 = Lc_1^2 + \left(\frac{R_1 \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - C)}{\sin(\mu_1 + C)} \right)^2 + R_1^2 - (2 * R_1 * C) \quad [44]$$

Donde C se definirá con la fórmula 45.

$$C = \omega_{1(+1)} - \frac{\pi}{2} + \cos^{-1} \left(\frac{2 * R_{1(+1)}^2 - 2 * R_{1(-1)} * R_{1(+1)} * \cos(\omega_1 + \omega_{1(+1)})}{2 * R_{1(+1)} * \sqrt{R_{1(-1)}^2 + R_{1(+1)}^2 - 2 * R_{1(-1)} * R_{1(+1)} * \cos(\omega_1 + \omega_{1(+1)})}} \right) \quad [45]$$

Las ecuaciones de la 46 a la 49 sirven para obtener los parámetros Lc_1 , θ_1 , Lb y Φ que faltan en la tabla.

$$Lc_1 = Lc_{1-1} - \sqrt{R_1^2 + R_{1-1}^2 - 2 * R_1 * R_{1-1} * \cos \omega_1} \quad [46]$$

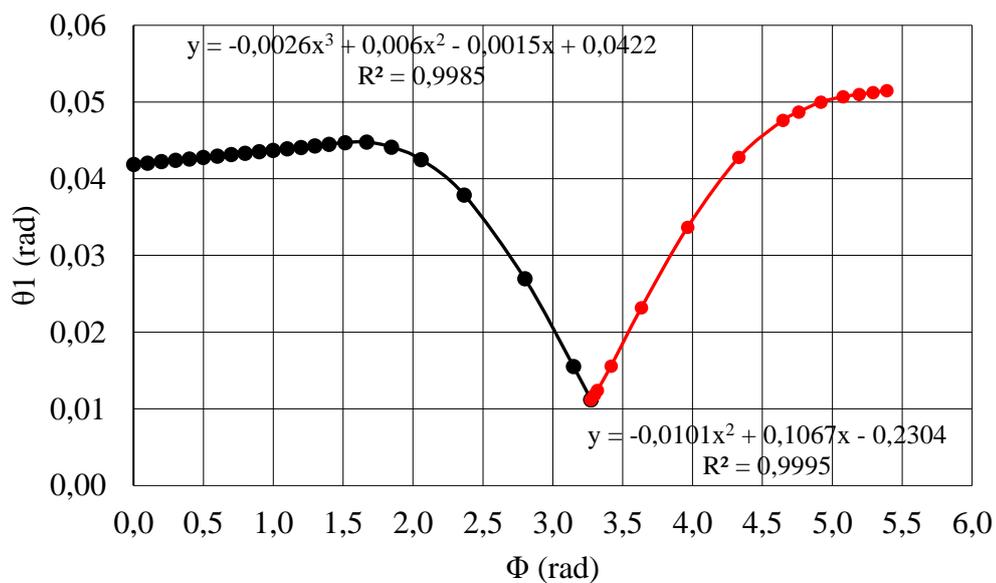
$$\theta_1 = R_1 * \cos \mu_1 / Lc_1 \quad [47]$$

$$Lb = Lc1 * \cos \theta1 + R1 * \sin \mu1 \quad [48]$$

$$\Phi = \Phi_{-1} + \mu_{-1} + \omega1 - \mu1 \quad [49]$$

A partir de la tabla obtenidas con las ecuaciones de la 41 a la 49 se crearán las funciones para definir Lb y $\theta1$ en función de Φ , ya que estas serán necesarias para completar las siguientes tablas. Para ayudar a definir las funciones Lb(Φ) y $\theta1(\Phi)$ con la función de estimación lineal de la hoja de cálculo se pueden crear sus gráficas para determinar cuál se ajusta mejor. La función $\theta1(\Phi)$ obtenida con las poleas desarrolladas para el diseño del arco se ha tenido que dividir en dos funciones para conseguir la suficiente exactitud (véase Ilustración 46.

Ilustración 46 Función $\theta1(\Phi)$ definida en dos tramos para obtener mayor precisión



Fuente: Elaboración propia

Las ecuaciones 50, 51 y 52 muestran las funciones Lb(Φ) y $\theta1(\Phi)$ obtenidas para el arco que se va a diseñar.

$$Lb(\Phi) = -7,37 * 10^{-4} * \Phi^3 + 7,08 * 10^{-3} * \Phi^2 - 4,48 * 10^{-2} * \Phi + 0,803 \quad [50]$$

Para $\Phi \leq 3,27$:

$$\theta1(\Phi) = -2,58 * 10^{-3} * \Phi^3 + 5,98 * 10^{-3} * \Phi^2 - 1,53 * 10^{-3} * \Phi + 4,22 * 10^{-2} \quad [51]$$

Para $\Phi \geq 3,27$:

$$\theta_1(\Phi) = -1,01 * 10^{-2} * \Phi^2 + 0,107 * \Phi + 0,230 \quad [52]$$

Cuando se tienen estas funciones se creará una segunda tabla donde se relacionen los parámetros θ_2 , μ_2 , Lc_2 y Φ a partir de ω_2 , R_2 y la función $Lb(\Phi)$ (véase Ecuación 50). También será necesario definir el valor inicial de μ_2 , que para el arco que se va a diseñar se ha determinado que su valor más óptimo es $-0,5$ rad. Se tendrán que definir estos parámetros para todos los puntos del perfil de la polea grande. Las ecuaciones de la 53 a la 57 son las que se necesitan para crear una tercera tabla donde se muestren los valores de estos parámetros

$$Lc_{2_0} = \frac{Lb_0}{2} + R_2 * \sin \mu_{2_0} \quad [53]$$

$$Lc_2 = Lc_{2_{-1}} + \sqrt{R_2^2 + R_{2_{-1}}^2 - 2 * R_2 * R_{2_{-1}} * \cos \omega_2} \quad [54]$$

$$\mu_2 = \mu_{2_{-1}} + \omega_2 + \Phi - \Phi_{-1} \quad [55]$$

$$Lb = Lb(\Phi) \text{ (véase Ecuación 50)} \quad [56]$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{\frac{Lb}{2} + R_2 * \sin \mu_2}{Lc_2} \quad [57]$$

Por último, para definir el parámetro Φ también será necesario usar la función *solver*, ya que el término no se puede desparjar en la ecuación desarrollada. Para ello se utilizará la ecuación 58.

$$\frac{Lb}{2} + R_2 * \sin \mu_2 - Lc_2 * \cos \left(\frac{\pi}{2} + \mu_2 - \omega_2 - \cos^{-1} \left(\frac{2 * R_{2_{-1}}^2 - 2 * R_{2_{+1}} * R_{-1} * \cos \omega_2 + \omega_{2_{-1}}}{2 * R_{2_{-1}} * \sqrt{R_{2_{+1}}^2 + R_{2_{+1}}^2 - 2 * R_{2_{+1}} * R_{2_{-1}} * \cos \omega_2 + \omega_{2_{+1}}}} \right) \right) = 0 \quad [58]$$

A partir de la tabla creada se crearán las funciones para definir θ_2 , μ_2 , Lc_2 y R_2 en función de Φ siguiendo el mismo procedimiento que en la tabla anterior. En este caso para definir estas funciones ha bastado con hacerlo en un único tramo para conseguir bastante precisión.

Las ecuaciones 59, 60 y 61 muestran las funciones $\mu_2(\Phi)$, $R_2(\Phi)$ y $Lc_2(\Phi)$ obtenidas para el arco que se va a diseñar.

Estas son las funciones que se han obtenido para el arco que se va a diseñar.

$$\mu_2(\Phi) = 5,40 * 10^{-2} * \Phi^6 - 0,600 * \Phi^5 + 2,52 * \Phi^4 - 4,73 * \Phi^3 + 3,22 * \Phi^2 + 0,918 * \Phi - 0,461 \quad [59]$$

$$R_2(\Phi) = -1,90 * 10^{-3} * \Phi^5 + 2,07 * 10^{-2} * \Phi^4 - 8,63 * 10^{-2} * \Phi^3 + 0,161 * \Phi^2 - 0,108 * \Phi + 6,06 * 10^{-2} \quad [60]$$

$$Lc_2(\Phi) = 6,66 * 10^{-3} * \Phi^3 - 4,11 * 10^{-2} * \Phi^2 + 0,139 * \Phi + 0,376 \quad [61]$$

Una vez se hayan definido estas funciones se creará una tercera tabla donde se relacionarán L_t , α , F_{pf} , F_{pa} , F_{c1} , F_{c2} y F_t a partir de las funciones obtenidas en las dos tablas anteriores. Para esta tabla será necesario definir también los siguientes parámetros iniciales: L_a , L_{t0} , α_{rep} y K_p (véase Tabla 11).

Estas son las ecuaciones para obtener los parámetros que faltan.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{L_b - L_a}{2 * L_p} \right) \quad [62]$$

$$L_t = L_p * \sin \alpha + R_2 * \cos \mu_2 + Lc_2 * \sin \theta_2 \quad [63]$$

$$F_{pf} = K_p * (\alpha - \alpha_{rep}) \quad [64]$$

$$F_{c2} = F_{pf} * \frac{\sin \alpha + \left(\frac{\cos \alpha}{\tan \alpha} \right)}{2 * \cos \theta_1 * \left(\frac{R_2 * \cos(\mu_2 - \theta_2)}{L_b * \sin \theta_1} \right) + \cos \theta_2 + \frac{\sin \theta_2}{\tan \alpha}} \quad [65]$$

$$F_{pa} = \frac{F_{pf} * \cos \alpha - F_{c2} * \sin \theta_2}{\sin \alpha} \quad [66]$$

$$F_{c1} = F_{c2} * \left(\frac{R_2 * \cos(\mu_2 - \theta_2)}{L_b * \sin \theta_1} \right) \quad [67]$$

$$F_t = 2 * F_{c2} * \sin \theta_2 \quad [68]$$

Para completar la tabla se usarán tantos puntos como se considere necesario. Una gráfica con los valores de F_t en función de L_t ayudará a decidir la cantidad de puntos que se tienen que usar. Para el último punto, este se corresponderá con el valor donde la fuerza disminuye

hasta un valor mínimo (F_t). Este punto con el valor de la apertura final (L_t) y dependerá de los valores de los parámetros iniciales. Para hallar este punto se puede utilizar la función *solver*.

