

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

PREDIMENSIONAMIENTO DE UN TELEFÉRICO

Alumno/Alumna: Marijuán-Requeta, García, Amaia

Director/Directora: Macareno, Ramos, Luis María

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 19, junio, 2019



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

Predimensionamiento de un teleférico

ÍNDICE

1.	DATOS BÁSICOS	1
1.1.	DATOS BÁSICOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO	1
1.2.	RESUMEN TRILINGÜE + PALABRAS CLAVE	1
2.	MEMORIA	3
2.1.	INTRODUCCIÓN	3
2.2.	CONTEXTO	4
2.3.	OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	5
2.4.	BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	6
2.5.	ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	7
3.	METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	10
3.1.	PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	10
	CLASIFICACIÓN DE LOS TELEFÉRICOS	10
	ELEMENTOS DEL SISTEMA	12
	SIMPLIFICACIONES DE CÁLCULO	16
	NORMATIVA	16
3.2.	CÁLCULOS DEL PROYECTO	17
	DATOS	18
	CABLES	24
	TENSIONES	26
	RESULTADOS	37
4.	PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	46
4.1.	FASES DEL PROYECTO	46
4.2.	DIAGRAMA DE GANTT	48
5.	ASPECTOS ECONÓMICOS	49
5.1.	PARTIDAS DEL PRESUPUESTO	49
5.2.	COSTES TOTALES	50
6.	CONCLUSIONES	51
	BIBLIOGRAFÍA	52
	ANEXOS	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Funicular	7
Ilustración 2. Teleférico.....	7
Ilustración 3. Telesquí	8
Ilustración 4. Teleférico monocable (izquierda) y bicable (derecha).....	10
Ilustración 5. Teleférico de movimiento reversible (izquierda) y unidireccional (derecha)	11
Ilustración 6. Conexión permanente (izquierda) y temporal (derecha).....	12
Ilustración 7. Estación de teleférico.....	12
Ilustración 8. Cabina de teleférico	13
Ilustración 9. Pilar de una instalación de teleférico.....	13
Ilustración 10. Balancín de un pilar de teleférico	14
Ilustración 11. Configuraciones posibles del cable	15
Ilustración 12. Composición del cable	15
Ilustración 13. Dimensiones del pilar simplificado	18
Ilustración 14. Cable IPH GP CW.....	24
Ilustración 15. Cambio de coordenadas de la curva de catenaria	27
Ilustración 16. Tramo de teleférico con 3 cabinas	31
Ilustración 17. Equilibrio del nudo 1	33
Ilustración 18. Pilar sometido a las tensiones del cable	37
Ilustración 19. Nuevo sistema de coordenadas.....	39
Ilustración 20. Esfuerzos de sección	40
Ilustración 21. Distribución de tensiones en la sección de empotramiento	41
Ilustración 22. Diagrama de Gantt del proyecto	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Colores de relleno.....	17
Tabla 2. Datos de los pilares.....	19
Tabla 3. Datos de las cabinas.....	20
Tabla 4. Datos del cable	20
Tabla 5. Datos del terreno	21
Tabla 6. Coordenadas de los pilares	22
Tabla 7. Información del cable	25
Tabla 8. Coordenadas de los pilares extremos de cada tramo.....	26
Tabla 9. Tensiones del cable debidas a su peso propio	30
Tabla 10. Tensiones del cable debidas al peso de las cabinas vacías (tramo 4).....	35
Tabla 11. Tensiones del cable debidas al peso de las cabinas llenas (tramo 4)	36
Tabla 12. Estado de carga.....	38
Tabla 13. Tensiones correspondientes al estado de carga elegido (pilar 5)	39
Tabla 14. Dimensiones de los pilares.....	39
Tabla 15. Esfuerzos en la sección del empotramiento (pilar 5).....	41
Tabla 16. Expresiones de las tensiones en los puntos críticos de la sección.....	42
Tabla 17. Tensiones en los puntos críticos de la sección de empotramiento (pilar 5)	42
Tabla 18. Esfuerzos de sección y tensiones en la secciones de empotramiento	44
Tabla 19. Presupuesto.....	50

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Vista simplificada de la instalación	23
Gráfico 2. Configuración del cable debida a su propio peso (tramo 4)	29
Gráfico 3. Configuración del cable debida al peso de las cabinas vacías (tramo 4)	34
Gráfico 4. Configuración del cable debida al peso de las cabinas llenas (tramo 4)	35
Gráfico 5. Distribución de costes del proyecto	50