3.4.4. Parametrización de las formulas. Tabla de resultados y curvas de potencia

En este punto se muestran los resultados obtenidos con cálculos desarrollados en el punto 3.4.3. De estas tablas interesa obtener los valores de L_t y F_t para definir la curva de potencia y calcular la energía que es capaz de almacenar el arco También interesa obtener las tensiones de la cuerda (F_{c2}), los cables (F_{c1}) y las palas (F_{pf} y F_{pa}) para diseñar estos componentes de forma que puedan resistir estas tensiones.

Como en el arco diseñado se puede configurar la apertura (L_t) y la fuerza de tensado máxima ($F_{t_{max}}$) se tendrán que estudiar los puntos más extremos de estas configuraciones para determinar en qué rangos están las características del arco. Estos puntos son cuatro, que se corresponden con los puntos de apertura (L_t) y fuerzas de tensado (L_t) máximas y mínimas. En la tabla 10 se muestran los valores del ángulo de reposo de las palas (α_{rep}) y el giro de la polea pequeña respecto de la grande (Giro θ_1), que servirán para hacer el diseño de los componentes del arco la energía y el rendimiento potencial (η_p) y la cadencia, que reviran para determinar las características del arco y ver si este está debidamente diseñado.

Tabla 10

Características del arco diseñado con cuatro configuraciones distintas de apertura y fuerza de tensado máximas y mínimas

$F_{t_{max}}$ (N)	L_t (m)	α_{rep} (rad)	Giro P1 (rad)	η_p (%)	Cadencia (%)	E_p (J)
137	0,66	0,98	0,8	65,0	65,7	35,4
309	0,66	0,69	0,8	66,4	70,7	81,4
314	0,77	0,69	-0,2	75,5	64,6	120,5
158	0,77	0,98	-0,2	69,6	60,7	56,3

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 10, los parámetros que se muestran varían dependiendo de la configuración de apertura (L_t) y fuerza de tensado máxima que tenga ($F_{t_{max}}$).

Con el arco que se ha diseñado se ha conseguido un rendimiento potencial entre el 65 y el 75 %. Aunque este rendimiento es mayor que el de los arcos convencionales, sigue sin alcanzar los valores de los arcos de poleas de altas prestaciones, que llegan al 80 o 90% de rendimiento. Dedicando más tiempo y probando más geometrías de las poleas se podría conseguir mejorar el rendimiento que se ha conseguido con la geometría de las poleas desarrolladas.

Los valores de la cadencia que se han conseguido van entre el 60,7 y el 70,7 %. Este valor se podría aumentar todavía un poco más, hasta el 75 o 80 %, para que coincidiera con los valores que suelen tener los demás arcos de poleas.

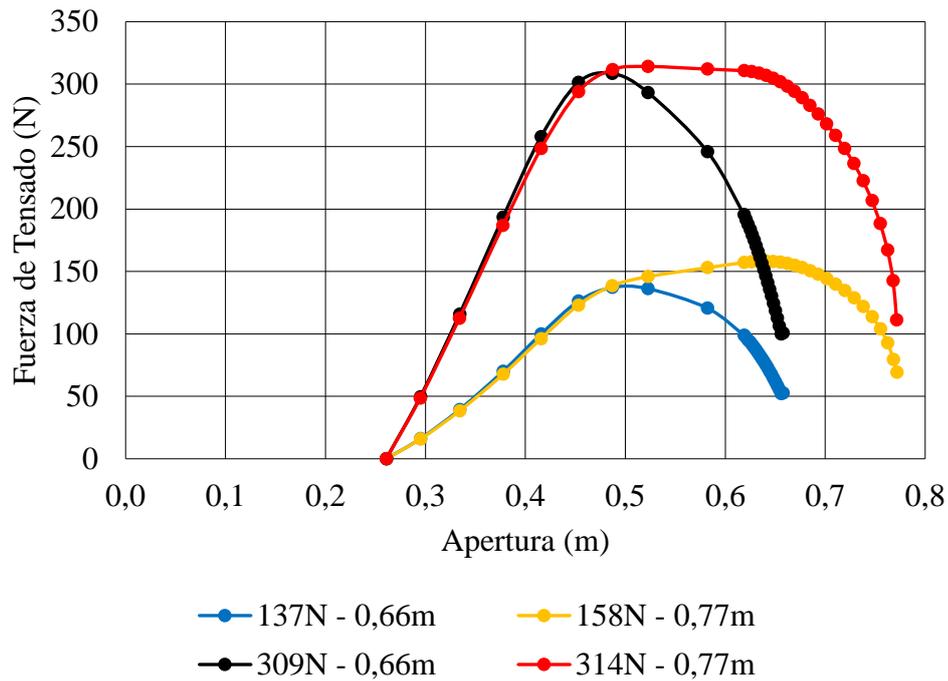
En cuanto a la energía potencial, se puede ver que cuanto mayor recorrido y mayor fuerza de tensado se consiga, mayor será la energía que almacene el arco y mayor velocidad adquirirán las flechas disparadas con él.

Si para este arco se establece un rendimiento cinemático del 85% y un peso para las flechas disparadas de 29 gramos, se ha calculado que la velocidad que alcanzan las flechas esta entre 45,6 y 84,1 m/s. Los arcos de poleas con unas características similares, suelen lanzar las flechas a velocidades mayores, alrededor de los 100 m/s.

Con estos datos se puede concluir que el rendimiento potencial (η_p) del arco diseñado se puede mejorar, haciendo un mejor diseño, para que sus características sean similares a las de los arcos de poleas que existen en el mercado. Sin embargo, este primer diseño puede valer para fabricar un prototipo y realizar las pruebas y ensayos necesarios para verificar que el método de diseño es válido.

En la ilustración 47 se muestran las curvas de potencia obtenidas para los cuatro puntos estudiados en la tabla 10.

Ilustración 47 Curvas de potencia de las cuatro configuraciones del arco analizadas



Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en las curvas de potencia, se podría conseguir que estas tuvieran una forma que le proporcionara un mayor rendimiento potencial al arco (véase Tabla 10), pero esto es difícil de conseguir porque la misma forma de las poleas tiene que servir para las cuatro configuraciones distintas. Se podría desarrollar un perfil de las poleas para cada configuración, pero esto no sería práctico.

En general las curvas de potencia que se han obtenido con el perfil de las poleas desarrollado (véase Ilustración 47) no es el más óptimo, pero para mejorarlo se deberían invertir más horas de estudio. Incluso con el perfil más óptimo para las poleas, el rendimiento máximo que se podría conseguir sería de alrededor del 90%, ya que ningún arco existente en el mercado supera este valor. Esto se debe a que es geoméricamente imposible conseguir una geometría con la que obtener un rendimiento potencial del 100%

En la tabla 10 se muestran los valores de los parámetros iniciales y las tensiones mayores que soportan los cables y la cuerda, que se han obtenido después de hacer un estudio para

determinar los perfiles de las poleas (véase Ilustración 42 y 43) que aportan un mayor rendimiento al arco que se va a diseñar y que servirán para diseñar los distintos componentes de este.

Tabla 11
Datos para el diseño de los componentes del arco

La (m)	Lb ₀ (m)	α_{rep} (rad)	Fc1 Max (N)
0,600	0,800	0,69 – 0,98	670
Lp (m)	Kp (N*m)/(m*rad)	Giro P1 (rad)	Fc2 Max (N)
0,230	9000	-0,2 – 0,8	325

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la tabla 11 se muestran algunos puntos del perfil de las poleas en coordenadas cartesianas (véase Ilustraciones 42 y 43) para hacer su diseño.

Tabla 12
Puntos del perfil de las poleas para su diseño

Polea pequeña		Polea grande	
X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
-0,0333	0,0033	0,0534	-0,0291
-0,0328	-0,0067	0,0476	-0,0045
-0,0309	-0,0130	0,0389	0,0124
-0,0256	-0,0216	0,0278	0,0241
-0,0181	-0,0282	0,0162	0,0335
-0,0090	-0,0323	0,0018	0,0397
0,0010	-0,0334	-0,0165	0,0440
0,0087	-0,0302	-0,0387	0,0404
0,0102	-0,0224	-0,0602	0,0256
0,0057	0,0212	-0,0703	-0,0002
0,0027	0,0296	-0,0674	-0,0291
-0,0062	0,0324	-0,0488	-0,0517
-0,0157	0,0296	-0,0324	-0,0611
-0,0237	0,0236	-0,0236	-0,0641

Fuente: Elaboración propia

3.5. Fase 4. Diseño y Determinación de los Materiales de los Componentes

Debido a la gran inversión de tiempo y de recursos que supondría hacer un estudio y un diseño de los componentes complejo, para que estos estén diseñados de la mejor forma posible, se ha decidido hacer un diseño más simple con el fin de aportar una visión básica y general sobre el diseño de estos componentes. Este primer diseño puede servir para estudiar qué partes y materiales se pueden mejorar para que optimizar su funcionamiento y alargar su

tiempo de uso. El diseño de los componentes se desarrollará a partir de la información de la fase 1 del diseño del arco, donde se muestran las características de estos.