1. DATOS BÁSICOS

1.1. DATOS BÁSICOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

- Alumna: Amaia Marijuán-Requeta García
- Director: Luis María Macareno Ramos
- Departamento: Departamento de Ingeniería Mecánica
- Título del trabajo: Predimensionamiento de un teleférico

1.2. RESUMEN TRILINGÜE + PALABRAS CLAVE

- Castellano

Resumen: En el presente proyecto se desarrolla un programa que sirve como herramienta para el cálculo estructural de una instalación de teleférico. Como datos de partida, el usuario debe introducir en una hoja Excel una serie de parámetros relativos a los elementos de la instalación, tales como los pilares, las cabinas, el cable y las características del terreno. A partir de la información aportada, el programa calcula las tensiones soportadas por el cable y, con ellas, los esfuerzos máximos provocados en los pilares. Como resultado final se determina si la sección de los pilares elegida inicialmente es suficiente para que el sistema aguante las cargas o si, por el contrario, es necesario aumentarla.

Palabras clave: teleférico, cable, tensión, pilar, esfuerzo

- Euskera

Laburpena: Aurkeztutako lanean teleferiko baten instalazioaren kalkulu estrukturala egiteko erraminta bat garatzen da. Hau lortzeko, datu estruktural batzuk sartu behar dira Excel horri batean. Datu horiek instalazioan aurki daitezkeen elementuak izango dira; zenbat zutabe eta kabina dauden, kablearen deskribapena eta instalazioaren lurzoruaren ezaugarriak, ain zuzen ere. Emandako informazioarekin, diseinatutako

programak, kableek jasaten dituzten tentsioak kalkulatzeko, horrela zutabeek pairatzen dituzten esfortsu maximoak kalkulatu ahal izateko. Guzti honen bitartez, hasieran ezarritako zutabeen azalera esfortsu horiek jasateko gai izango den ala ez zehaztuko da.

Hitz gakoak: teleferiko, kable, tentsio, zutabe, esfortsu

- Inglés

Abstract: In the present project a program is developed to serve as a tool for the structural calculation of a cable car installation. As starting input data, the user must enter in an Excel sheet several parameters related to the parts of the installation, such as pillars, cabins, cable and ground characteristics. From this information, the program is able to calculate the tensions supported by the cable and, with them, the maximum stresses caused in the pillars. As a final result it is determined if the section of the pillars initially chosen is enough for the system to withstand the loads or, on the opposite, it is necessary to increase it.

Keywords: cable car, cable, tension, pillar, stress

2. MEMORIA

2.1. INTRODUCCIÓN

El transporte por cable ha sido utilizado por el ser humano desde la antigüedad para el desplazamiento de personas, animales y objetos. A pesar de que su uso no está tan extendido como el de los medios de transporte habituales (terrestres, aéreos y marítimos), se trata en muchas ocasiones de una solución adecuada, incluso la única, para resolver determinadas necesidades de transporte.

Su funcionamiento se basa en el movimiento de una serie de vehículos transportadores por medio de uno o varios cables. Este tipo de configuración permite, en gran medida, salvar las irregularidades del terreno, por lo que su principal ámbito de aplicación es el transporte en pequeñas distancias con desniveles.

Entre los diferentes sistemas de transporte por cable, este trabajo se centra en los teleféricos, que son instalaciones en las que los vehículos van suspendidos de un cable, sostenido por pilares a lo largo de su recorrido. El transporte se hace efectivo gracias al movimiento de los cables.

En lo que al desarrollo del proyecto se refiere, en primer lugar se realiza una breve clasificación y descripción de los sistemas de transporte por cable. Adicionalmente, para el caso de los teleféricos, se recogen los componentes más importantes que constituyen la instalación y se analiza la función de cada uno de ellos.

Los elementos más relevantes en el predimensionamiento, y que por tanto suponen el objeto de cálculo del trabajo, son los cables y los pilares del teleférico. De ellos depende que el sistema sea capaz de soportar las cargas, por lo que deben ser escogidos en base a un análisis exhaustivo.

Para el estudio de la resistencia del sistema se emplea una estructura simplificada de la instalación, dependiente de una serie de parámetros, que se programa en unas hojas de cálculo Excel. El objetivo del programa será en todo momento encontrar las dimensiones de los pilares que permitan el funcionamiento óptimo del sistema, es decir, aquel en el que la capacidad de resistencia esté asegurada pero el porcentaje de aprovechamiento de la sección sea, además, el más elevado posible.

Para la correcta comprensión del programa de Excel, se presentan las distintas fórmulas utilizadas a lo largo del proyecto y se analizan detalladamente las operaciones realizadas para el cálculo de las tensiones tanto en los cables como en los pilares.

En cuanto al desarrollo del trabajo, se ha de mencionar que se aplican principalmente los conocimientos adquiridos en el ámbito de la Mecánica. Por un lado, el cálculo de las tensiones en los cables se centra en el estudio de sólidos funiculares, en concreto de cables sometidos a su propio peso y cables sometidos a cargas puntuales. Por otro lado, el análisis de la sección más comprometida de los pilares se basa en el cálculo de los esfuerzos internos y, con ellos, las tensiones normales y cortantes ocasionadas en las distintas combinaciones de carga.

2.2. CONTEXTO

Desde el comienzo de la humanidad el ser humano ha necesitado desplazar objetos de unos lugares a otros. Las civilizaciones de la antigüedad fueron enfrentándose a diversas necesidades en función de las condiciones orográficas de los lugares donde habitaban. Dichas particularidades del terreno así como el tipo de mercancías a transportar fueron dando lugar a los diferentes medios de transporte.

En situaciones en las que las condiciones del terreno eran complicadas, dificultando e incluso impidiendo el transporte terrestre, fue necesario buscar una nueva forma de transporte que salvara estos obstáculos. La opción de que las mercancías se desplazasen por el aire, suspendidas de una cuerda fabricada a partir de filamentos vegetales o pieles de animales, ofrecía una solución en situaciones difíciles como ríos muy caudalosos, cañones y zonas montañosas con grandes desniveles. De esta manera fue dando sus primeros pasos un nuevo medio de transporte, el transporte por cable.

Desde su creación este medio de transporte ha ido evolucionando, siempre buscando dar respuesta a las diferentes necesidades de las sociedades. Con el inicio de la minería fue de gran relevancia, ya que permitía a los mineros transportar las herramientas necesarias para el trabajo de extracción de los minerales hasta el fondo de la mina, así como trasladar el mineral obtenido al exterior de la misma.

Durante la primera guerra mundial este medio de transporte experimentó un importante desarrollo, construyéndose un gran número de instalaciones con el fin de abastecer a los ejércitos en zonas de difícil acceso.

En las últimas décadas el teleférico, que es el objeto de estudio de este proyecto, ha evolucionado a gran velocidad debido principalmente al enorme incremento de la afición por los deportes de montaña y el turismo destinado a disfrutar de itinerarios panorámicos sobre lugares de atractivo especial como parques naturales.

El creciente interés del público por acceder a zonas que antes resultaban inaccesibles ha supuesto que, a día de hoy, el fin principal de los teleféricos sea el transporte de personas. Por esta razón, además de centrar la atención en los avances tecnológicos y la innovación, es de vital importancia garantizar la seguridad de los pasajeros, ya que un accidente podría tener consecuencias fatales.

Esto conlleva la necesidad de realizar amplios estudios de las tensiones que soportan los cables que transportan las cabinas y de la resistencia de los pilares que sustentan las instalaciones para evitar fallos del sistema. Por ello se hace necesario contar con programas de cálculo de esfuerzos de las instalaciones que permitan comprobar que todos los parámetros propuestos para el diseño del sistema son los correctos para asegurar un funcionamiento seguro y descartar cualquier posibilidad de fallo.

2.3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

El objetivo principal del proyecto es analizar las tensiones en los cables así como los esfuerzos que se dan en los pilares de una instalación de teleférico. Conocidos estos esfuerzos se pretende determinar si la sección inicialmente propuesta para los pilares soportará las cargas o, si por el contrario, se ha de aumentar dicha sección.

Para el predimensionamiento de la instalación se desarrolla un programa en el software Excel con varias hojas de cálculo, en las que se deben introducir una serie de variables, entre las cuales se encuentran:

- La capacidad y el peso de las cabinas
- Las coordenadas de los pilares
- El diámetro y el peso del cable
- Las dimensiones iniciales de los pilares

Una vez introducidos los datos necesarios, el programa se encarga de realizar los cálculos oportunos del análisis de resistencia, obteniendo los siguientes resultados:

- Las tensiones del cable debidas al peso propio (catenaria) y al peso de las cabinas (cargas puntuales) en cada tramo de la instalación
- Los esfuerzos internos y las tensiones que tiene que soportar cada uno de los pilares
- El porcentaje de aprovechamiento de la sección de los pilares

Es importante mencionar que el programa de Excel no tiene en cuenta una serie de factores, como puede ser la acción del viento, que pueden tener influencia sobre los resultados. Las simplificaciones adoptadas se explican más adelante en detalle.