3.5.1. Cuerpo del arco

El cuerpo del arco es el componente que mayor volumen ocupa de todos los componentes, y el que debe soportar todas las fuerzas y tensiones que se producen en el arco. Es por esto que se suelen utilizar materiales ligeros y resistentes como la fibra de carbono o el aluminio. Para el arco que se va a diseñar, el material que se utilizará el aluminio, debido a que los costes de la materia prima y de fabricación son menores.

Como el peso es un factor determinante en este componente, el diseño de su geometría se deberá de estudiar para reducir su volumen al menor posible, permitiendo a su vez, que este pueda resistir las fuerzas a las que está sometido. Para optimizar el diseño del cuerpo se deberán hacer análisis por elementos finitos de las tensiones que tiene que soportar y estudiar varias geometrías para determinar cuál es la geometría mas óptima

3.5.2. Palas

Estos componentes son los más complejos de diseñar, ya que debido a las tensiones que estos deben de soportar, se tienen que utilizar materiales compuestos como la fibra de vidrio o de carbono, que aportan flexibilidad y una gran resistencia. Para hacer el diseño con estos materiales se deben usar programas de cálculo por elementos finitos, por lo que el tiempo requerido de estudio para diseñar estos componentes es elevado. No obstante, para un primer diseño se pueden utilizar materiales que requieren un tiempo de diseño menor, como el plástico reforzado con fibra de vidrio y que tienen unas características similares, además de ser más económicos. Como estos materiales además se pueden obtener en el mercado en forma de placas, las cuales se pueden mecanizar, por lo que su coste de fabricación también es menor.

Para diseñar las palas se tendrá que partir del coeficiente de rigidez que se ha determinado en los cálculos para el diseño del arco para poder fabricar unas palas que tengan este valor. En este trabajo no se harán cálculos para diseñar las palas debido a la falta de tiempo a que se deberían hacer ensayos para determinar que el diseño desarrollado es el adecuado.

3.5.3. Poleas

Las poleas son los componentes más complejos de los arcos de poleas a la hora de diseñarlos geoméricamente. Se tiene que tener en cuenta los puntos de unión de la cuerda y los cables con estas y También se tiene que tener en cuenta la unión entre la polea mayor y la menor, esta se suele hacer mediante unos tornillos que unen ambas poleas y varios agujeros en la polea pequeña que permiten el ajuste del ángulo de esta respecto de la grande.

Para optimizar conseguir un rendimiento cinético lo más elevado posible, se tendrá que optimizar la geometría de las poleas, de forma que estas tengan el menor peso posible, pero que puedan resistir las tensiones a las que están sometidas. Para conseguir esto se pueden hacer análisis de tensiones mediante el programa de diseño utilizado y probar con diversas geometrías para determinar cuál de ellas es la más apropiada. El material de las poleas también influye en el diseño de las poleas. Si se compara el acero con el aluminio, por ejemplo, este primero tiene una resistencia mayor, por lo que el volumen de las poleas será menor, sin embargo, su densidad también es mayor que la del aluminio, por lo que el peso de las poleas será mayor.

Para el diseño de estos componentes se usará el aluminio, ya que es el material más utilizado para su fabricación por su ligereza y a partir de esto, se estudiará la geometría de las poleas para reducir su peso lo máximo posible

3.5.4. Separacables

El diseño de ese componente no es muy complejo. La única función que debe desarrollar este es la de separar los cables para que no haya rozamiento entre ellos y apartarlos lo

suficiente para que se pueda disparar la flecha, ya que, sin este, los cables se cruzarían con el punto donde se coloca la flecha.

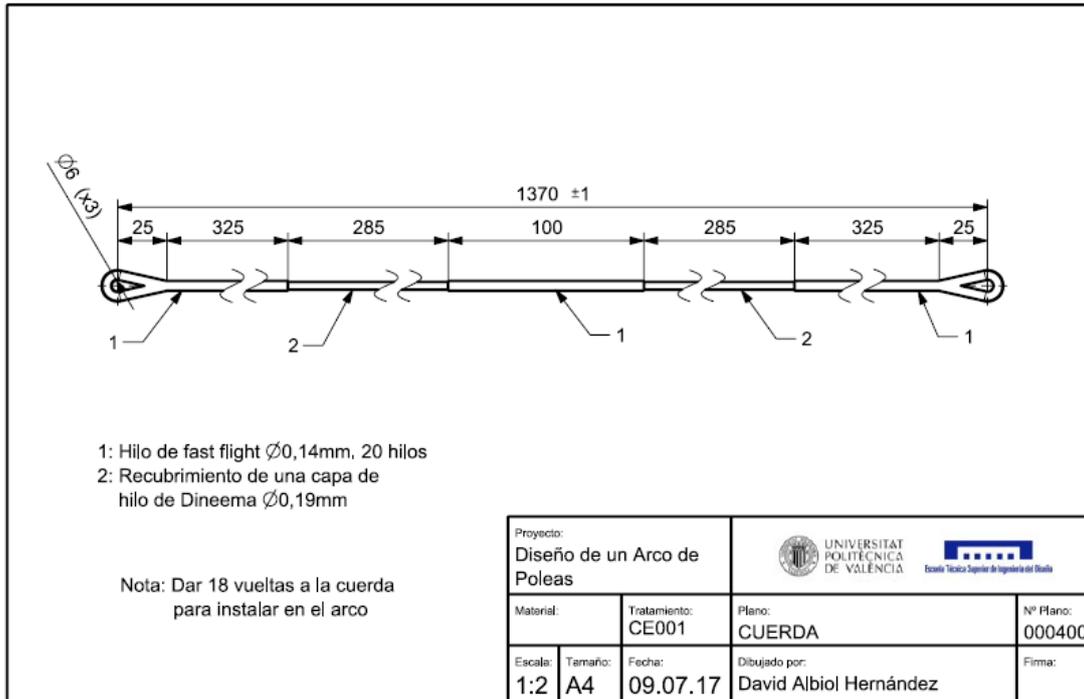
Para diseñar este componente se usará una varilla donde se colocará el separador. La varilla será de aluminio, ya que no debe de soportar grandes tensiones y es un material ligero. El separador estará compuesto por una única pieza mecanizada, sin ningún elemento rodante para reducir la fricción con los cables, con el fin de simplificar el diseño. El material seleccionado será el PVC, ya es un material económico y con un coste de mecanizado reducido.

3.5.5. Cuerda y cables

La cuerda y los cables se tendrán que diseñar teniendo en cuenta la tensión máxima que tienen que resistir y su longitud. La tensión que podrán resistir estos componentes vendrá determinada por el número de hilos de los que estén compuestos. Para la longitud se tendrá en cuenta el punto de amarre de la cuerda y los cables a las poleas, su perfil y la distancia entre los ejes. Es importante que la longitud de estos componentes sea precisa, ya que de no ser así se producirá un desajuste que provocará un funcionamiento erróneo en el arco.

También se tendrán en cuenta las zonas donde estos componentes están en contacto con otros materiales y se produce un desgaste por el rozamiento generado para recubrirlos con hilo.

Todo esto se deberá especificar en un plano. Un ejemplo de representación es el que se muestra a continuación.



Para determinar el número de hilos se debe de conocer la resistencia del hilo usado y la tensión que tienen que soportar.

Para la elección del material del hilo, el factor más importante es su elasticidad, ya que la resistencia se puede ajustar con el número de hilos que formaran los cables y la cuerda.

El material que se utilizara para la fabricación de los cables y la cuerda será el *fast flight*, que como se ha explicado en la fase 1, ya que tiene un coeficiente de elasticidad más bajo que el del *dacrón*, pero no es completamente rígido, con lo que conseguirá amortiguar las vibraciones para que las tensiones que se generen en los demás componentes del arco no sean demasiado grandes.

. La elección del número de hilos es bastante ambigua, ya que cada arquero prefiere usar un número determinado, con el que le resulte más cómodo disparar las flechas, este número determina la rigidez de la cuerda y los cables. Para calcular el número de hilos en función de su resistencia, se deberá de conocer la resistencia del hilo y la tensión que deben de soportar. También se establecerá un coeficiente de seguridad para evitar que la cuerda se rompa. En este caso la tensión que resiste el hilo de fast flight es de 95 lb o 422,6N y la tensión que deben

de soportar es de 670N para los cables y de 325N para la cuerda, tal y como se ha determinado en los cálculos. Según fuentes de internet se usan alrededor de 20 hilos para formar la cuerda y los cables de los arcos, por lo que se establecerá este valor para su diseño.

Para calcular el coeficiente de seguridad de estos componentes se usará la siguiente ecuación.

$$C.S. \text{ Cables} = \frac{n^{\circ}_{hilos} * T_{hilo}}{Tc1_{max}} = \frac{20 * 422,6}{670} = 12,6$$

$$C.S. \text{ Cuerda} = \frac{n^{\circ}_{hilos} * T_{hilo}}{Tc2_{max}} = \frac{20 * 422,6}{325} = 26,0$$

Se puede ver que el coeficiente de seguridad es muy elevado para los dos casos. Para determinar mejor el número de hilos se deberá estudiar su comportamiento haciendo pruebas reales.

3.6. Fase 5. Procesos de Fabricación y Costes Aproximados de los Componentes

En esta fase se determinarán los procesos de fabricación y los recursos que son necesarios para fabricar los componentes del arco que se va a diseñar, de forma que los costes y el tiempo de fabricación sean lo más reducidos posible. Se ha de tener en cuenta que los procesos de fabricación son distintos para hacer series grandes que para hacer una cantidad pequeña de piezas. Como en este trabajo se ha determinado que solo se fabricará un arco, el cual servirá para determinar si el método de diseño desarrollado es válido, los procesos de fabricación que se establecerán serán los más apropiados para fabricar cantidades pequeñas de piezas. En este trabajo no se desarrollará ningún proceso de fabricación para series largas, ya que no forma parte de los objetivos.

Como el arco que se vaya a fabricar solo servirá para hacer un estudio de sus características y su valor estético es irrelevante en este caso, las piezas que se fabricarán no tendrán ninguna ningún tratamiento de pintura ni ningún adhesivo decorativo. Solo se aplicará algún

tratamiento de pintura en el caso de que sea necesario proteger la pieza para evitar que esta se deteriore.

Como cada componente del arco que se va a fabricar requiere unos procesos de fabricación distintos, se analizarán los componentes por separado para determinar cuáles son los procesos que se adaptan mejor a la fabricación de cada uno.

3.6.1. Cuerpo del arco

Como el cuerpo del arco está formado por un cuerpo de metal macizo, en este caso de aluminio, existen dos opciones para fabricarlo.

Una es mediante el mecanizado de un tocho del material del que está formado el cuerpo del arco, la otra es hacer un molde con la forma del cuerpo del arco y verter el material fundido en su interior. Como solo se va a fabricar uno o varios arcos la opción más económica es la de mecanizar el cuerpo a partir de un tocho de material. La fabricación por fundición resultaría más económica si se tuviera que fabricar series grandes de piezas.

Como la geometría del cuerpo es compleja y hay puntos donde se requiere cierta precisión. El mecanizado de la pieza se hará con una máquina de control numérico. Previamente al mecanizado de la pieza, se cortará la forma previa del cuerpo con una cortadora de chorro de agua guiada por ordenador para reducir el tiempo de mecanizado y abaratar costes. Para definir el patrón de corte de la materia prima con la cortadora se puede desarrollar un patrón plano del cuerpo en formato DWG. El programa para que la máquina de control numérico para que esta mecanice la pieza se puede desarrollar mediante el módulo de *manufacturing* del software de diseño NX utilizado para el diseño de las piezas. En este caso no se hará ningún programa debido a la complejidad de desarrollo de este.

Estos son los costes que se han estimado para la fabricación del cuerpo del arco.

- Coste materia prima:
 - Tipo de material: Aluminio 6061 T6

- Tamaño: Cuadrado macizo 120x120x650mm
- Peso: $2700\text{kg/m}^3 * 0,12\text{m} * 0,12\text{m} * 0,65\text{m} = 25,30\text{Kg}$
- Coste del material: $6\text{€/Kg} * 25,3\text{kg} = 151,80\text{€}$
- Coste corte previo de la materia prima: 6,00€
- Coste mecanizado:
 - Tiempo mecanizado: 0,8horas
 - Coste mecanizado: $30\text{€/hora} * 0,8\text{horas} = 24,00\text{€}$
 - Coste herramientas: 15,00€

3.6.2. Palas

El material de las palas será al 100% de fibra de vidrio para simplificar el diseño, así que se partirá de una placa maciza de fibra de vidrio que se cortará mediante una cortadora de chorro de agua para obtener la forma final de las palas. Las dos palas se obtendrán de una única placa de fibra de vidrio. Para definir el corte que tiene que hacer la cortadora se desarrollará un patrón de su forma en formato DWG con el que se podrán cortar las palas.

Estos son los costes que se han estimado para la fabricación del cuerpo del arco.

- Coste materia prima:
 - Tipo de material: Fibra de vidrio clase E
 - Tamaño: 250x250x15mm
 - Peso: $2580\text{Kg/m}^3 * 0,25 * 0,25 * 0,015 = 2,42\text{Kg}$
 - Coste de la placa de fibra de vidrio: $4\text{€/Kg} * 2,42 = 9,70\text{€}$
- Coste corte de la materia prima: 5,00€

3.6.3. Poleas

Las poleas se fabricarán siguiendo el mismo proceso que el cuerpo del arco. Se cortará el perfil de las poleas mediante una cortadora láser a partir de una chapa de aluminio y terminará

la forma de estas con un mecanizado. Al igual que en el cuerpo, para definir el corte que tiene que hacer la cortadora se creará un patrón del perfil de las poleas en formato DWG.

Estos son los costes que se han estimado para la fabricación de las cuatro poleas.

- Coste materia prima:
 - Tipo de material: Aluminio 6061 T6
 - Tamaño: Chapa 400*400*7mm
 - Peso: $2700\text{kg/m}^3 * 0,4\text{m} * 0,4\text{m} * 0,007\text{m} = 3,02\text{Kg}$
 - Coste de la chapa: $6\text{€/Kg} * 3,02\text{kg} = 18,10\text{€}$
- Coste corte previo de la materia prima: 6,00€
- Coste mecanizado:
 - Tiempo mecanizado: 0,6horas
 - Coste mecanizado: $30\text{€/hora} * 1,5\text{horas} = 45,00\text{€}$
 - Coste herramientas: 15,00€

3.6.4. Separacables

El separa cables estará compuesto por una varilla de metal unida al cuerpo del arco y una pieza donde se sujetarán los cables para separarlos. La varilla será de aluminio macizo roscado por un extremo y doblado y el separador será un bloque pequeño de PVC mecanizado. Para la fabricación de estas piezas bastará con una dobladora de tubos para doblar la varilla y un torno manual para mecanizar el separador.

Estos son los costes que se han estimado para la fabricación de la varilla del separacables.

- Coste materia prima:
 - Tipo de material: Varilla Aluminio Calibrada D8mm
 - Longitud: 300mm
 - Peso: $2700\text{kg/m}^3 * 0,008\text{m}^2 * \pi * 0,3\text{m} = 0,163\text{Kg}$
 - Coste de la materia prima: $3\text{€/Kg} * 0,163\text{kg} = 0,50\text{€}$

- Coste corte, doblado y roscado de la materia prima: 3,00€

Estos son los costes que se han estimado para la fabricación del separador.

- Coste materia prima:
 - Tipo de material: Placa PVC
 - Tamaño: 200*200*50mm
 - Coste de la placa: 1,00€
- Coste mecanizado:
 - Tiempo mecanizado: 0,1horas
 - Coste mecanizado: 20€/hora*0,2horas = 4,00€

3.6.5. Cuerda y cables

Para la fabricación de la cuerda y los cables del arco se usará hilo de *fast flihtg*. Estos se tendrán que fabricar a mano a partir de una bobina de este hilo según se haya establecido en los planos del diseño del arco.

Estos son los costes que se han estimado para la fabricación del cuerpo del arco.

- Coste del hilo usado:
 - Coste bobina de hilo de 90 metros: 40,00€
 - Hilo usado: 50m
 - Coste hilo: $40€ \cdot 50m / 90m = 22,20€$
- Coste de fabricación:
 - Tiempo de fabricación: 2,5horas
 - Coste de fabricación: 10€/hora*2 horas=20,00€

3.7. Fase 6. Ensayos para Determinar las Características Reales

Esta fase sirve para verificar que el arco que se ha diseñado cumple con las características que se han establecido en su diseño. En este caso, los ensayos que se van a realizar servirán

para determinar si el método desarrollado es válido para diseñar arcos y que modificaciones se pueden aplicar para mejorarlo.

Estos son los ensayos que se deberán realizar con el arco de poleas fabricado:

- **Rigidez real de las palas:** Como en el modelo teórico del arco de poleas utilizado para hacer los cálculos las palas se han considerado rígidas, es probable que, al fabricarlas, estas no se ajusten a las especificaciones que se habían establecido en el diseño.

Un procedimiento para calcular la rigidez real de las palas es sujetar una en un soporte que sea similar a la parte del cuerpo donde se sujeta la pala y aplicar una fuerza en el extremo, simulando la tensión de los cables y la cuerda. Esto se puede hacer mediante un contrapeso y una cuerda. Para medir la fuerza que se ejerce se usará un dinamómetro y se medirá la fuerza flectora sobre la pala en varios puntos de su deformación y se desarrollara una función a partir de estos puntos. A partir de la pendiente de la curva de la función se puede calcular el valor del coeficiente de rigidez de la pala y compararlo con el obtenido en el diseño del arco. Para el arco diseñado este valor es de 9000 N/rad.

Ilustración 48 Dinamómetro



Fuente: Inernet

Mediante este procedimiento también se puede obtener el punto de rotura de la pala y determinar su coeficiente de seguridad real.

Los datos de este ensayo son útiles para hacer un rediseño de la pala en el caso de que no cumpla con las especificaciones establecidas en el diseño del arco. También pueden ayudar a desarrollar un método más preciso para el diseño de estos componentes.

- **Curvas de potencia reales del arco:** Este es el ensayo donde mayor información se obtiene de las características reales del arco fabricado. Con esta curva se puede determinar si las poleas están debidamente diseñadas y compárala con la curva de potencia teórica desarrollada para determinar si el método de diseño de las poleas es válido. Es importante verificar previamente la rigidez real de las palas para determinar si son estas o las poleas las que no cumplen con las especificaciones establecidas en el caso de que esto ocurra.

Un procedimiento para obtener la curva real de un arco es sujetar el arco mediante un soporte con el que se pueda tensar la cuerda sin que el cuerpo se mueva. Y con la ayuda de un dinamómetro medir la fuerza de tensado en varios puntos del tensado. A partir de estos puntos se puede desarrollar una gráfica donde se muestre la curva que definen estos puntos y compararla con las curvas obtenidas en el diseño del arco. Se puede obtener la curva en varias configuraciones de fuerza de tensado y apertura para verificar que las curvas reales coincidan las teóricas.