Por otra parte, se busca en todo momento que el uso del programa sea lo más sencillo posible, por lo que se procura automatizar, en la medida de lo posible, todos los cálculos necesarios. De esta manera, el usuario podrá obtener los resultados para todos los tramos y pilares de la instalación al mismo tiempo, simplemente pulsando unos botones.

Se trata, por lo tanto, de una herramienta útil para comprobar la viabilidad del predimensionamiento de una instalación de teleférico.

2.4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

El desarrollo del presente trabajo supone una serie de beneficios tanto a nivel personal en el ámbito académico como a nivel laboral.

BENEFICIO PERSONAL

En primer lugar, en lo relativo al aprendizaje académico, se trata de un ejercicio de diseño y análisis estructural en el que se ponen en práctica conocimientos adquiridos en diferentes asignaturas de la carrera.

El proyecto integra, por un lado, conocimientos de sólidos funiculares relativos a la “Mecánica”, ya que uno de los elementos principales de la instalación es el cable transportador del que cuelgan las cabinas. Por lo tanto, son objeto de análisis en este campo el peso propio del cable, cuya configuración se conoce con el nombre de catenaria, y el peso de las cabinas que se consideran como cargas puntuales.

Por otro lado, se necesitan pilares resistentes, capaces de sustentar las cargas de la instalación, por lo que también se realizan cálculos propios de “Resistencia de Materiales” y “Cálculo Elástico de Sólidos”, como son los esfuerzos de sección internos y las tensiones que éstos provocan en las secciones críticas.

Además de las bases de mecánica mencionadas, se incluyen nociones de la rama de informática, útiles a la hora de programar las diferentes hojas de cálculo Excel.

BENEFICIO LABORAL

En lo que al beneficio laboral se refiere, se ha de resaltar la realización de apartados fundamentales en cualquier proyecto profesional. Se aporta, por un lado, la planificación del proyecto en un diagrama de Gantt en el que se detallan los plazos y la interdependencia de las distintas tareas y, por otro lado, el presupuesto del mismo desglosado en partidas, de manera que se pueden analizar los diferentes costes.

Por último, cabe destacar el uso extendido en la actualidad de los programas Microsoft Excel. Se trata de una herramienta rápida y relativamente sencilla que resulta de gran utilidad a la hora de programar todo tipo de cálculos, por lo que supone una ventaja de cara al futuro profesional del alumno. En este caso, los cálculos que se realizan son los necesarios para obtener las tensiones que se dan en una instalación de teleférico.

2.5. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

EL REGLAMENTO (UE) 2016/424 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 9 de marzo de 2016 relativo a las instalaciones de transporte por cable incluye dentro de las mismas a los sistemas de elevación, tales como funiculares, teleféricos (telecabinas y telesillas) y telesquíes. Todas ellas se consideran instalaciones de transporte de personas por cable y son utilizadas, principalmente, en estaciones turísticas de alta montaña, en instalaciones de transporte urbano y en instalaciones deportivas.

A continuación, se define brevemente cada una de ellas:

- Funiculares: instalaciones cuyos vehículos son arrastrados por uno o más cables a lo largo de raíles que pueden descansar sobre el suelo o reposar sobre estructuras fijas.



Ilustración 1. Funicular

- Teleférico: instalaciones cuyos vehículos van suspendidos y son propulsados por uno o más cables. Esta categoría incluye los telecabinas y los telesillas.



Ilustración 2. Teleférico

- Telesquíes: instalaciones en las que los pasajeros, debidamente equipados, son arrastrados por una pista preparada al efecto.



Ilustración 3. Telesquí

Las primeras civilizaciones que hicieron uso del transporte por cable fueron las orientales (China, Japón e India) y la antigua civilización inca de Perú.

En Europa no aparece este tipo de transporte hasta la Edad Media, a principios del siglo XVI, empleándose para la construcción de castillos y fortificaciones. En aquella época el cable estaba fabricado por cuerdas de cáñamo y para su funcionamiento se utilizaba la tracción animal o humana.

A partir del año 1500 comienza a utilizarse el cable de acero y desde el siglo XVI al XIX se va perfeccionando su trenzado de hilos, contribuyendo al desarrollo del transporte por cable, principalmente para su uso en las minas de carbón.