- **Velocidad real de las flechas disparadas:** Con este dato se puede calcular el rendimiento cinemático real del arco para determinar la energía que se pierde al disparar las flechas. En el diseño del arco no se ha determinado el rendimiento cinético que debería tener el arco, pero conviene que este sea el máximo posible para que las flechas adquieran mayor velocidad. Este es el método más sencillo para determinar este rendimiento. En el caso de que el rendimiento cinético no sea suficiente se tendrán que rediseñar las palas y las poleas para reducir su peso y su

inercia. Previamente a este ensayo se debe obtener la curva de potencia real del arco para determinar que partes del diseño del arco se tienen que modificar.

Un procedimiento para conocer la velocidad real de las flechas disparadas es mediante un cronógrafo para flechas. Con este es posible medir con precisión la velocidad de las flechas al inicio del disparo y determinar la energía que estas adquieren. También será necesario conocer el peso de las flechas. Se puede obtener la velocidad de las flechas en varias configuraciones de fuerza y de apertura del arco y usar flechas de varios pesos para determinar mejor el rendimiento cinético en estos puntos de funcionamiento.

Ilustración 49 Cronógrafo para flechas



Fuente: Internet

- **Ensayos de resistencia de los componentes:** La mejor forma de diseñar los componentes es haciendo análisis de las tensiones que aparecen en los distintos componentes mediante el software de diseño utilizado para diseñar estos componentes. Con esto se pueden hacer pruebas con distintas geometrías y materiales y determinar cuál es el diseño que mejor soporta las fuerzas y que menor

peso tiene. No obstante, para verificar que el diseño de estos componentes desarrollado mediante el software de diseño es el correcto, se pueden realizar ensayos a los componentes fabricados, donde se determinen sus puntos de rotura aplicando fuerzas en los puntos donde estas se generan al disparar el arco. Con estos ensayos se puede determinar un coeficiente de seguridad y determinar si el diseño de los componentes desarrollado con el software de diseño es el correcto.

- **Estudio del movimiento de disparo de la flecha:** Este ensayo es opcional y no sirve para determinar las características estructurales de los componentes y la energía con la que el arco dispara las flechas. Este ensayo tiene como finalidad estudiar el movimiento de la flecha y de las partes móviles del arco y ayudar a determinar que modificaciones se deben hacer para mejorar la precisión con la que el arco dispara las flechas. También se pueden determinar las vibraciones que aparecen en los componentes del arco para conocer los puntos donde estas se pueden reducir con el objetivo de mejorar la precisión y la comodidad al disparar las flechas.

Hacer este estudio requiere un equipo especial ya que debido a las elevadas velocidades que alcanzan las flechas no es posible analizar estos movimientos a simple vista. Es por esto que se requiere una cámara con la que se pueda grabar videos a un número muy elevado de fotogramas por segundo para poder captar estos movimientos a una velocidad menor y un software de edición de video para poder visualizar mejor las imágenes captadas por la cámara. Este equipo tiene un coste muy elevado, por eso solo se recomienda hacer este estudio cuando se tengan las características de la potencia que desarrolla el arco debidamente definidas a partir del método desarrollado en este trabajo y se quiera mejorar su precisión para conseguir un arco con mayores prestaciones.

Capítulo 4. Conclusiones

En este capítulo se enunciarán las conclusiones a las que se ha llegado durante la elaboración del trabajo y del método de diseño desarrollado en él.

4.1. Método de Diseño Desarrollado en el Trabajo

Con el método de diseño que se ha desarrollado en el capítulo 3 se han podido ver los problemas que aparecen a la hora de diseñar y fabricar arcos de poleas con una calidad y unos costes de fabricación que permitan su venta al público. Este trabajo puede servir como base para el desarrollo de otros métodos de diseño tanto de arcos poleas como de cualquier otro producto, ya que en este se muestra la importancia de la búsqueda de información sobre el producto que se pretende diseñar y los pasos que hay que seguir para su desarrollo y fabricación.

4.2. Prototipo Diseñado Mediante el Método Desarrollado

Finalmente, no se ha podido diseñar el cuerpo y las palas, debido a la necesidad de un mejor estudio de estos componentes, que no se ha podido llevar a cabo, no obstante, con los métodos de fabricación expuestos en el punto 3.6, sí que se ha podido determinar un coste aproximado de la fabricación de estos componentes.

Con el método desarrollado en el capítulo 3 se ha podido diseñar un arco de poleas de una manera efectiva, empezando por un estudio de las características que tienen este tipo de arcos y la definición de las características que se quieren conseguir en el arco que se va a diseñar y seguido por el diseño lo más completo posible de los componentes del arco junto la elección de unos procesos de fabricación que permitan fabricar un arco de la mejor forma posible y reduciendo los costes de fabricación.

Con el arco diseñado y los procesos de fabricación definidos en los puntos 3.5 y 3.6. para fabricar un prototipo se puede determinar que el método es útil a la hora de diseñar y fabricar un arco.

4.3. Verificación del Método de Diseño Desarrollado

Para verificar que el método desarrollado en el capítulo 3 es válido se debería de fabricar un prototipo del arco diseñado y realizar las pruebas y ensayos que se describen en el punto 3.7 para comparar que las características del arco coinciden con las que se habían establecido en su diseño (véase Tabla 9), pero como no ha sido posible hacer este estudio no se ha podido verificar que este método sea válido para diseñar arcos. No obstante, los datos obtenidos de los cálculos realizados son concisos y las características del arco diseñado en el capítulo 3 son similares a las de los arcos existentes en el mercado.

4.4. Mejora del Método y del Diseño del Arco

Este método de diseño se considera como un primer paso para el diseño de arcos de poleas y está muy lejos de ser un método eficiente para el diseño de estos productos. En el mercado existen grandes empresas que se dedican al desarrollo y fabricación de grandes cantidades de arcos de poleas y los problemas a los que se enfrentan para desarrollarlos se han podido observar con la elaboración de este trabajo. Estudiando estos problemas y los fallos que se producen al diseñar un arco con el modelo desarrollado en este trabajo se podrían aplicar mejoras y modificaciones para que este sea más eficiente y poder diseñar así, arcos con mejores prestaciones.

En cuanto al diseño del arco, como es un primer diseño hecho con este método que se ha desarrollado, está lejos de ser un arco que sea comparable a los existentes actualmente en el mercado. Pero la finalidad de este primer diseño es la de ayudar a verificar que el método desarrollado se puede usar como base para diseñar arcos de poleas y a permitir conocer cuáles son los fallos de este método y como se pueden corregir o mejorar.

4.5. Valoración Personal

La elección de este tema de trabajo se debe a que quería tener una mejor comprensión de los pasos que se tienen que seguir para desarrollar un producto y como solucionar los problemas que van surgiendo a lo largo del proceso de diseño.

La elaboración de este trabajo ha permitido comprender mejor las distintas fases que comprenden el desarrollo de un producto y la complejidad de su proceso de diseño. A lo largo de la elaboración del trabajo han ido surgiendo problemas que he tenido que resolver para poder desarrollar el método de diseño propuesto.

Un ejemplo es el desarrollo de un modelo teórico de un arco de poleas con el que poder hacer cálculos para determinar las características del arco diseñado (véase punto 3.3), en el que las fórmulas que he tenido que elaborar para poder hacer los cálculos son tan complejas que se tiene que trabajar mediante una hoja de cálculo y solo se pueden resolver mediante iteraciones.

Como el tema de trabajo que he elegido abarca todas las fases de diseño de un producto no he podido centrarme demasiado en ninguna parte determinada del diseño, debido a la limitación del tiempo que he tenido para desarrollarlo.

En la elaboración de este trabajo he tenido limitaciones a la hora de conseguir los objetivos que había planteado en un principio (véase punto 1.1). Hubiera sido de gran utilidad buscar los recursos necesarios para poder fabricar el prototipo diseñado mediante el método desarrollado para determinar si realmente es un método valido y cosas debería de modificar para que este sea más eficiente. Sin embargo, estoy satisfecho porque he conseguido comprender mejor los retos que suponen desarrollar un producto a partir de los conocimientos adquiridos en la universidad.

He invertido bastante tiempo en la elaboración de este trabajo y si en algún momento tengo la oportunidad, sí que me gustaría poder fabricar el arco o seguir con la mejora del método

desarrollado para saber si realmente soy capaz de diseñar un producto por mí mismo y adquirir más conocimientos que pueden resultarme útiles en mi vida laboral.