A partir de los años 30 del siglo XX proliferan los teleféricos con fines turísticos en lugares de montaña, sustituyendo en muchos casos a los funiculares y los trenes cremallera. Sin embargo, es en las décadas de los 60 y los 70 cuando se produce el mayor desarrollo de este tipo de transporte, impulsado principalmente por el auge del esquí y otros deportes de montaña.

Desde entonces hasta ahora los teleféricos han experimentado una gran evolución, construyéndose, a día de hoy, instalaciones cada vez más modernas. En su diseño, además de garantizar el buen funcionamiento y la seguridad, se da gran importancia a la innovación, la estética y la comodidad.

Los teleféricos actuales se utilizan principalmente con tres fines:

- Teleféricos destinados a los deportes de montaña, entre los que destacan los deportes de invierno
- Teleféricos turísticos en lugares con vistas panorámicas, con el fin de facilitar el disfrute de espacios inaccesibles con otros medios de transporte
- Transporte urbano en ciudades con grandes desniveles

3. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

El teleférico es un medio de transporte aéreo constituido por cabinas, con capacidad para llevar grupos de personas, colgadas de uno o varios cables que se encargan de hacer avanzar a las unidades a través de las estaciones.

La mayoría de estos medios de transporte son accionados por energía eléctrica y se emplean en zonas con grandes diferencias de altura, donde el acceso por carretera o ferrocarril resulta complicado.

Para la correcta comprensión del trabajo, se presenta primeramente una clasificación de los teleféricos atendiendo a distintos aspectos de funcionamiento. A continuación, se describen los elementos más importantes de la instalación y, por último se recogen las simplificaciones adoptadas para el cálculo de las tensiones en los cables y los esfuerzos en los pilares.

CLASIFICACIÓN DE LOS TELEFÉRICOS

SEGÚN EL TIPO DE CABLES

- Monocable: instalaciones que constan de un único cable transportador que realiza la función tanto del cable portante como del cable tractor, es decir, sostiene y da movimiento a los vehículos que cuelgan del mismo.
- Bicable: sistema formado por uno o varios cables portantes sobre los que rueda el vehículo, que es propulsado por otro cable denominado tractor. Por lo tanto, el nombre de este tipo de teleféricos no se debe al número de cables, sino a que las dos funciones (portadora y tractora) están asignadas a dos tipos de cables diferentes.



Ilustración 4. Teleférico monocable (izquierda) y bicable (derecha)

SEGÚN EL TIPO DE MOVIMIENTO

- **Movimiento reversible o de vaivén:** los vehículos se mueven hacia delante y hacia atrás entre las dos estaciones sobre un mismo cable. Son ideales para terrenos extremos y poseen una alta estabilidad contra el viento. Aunque este tipo de configuración permite que el equipamiento de las estaciones sea menos complejo, la capacidad de transporte se limita a pocos vehículos.
- **Movimiento unidireccional o circulante:** el desplazamiento de los vehículos se da siempre en el mismo sentido. Dentro de este tipo de movimiento se distinguen dos variantes: la primera es la instalación de movimiento continuo, en la que la circulación se realiza a velocidad constante; y la segunda es la instalación de movimiento intermitente, en la que la velocidad del cable varía (por ejemplo, se reduce al pasar sobre los soportes).



Ilustración 5. Teleférico de movimiento reversible (izquierda) y unidireccional (derecha)

SEGÚN EL TIPO DE UNIÓN DE LA CABINA AL CABLE

- **Conexión permanente:** la unión se mantiene incluso cuando los vehículos permanecen en las estaciones. Se conocen por el nombre de instalaciones de pinza fija y son adecuadas principalmente para distancias cortas.
- **Conexión temporal:** la unión se realiza a la salida de la estación y se libera a la llegada del vehículo a la otra estación. Se conocen como instalaciones de pinza desembagable.

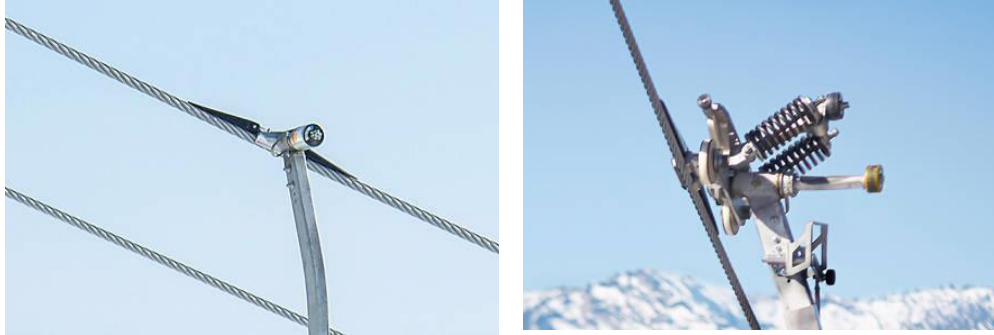


Ilustración 6. Conexión permanente (izquierda) y temporal (derecha)

ELEMENTOS DEL SISTEMA

- ESTACIONES

Son los puntos del sistema en los que los pasajeros acceden a las cabinas. Cada sistema de teleférico consta, como mínimo, de dos estaciones: la estación inicial y la estación final.

En la mayoría de los casos, los aspectos técnicos de la instalación (motor, frenos, panel de mando...) se sitúan en las estaciones, en lugar de acoplarse directamente al vehículo.



Ilustración 7. Estación de teleférico

- CABINAS

Son los vehículos en los que van alojados los pasajeros durante el transporte y cuentan con distintas capacidades según el tamaño de las mismas. Constan de una construcción de aluminio con perfiles acristalados para proporcionar una vista panorámica del terreno que va a ser sobrevolado.



Ilustración 8. Cabina de teleférico

- PILARES

Se trata de construcciones robustas de forma cilíndrica o tubular que son las encargadas de soportar el peso del cable y las cabinas y transmitirlo al terreno a través de las cimentaciones. Los pilares están constituidos por una combinación de tubos de acero de diferentes diámetros y espesores. Su altura varía para cada soporte en función de las condiciones del terreno, aunque como simplificación, en este caso, se toma la misma para todos los pilares.

El proyecto se desarrolla para un teleférico de movimiento unidireccional, por lo que las cabinas circulan a ambos lados del pilar pero con sentido inverso.



Ilustración 9. Pilar de una instalación de teleférico

- BALANCINES

Situados en lo alto del pilar, los balancines están compuestos por una disposición de poleas cuyo número varía en función de la carga a soportar por el cable. Estos elementos tienen como función dirigir el cable portante a lo largo de la línea.



Ilustración 10. Balancín de un pilar de teleférico

- CABLES

Son los elementos principales de la instalación y se encargan de transmitir el movimiento y soportar las cargas mecánicas. Existen 3 tipos de cables según las especificaciones de la instalación:

- Cable portante: soporta la carga.
- Cable tractor: transmite la fuerza para el movimiento.
- Cable transportador: combina ambas funciones (soporta la carga y transmite el movimiento) en un solo cable.

El modelo de instalación con el que se llevan a cabo todos los cálculos del programa cuenta con un único cable transportador que, en función del tipo de carga a la que se vea sometido, tomará la configuración de catenaria o la de un cable sometido a cargas puntuales.

A continuación, se muestran las dos posibles configuraciones del cable: catenaria, cuando el cable soporta únicamente su peso propio; cable sometido a cargas puntuales, para el caso de las cabinas con o sin personas en su interior.

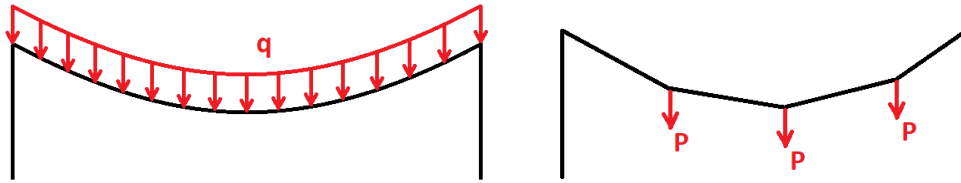


Ilustración 11. Configuraciones posibles del cable

Los cables destinados a los sistemas de transporte por cable deben cumplir una serie de requisitos, entre los cuales se encuentran la capacidad de resistir las cargas y minimizar la elongación, de manera que se pueda prolongar su vida útil en condiciones de máxima seguridad.

Para garantizar estas condiciones, los cables de teleférico se componen de las siguientes partes:

- Alambres de acero: son los elementos encargados de resistir los esfuerzos de tracción aportando, además, flexibilidad lateral al cable.
- Cordones: son el núcleo alrededor del cual están dispuestos helicoidalmente los alambres y que, a su vez, se enrollan alrededor del alma formando el cable.
- Alma: es el soporte del conjunto, generalmente de carácter metálico, cuya función es impedir que se pierda la forma helicoidal de los cordones en condiciones de carga máxima.