Bibliografía

- Balaguer, O. (22 de Junio de 2017). *Los Arcos. Algunos conceptos Físicos*. Obtenido de Caza con Arco: <http://www.cazaconarco.com/index.php/taller/167-los-arcos-algunos-conceptos-fisicos>
- Compuesto. (22 de Junio de 2017). Obtenido de Lograrco: <http://www.lograrco.es/tiposdearco/compuesto/>
- Easton. (22 de Junio de 2017). *Puesta a Punto & Mantenimiento*. Obtenido de Cerra Archery: http://www.cerraarchery.com/Tecnica_archivos/Manualeaston2003.pdf
- Esteban, R. (22 de Junio de 2017). *La Cuerda en el Arco*. Obtenido de Arqueros de Rivas: https://www.arquerosderivas.org/images/documentos/club_documentos/La_Cuerda_en_el_Arco.pdf
- García, A. (22 de Junio de 2017). *Club de Tiro con Arco Villena*. Obtenido de Tipos de Arcos: http://arquerosvillena.blogspot.com.es/2007/01/tipos-de-arcos_22.html
- Hernández, J. (22 de Junio de 2017). *Las Distintas Curvas de Potencia en las Aperturas de los Arcos*. Obtenido de Taller de Arqueria: http://www.tallerdearqueria.es/taller/articulos/curvas_potencia.pdf
- Martín, A. (22 de Junio de 2017). *Dinamica Interna del Arco. Curvas de Potencia. (1)*. Obtenido de Broadheads Business: <http://www.broadheadsbusiness.com/dinamica-interna-del-arco-curvas-de-potencia-1/>
- Matallana, A. (22 de Junio de 2017). *¿Como hacer una cuerda para nuestro arco?* Obtenido de Taller de Arqueria: <http://www.tallerdearqueria.es/taller/articulos/cuerda.pdf>
- Poles, J. (22 de Junio de 2017). *Los Arcos de Caza: Sus Clases*. Obtenido de Club de Caza: <http://www.club-caza.com/arco/articulos/poles6.asp>

Ramírez, S. (22 de Junio de 2017). *Tipos de arcos para caza. Introducción a la caza con arco (I)*. Obtenido de Trofeo Caza: <http://www.trofeocaza.com/tipos-de-arcos-para-caza/>

Tipos de Poleas. (22 de Junio de 2017). Obtenido de Arco Bosque:
<http://www.arcobosque.com/arcoin10.htm>

Varios. (22 de Junio de 2017). *Arcos de Poleas*. Obtenido de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Arco_de_poleas

Documento 2:

Presupuestos

Índice de Presupuestos

Presupuesto 1. Elaboración de los Documentos y del Diseño del Arco de Poleas.....	2
Presupuesto 2. Fabricación del Arco de Poleas Diseñado	2
Presupuesto 3. Pruebas y Ensayos para Verificar el Método Desarrollado	5
Presupuesto General.....	6

En este documento se detallan los presupuestos con los que se establecen unos costes estimados para la elaboración de este trabajo. En estos presupuestos se tienen en cuenta tanto los costes de las horas dedicadas a la búsqueda de información, el desarrollo del método de diseño y redacción de los documentos, como los costes de fabricación del prototipo del arco diseñado y de las pruebas y ensayos necesarios para verificar que el método de diseño desarrollado en el trabajo es válido.

Para mostrar una visión más clara de los costes, este documento se ha dividido en tres presupuestos:

- Un primero en el que se detallan los costes relacionados con la elaboración de los documentos de los que consta el trabajo y del diseño del arco de poleas.
- Un segundo en el que se detallan los costes que supondrían la fabricación del arco de poleas diseñado.
- Un tercero en el que se detallan los costes que supondrían la realización de las pruebas y ensayos con el arco fabricado necesarios para verificar que el método desarrollado es válido.

Como las fases de fabricación del arco y de las pruebas y ensayos a realizar no se ha llevado a cabo, los costes que se han establecido para estos presupuestos no son exactos, no obstante, se ha intentado que estos sean lo más aproximados a la realidad a partir de información obtenida de internet.

En cuanto al presupuesto de la elaboración de los documentos, se han establecido unos costes en función de la complejidad de cada parte de esta elaboración y de las horas dedicadas en cada una que se detallan en el documento. En total se han dedicado aproximadamente 300 horas de trabajo en la elaboración de este trabajo.

Presupuesto 1. Elaboración de los Documentos y del Diseño del Arco de Poleas

En este presupuesto se detallan los costes que se han establecido para la elaboración de los documentos y el diseño del arco de poleas. Estos se han determinado a partir de la dificultad de cada actividad desarrollada durante la elaboración del trabajo y de las horas dedicadas a cada una. También se detalla el uso de los recursos necesarios utilizados para la elaboración del trabajo.

Tabla 1
Presupuesto para la elaboración de los documentos y diseño de un arco

Actividad Desarrollada	Coste/Tiempo (€/h)	Tiempo Invertido (h)	Coste (€)
Búsqueda de Información	15,00	45	675,00
Desarrollo de los Modelos Teóricos	25,00	101	2.525,00
Estudio de Mercado	15,00	29	435,00
Diseño de los Componentes	25,00	61	1.525,00
Redacción de los Documentos	20,00	58	1.160,00
Uso del Ordenador y del Software Necesario	1,00	294	294,00
Total			6.614,00€

Fuente: Elaboración propia

Presupuesto 2. Fabricación del Arco de Poleas Diseñado

En este presupuesto se detallan los costes de los procesos de fabricación de los componentes que se han diseñado, así como los costes de las materias primas que se requieren para fabricarlos. También se detallan los costes de los componentes que obtienen ya fabricados y que no ha sido necesario diseñar, como tornillería y rodamientos, además del coste del montaje de los componentes y de los ajustes necesarios que se deben de hacer al arco una vez montado.

Los costes de fabricación y de las materias primas que se ha establecido, es aproximado, ya que al no proceder con la fabricación del arco no se han consultado los costes reales que estos tendrían. Estos costes se han determinado en el punto 3.6.

Tabla 2
Presupuesto para la fabricación del arco de poleas diseñado

Material/Proceso de Fabricación	Coste/Unidad (€)
Materias primas	204,10
Bloque Aluminio	151,80
Placa Fibra de Vidrio	9,70
Chapa Aluminio	18,10
Hilo <i>Fast Flight</i>	22,20
Varilla Aluminio	0,50
Placa PVC	1,00
Varilla Acero Inox.	0,80
Procesos de fabricación de los componentes	144,50
Cuerpo	45,00
Palas	5,00
Poleas	66,00
Cuerda y Cables	20,00
Varilla Separacables	3,00
Separador Separacables	4,00
Ejes Poleas	1,50
Otros Componentes	17,45
2 Rodamientos	16,00
2 Tornillos	1,40
4 Arandelas de Seguridad	0,05
Montaje y Ajuste de los componentes del Arco	20,00
Total	386,05€

Fuente: Elaboración propia

Presupuesto 3. Pruebas y Ensayos para Verificar el Método de Diseño Desarrollado

En este presupuesto se detallan los costes de la realización de las pruebas y ensayos necesarios para verificar que el método de diseño desarrollado es válido y de los equipos y herramientas que se necesitan para realizarlos (ver punto 3.7).

El coste de los equipos y materiales es aproximado, ya que este dependerá del modelo elegido y del precio de venta que tenga en el momento de su compra.

El coste para la realización de las pruebas y ensayos se ha determinado a partir de la dificultad que implica su desarrollo.

Tabla 3

Presupuesto para realizar los ensayos y verificar el método de diseño

Actividad	Coste/Tiempo (€/h)	Tiempo Invertido (h)	Coste (€)
Equipos y material			366,00
Cronógrafo para flechas			180,00
Báscula de Precisión			20,00
5 Flechas de Varios Pesos			40,00
Dinamómetro			45,00
Cinta métrica			6,00
Diana de Espuma			75,00
Realización de ensayos y verificación del método de diseño	20,00	12	240,00
Uso del Ordenador y del Software Necesario	1,00	9	9,00
		Total	615,00€

Fuente: Elaboración propia

Presupuesto General

Este presupuesto es la suma de los tres presupuestos anteriores (véase Tablas 1, 2 y 3) y sirve para aportar una visión global de los costes totales del trabajo elaborado y para establecer el impuesto que se impone actualmente en España, que equivale al 21% del coste total del trabajo.

Tabla 4
Presupuesto general

Presupuesto	Coste (€)
Elaboración de los Documentos y Diseño del Arco de Poleas	6.614,00
Fabricación del Arco Diseñado	386,05
Pruebas y Ensayos para Verificar el Método de Diseño Desarrollado	615,00
Total, antes de impuestos	7.615,05€
I.V.A. (21%)	1.599,16€
Total	9.214,21€

Fuente: Elaboración propia

Documento 3:

Planos

Índice de Planos

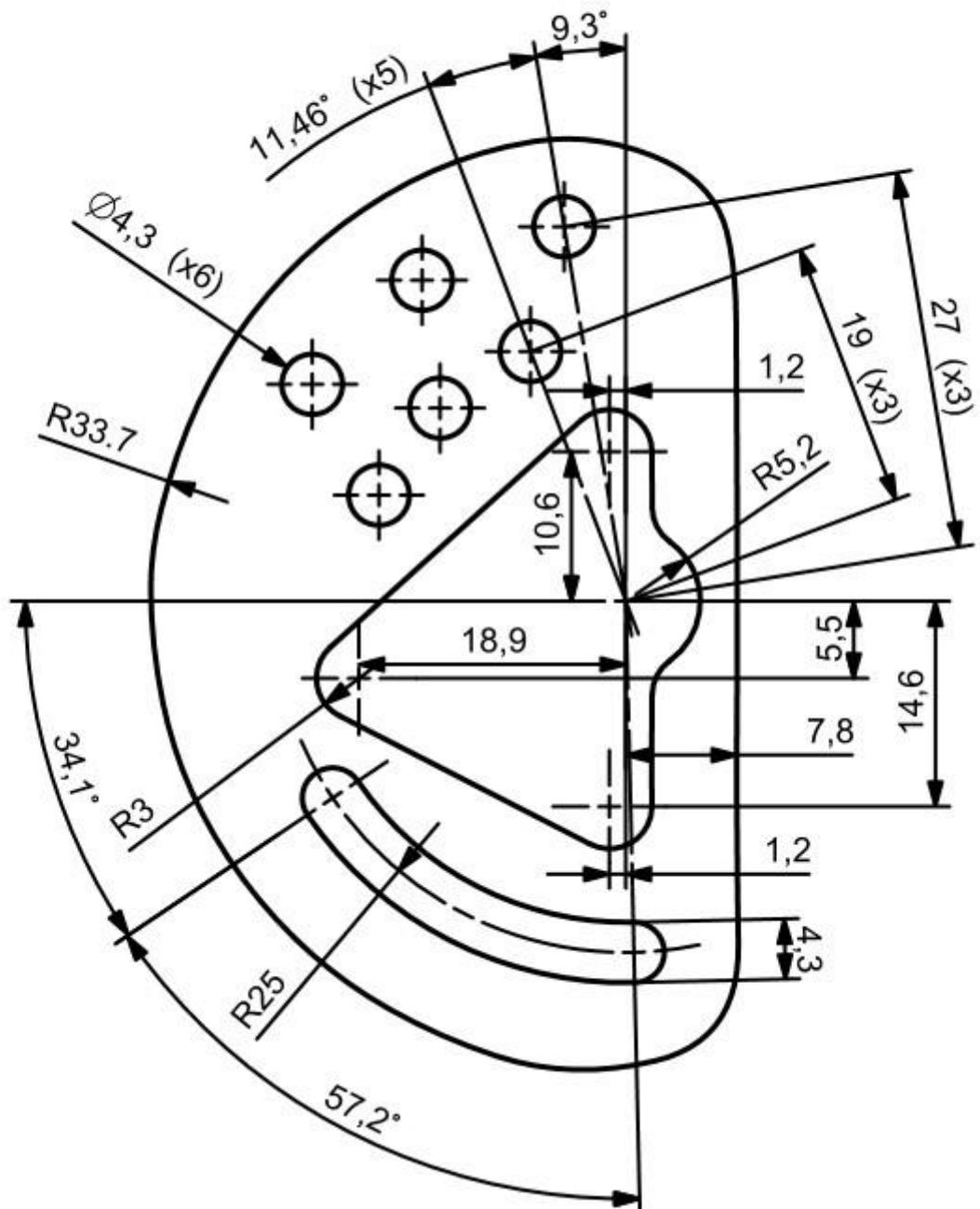
Tabla de Materiales y Tratamientos.....	1
Polea Pequeña Materia Prima	000101
Polea Pequeña	000100
Polea Grande Materia Prima.....	000201
Polea Grande.....	000200
Cable	000300
Cuerda.....	000400

Tabla de materiales

001 Aluminio 6061

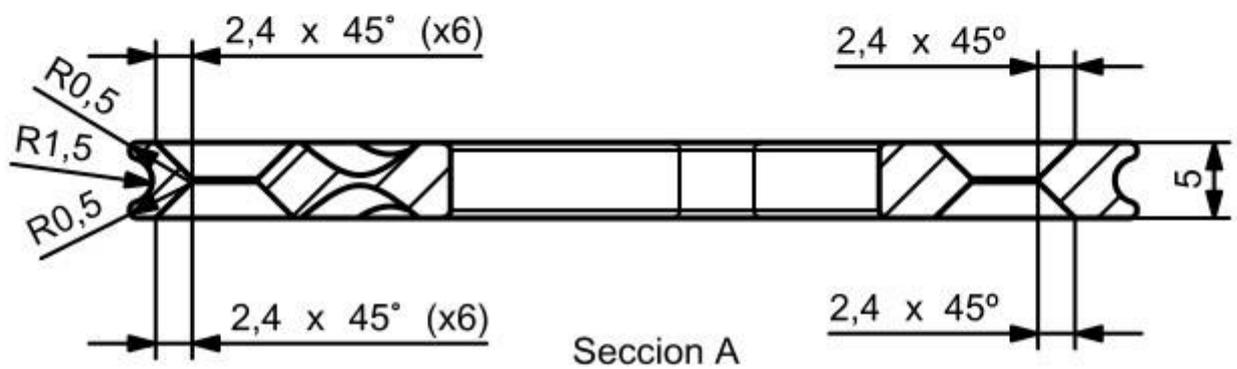
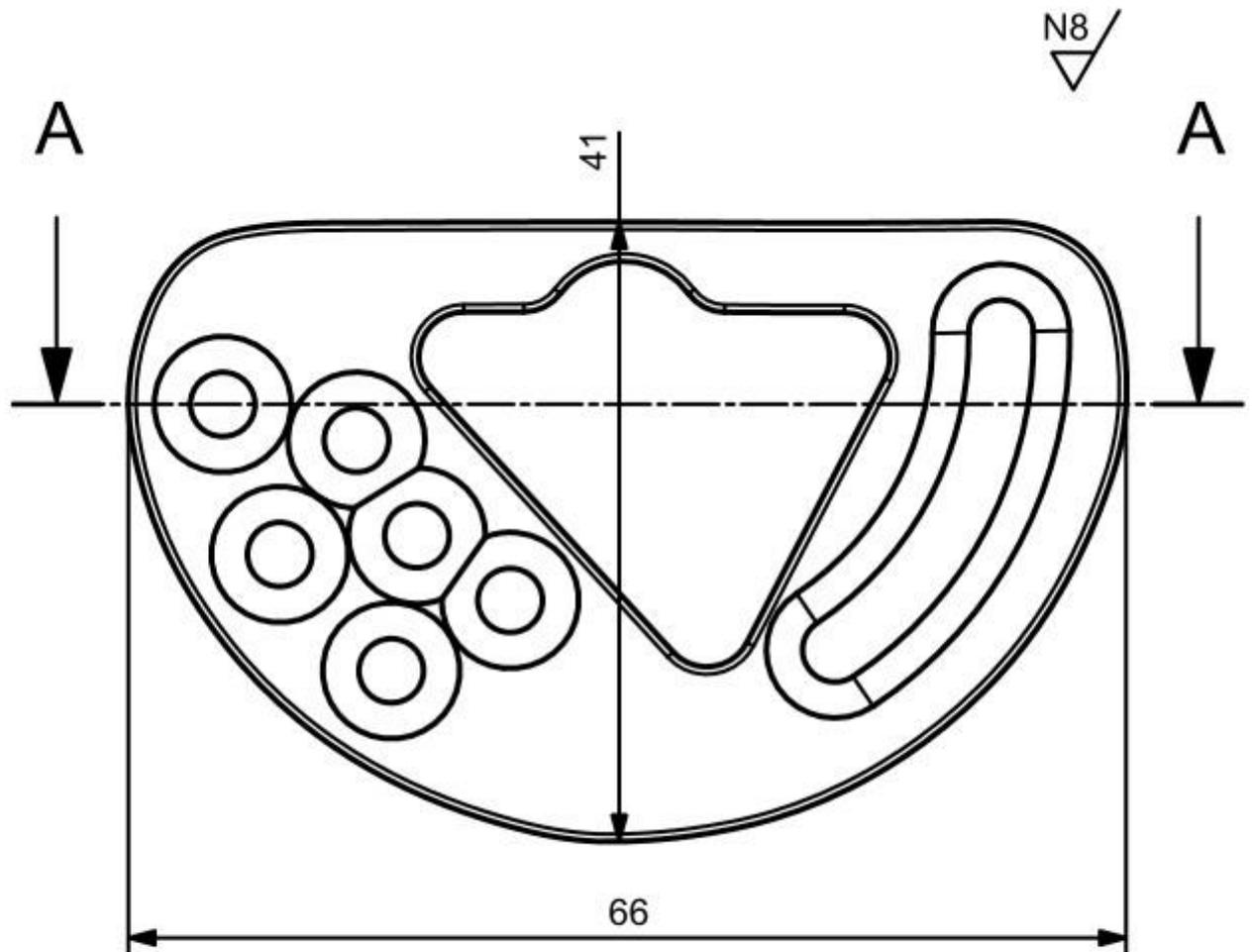
Tabla de tratamientos

CE001 Recubrimiento de la cuerda con cera lubricante

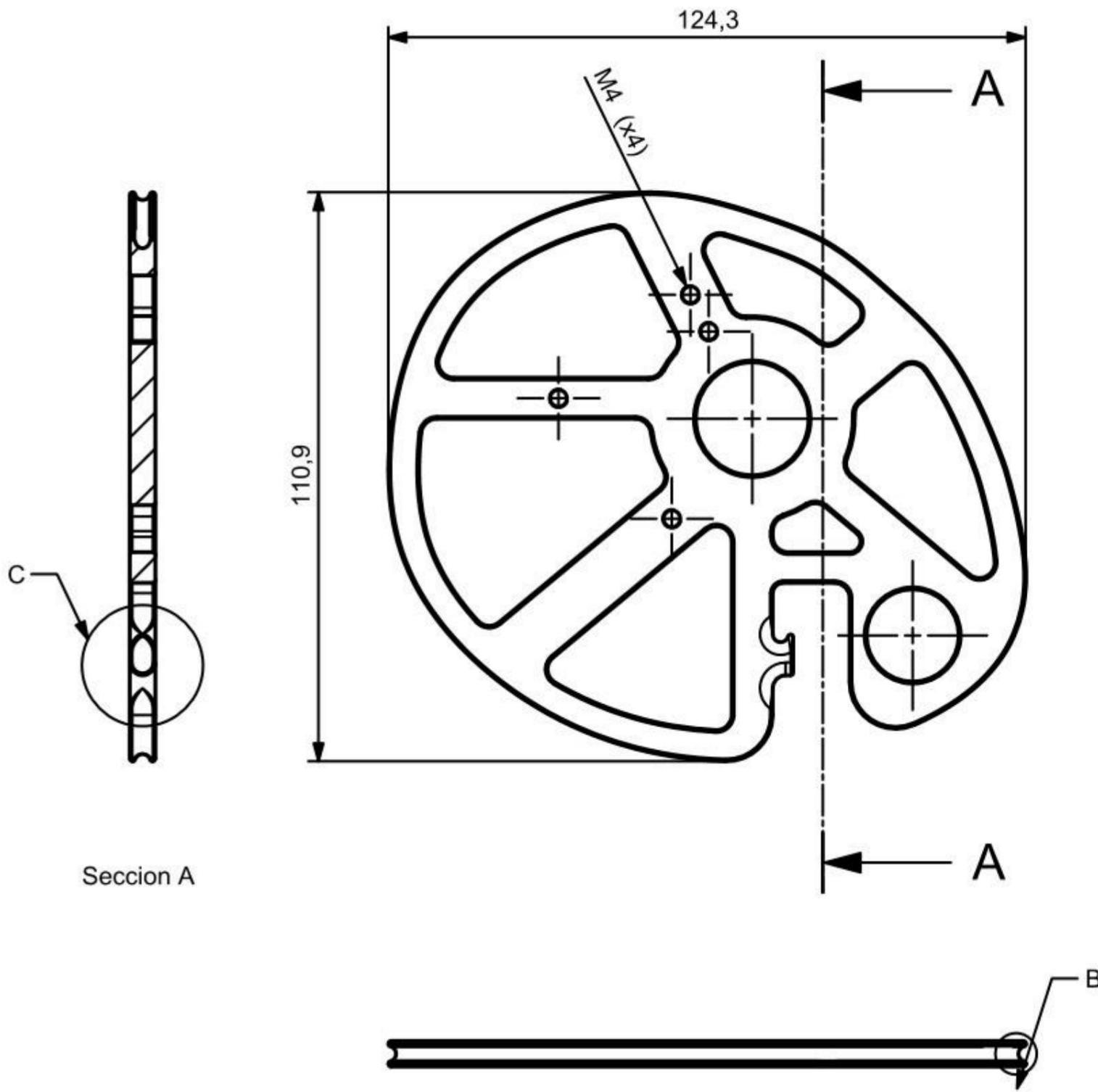


Desarrollo:
Espesor: 5mm

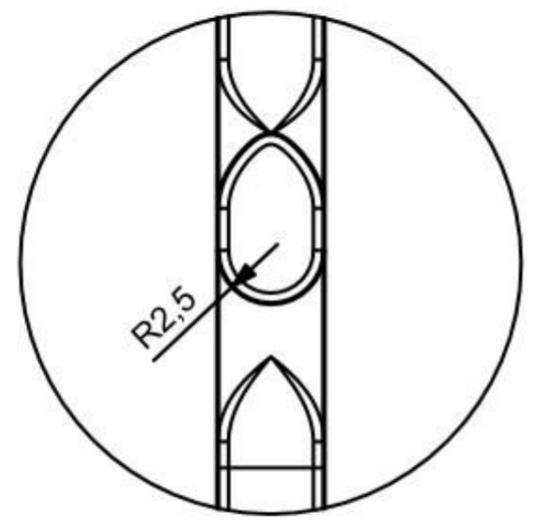
Proyecto: Prototipo de un Arco de Poleas		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  <small>Escola Tècnica Superior de Ingenieria del Disseny</small>	
Material: COD. 001	Tratamiento:	Plano: POLEA PEQUEÑA MATERIA PRIMA	Nº Plano: 000101
Escala: 2:1	Tamaño: A4	Fecha: 04.05.17	Dibujado por: David Albiol Hernández
			Firma:



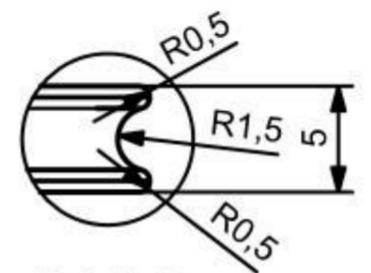
Proyecto: Prototipo de un Arco de Poleas		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  <small>Escola Tècnica Superior de Ingenieria del Disseny</small>	
Material: 000101	Tratamiento:	Plano: POLEA PEQUEÑA	Nº Plano: 000100
Escala: 2:1	Tamaño: A4	Fecha: 04.05.17	Dibujado por: David Albiol Hernández
			Firma:



N8



Detalle C
Escala 3:1

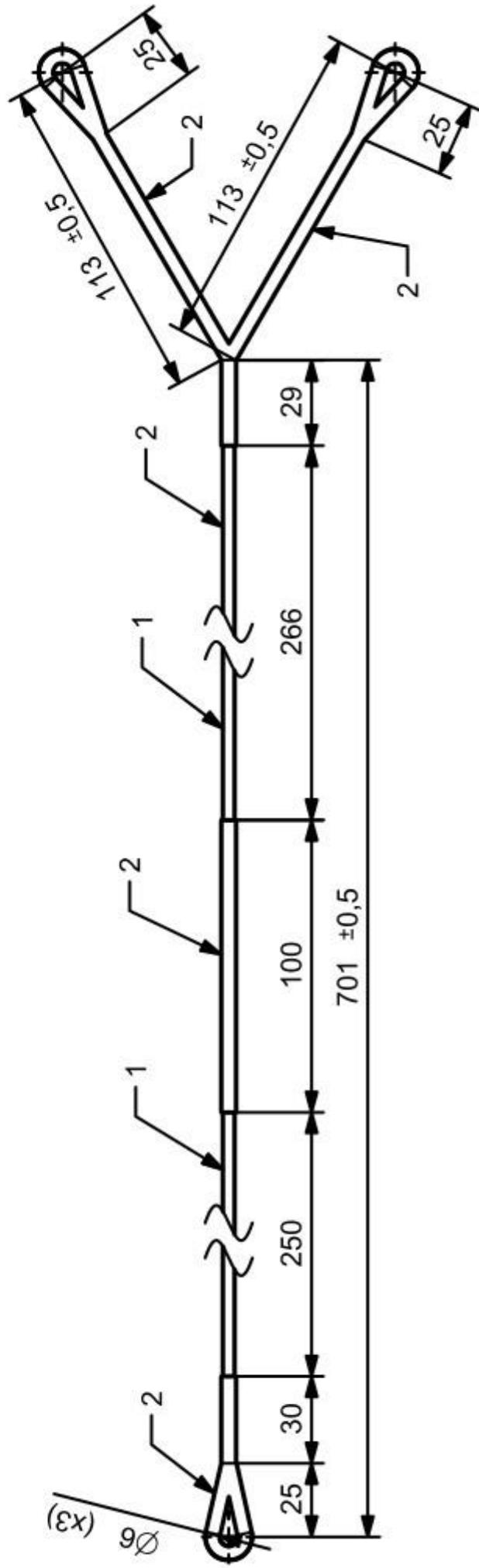


Detalle B
Escala 3:1

Seccion A

Nota: Hacer filete en todas las esquinas de radio 0,5mm

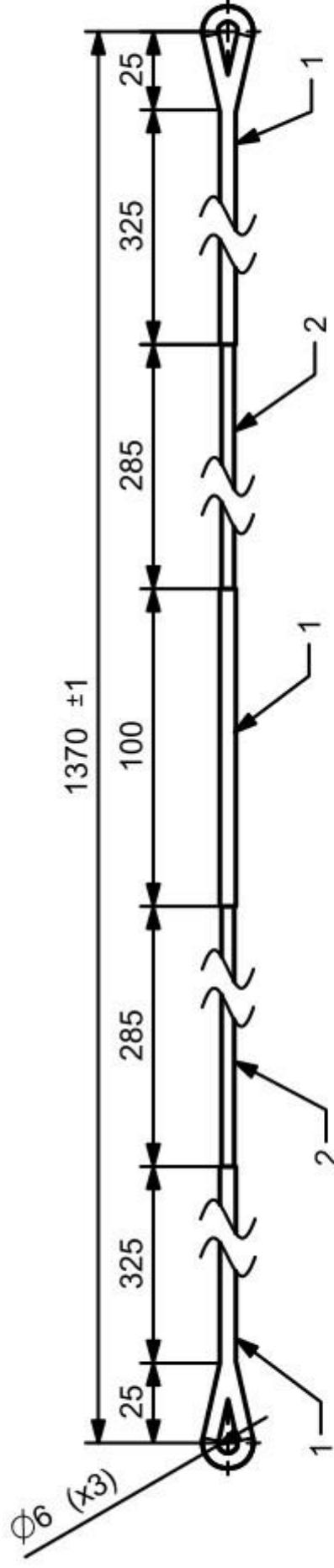
Proyecto: Diseño de un Arco de Poleas		 	
Material: 000201	Tratamiento:	Plano: POLEA GRANDE	Nº Plano: 000200
Escala: 1:1	Tamaño: A4	Fecha: 06.05.17	Dibujado por: David Albiol Hernández
			Firma:



- 1: Hilo fast flight $\varnothing 0,14$ mm. 20 hilos
- 2: Recubrimiento de una capa de hilo de Dineema $\varnothing 0,19$ mm

Nota: Dar 9 vueltas al cable para instalar en el arco

Proyecto: Diseño de un Arco de Poleas		 	
Material:	Tratamiento:	Plano:	Nº Plano:
	CE001	CABLE	000300
Escala:	Tamaño:	Dibujado por:	Firma:
1:2	A4	David Albiol Hernández	
	Fecha:		
	09.05.17		



- 1: Hilo de fast flight $\varnothing 0,14$ mm. 20 hilos
- 2: Recubrimiento de una capa de hilo de Dineema $\varnothing 0,19$ mm

Nota: Dar 18 vueltas a la cuerda para instalar en el arco

Proyecto: Diseño de un Arco de Poleas		 	
Material:	Tratamiento: CE001	Plano: CUERDA	Nº Plano: 000400
Escala: 1:2	Tamaño: A4	Fecha: 09.07.17	Firma: David Albiol Hernández