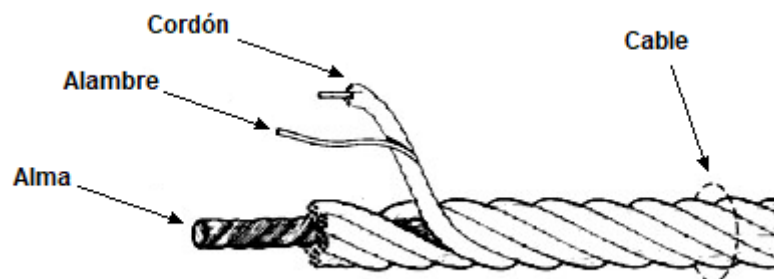


Ilustración 12. Composición del cable

- PINZAS

Es el elemento de unión entre el vehículo y el cable. Existen dos tipos de pinzas según las necesidades específicas de cada sistema:

- Pinza fija: la fijación entre cabina y cable es permanente.
- Pinza desembragable: el vehículo se acopla al cable cuando sale de la estación inicial y se libera cuando llega a la siguiente estación.

SIMPLIFICACIONES DE CÁLCULO

Para facilitar los cálculos que se realizan en el programa se han adoptado una serie de simplificaciones:

- Todos los pilares se consideran idénticos, es decir, poseen la misma altura, sección y material.
- En el cálculo de las tensiones del cable se supone que las cabinas únicamente suben, aunque en realidad suben y bajan paralelamente. Al obtenerse dichas tensiones para distintas posiciones de las cabinas, se considera que el cable de bajada es simétrico al de subida. Este hecho se tiene en cuenta en el cálculo de los esfuerzos en los pilares, ya que soportan cargas a ambos lados.
- No se estudia el efecto de las cargas externas, como puede ser la acción del viento, ni se tienen en cuenta posibles causas puntuales, como, por ejemplo, el frenado repentino del sistema.
- No se considera el fenómeno de fatiga.

NORMATIVA

El *REGLAMENTO (UE) 2016/424 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 9 de marzo de 2016 relativo a las instalaciones de transporte por cable y por el que se deroga la Directiva 2000/9/CE* recoge las normas sobre la regulación de las instalaciones de transporte de personas por cable.

El objeto del Reglamento es establecer las normas relativas al diseño, construcción y puesta en servicio de instalaciones nuevas de transporte por cable.

El Anexo II de dicho Reglamento define los requisitos esenciales que deben cumplir las instalaciones de transporte por cable. Uno de los aspectos más importantes para el presente trabajo, que se recoge en dicho anexo, es el requisito relativo a las dimensiones: la instalación, los subsistemas y todos sus componentes de seguridad deberán diseñarse y construirse de modo que resistan con seguridad todos los esfuerzos.

3.2. CÁLCULOS DEL PROYECTO

El análisis de la capacidad de resistencia de la instalación de teleférico se desarrolla en unas hojas de cálculo mediante el software Excel. En ellas aparecen una serie de datos, que deben ser introducidos por el usuario, a partir de los cuales la aplicación realiza unos cálculos previamente programados.

El Excel se divide en 4 hojas de cálculo: Datos, Cables, Tensiones, Resultados. Las dos primeras recogen los parámetros que se han de utilizar en los cálculos. Por otro lado, las dos últimas están destinadas a la obtención de las tensiones a soportar por el cable y los esfuerzos que se transmiten a los pilares.

Antes de proceder a la explicación detallada de las distintas hojas de cálculo, se ha de conocer el modo en el que han sido tratados los distintos valores en el programa. La clasificación se realiza por colores de relleno de las celdas, en base al tipo de datos y resultados.

En la tabla siguiente se muestran las subdivisiones de datos que se han tenido en cuenta, así como el color empleado para cada una de ellas a lo largo del predimensionamiento.

Tabla 1. Colores de relleno

TABLA 1.0. COLORES DE RELLENO	
	Datos a introducir
	Datos calculados
	Datos del fabricante
	Datos de SOLVER

Entre todos los datos que se encuentran en la comprobación del predimensionamiento, los únicos que han de ser introducidos por el usuario son aquellos cuyas celdas se rellenan con el color verde. El resto de datos, ya sean calculados o tabulados por el fabricante, son aportados por el programa de Excel.

Los datos de SOLVER son valores aportados por Excel que permiten que se cumpla una restricción dependiente de dichos valores.

Cabe destacar que el desarrollo que se presenta del predimensionamiento de la instalación se ha realizado para un ejemplo concreto, de manera que resulte más sencilla la comprensión del mismo.

A continuación se explica en profundidad el contenido de cada hoja de cálculo.

DATOS

En la primera hoja de Excel el usuario debe introducir todos los datos de entrada, de los cuales van a depender los cálculos de la instalación y, por tanto, el predimensionamiento de la misma.

Los datos de la localización relativa de las estaciones no son necesarios, puesto que la estación inferior se toma por defecto como origen de coordenadas y la estación superior se sitúa en el último punto del terreno considerado, que se obtiene a partir de otros datos introducidos. Para la altura de las estaciones se asigna, por simplificar los cálculos, la misma que se elige para los pilares.

A continuación se explican los datos necesarios de cada una de las tablas a rellenar por el usuario y se detallan, en los casos que lo precisen, algunos valores de referencia para facilitar la introducción de los mismos.

- DATOS DE LOS PILARES

Los pilares son uno de los elementos más importantes de la instalación, ya que deben soportar las cargas transmitidas por los cables. Para calcular los esfuerzos internos provocados en la sección más comprometida de cada pilar es necesario conocer su altura h y la distancia existente entre los dos cables paralelos d . Dichas dimensiones se consideran idénticas para todos los pilares de la instalación.

A continuación se muestran las dimensiones mencionadas de manera simplificada en la siguiente ilustración:

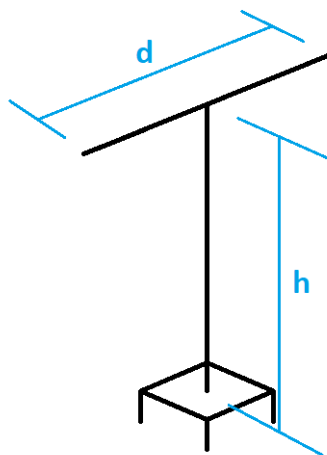


Ilustración 13. Dimensiones del pilar simplificado

Por otro lado, las tensiones causadas por los esfuerzos internos se han de comparar con la tensión admisible del pilar para comprobar su capacidad de resistencia. En este caso, como el material empleado en los perfiles tubulares de los pilares se ha supuesto que es acero, la tensión admisible es de 275 MPa. Para trabajar del lado de la seguridad, se ha de escoger un coeficiente de seguridad de tal manera, que las tensiones sean mayoradas antes de compararse con la admisible.

La tabla a rellenar en el Excel se muestra a continuación para el ejemplo concreto que se va a estudiar:

Tabla 2. Datos de los pilares

TABLA 1.1. DATOS DE LOS PILARES	
Altura de los pilares: h [m]	12
Distancia entre cables: d [m]	5
Tensión admisible: σ_{adm} [Mpa]	275
Coeficiente de seguridad: n []	1,5

- **DATOS DE LAS CABINAS**

El sistema de teleférico está sometido a diferentes tipos de cargas, entre los cuales se encuentra el peso de las cabinas, con o sin pasajeros en su interior, que se considera una carga puntual.

Para la evaluación de dichas cargas a lo largo de los distintos tramos de la instalación es necesario conocer el número máximo de cabinas por tramo que, en este caso, viene predeterminado por el programa, y la distancia horizontal entre las cabinas. Estos datos se han de considerar simultáneamente con los requisitos del terreno, ya que la distancia entre cabinas medida en la horizontal es siempre la misma. Por lo tanto, si la distancia entre pilares de un tramo es lo suficientemente grande como para que quepan más cabinas que el valor máximo predeterminado, el programa no considerará el excedente de cabinas.

Además, se han de introducir los valores de los diferentes pesos que intervienen en el sistema, es decir, el peso de una cabina vacía y el peso medio de una persona. Como ya se ha mencionado previamente, existen diferentes tamaños de cabinas según el tipo de teleférico, con lo que su capacidad también varía (para un mismo teleférico se suponen todas las cabinas idénticas). El programa ofrece la posibilidad de elegir una capacidad de cabina entre 3 opciones, que son: 8, 12 y 16 personas por cabina.

A continuación se presenta la tabla con unos valores concretos para el ejemplo escogido:

Tabla 3. Datos de las cabinas

TABLA 1.2. DATOS DE LAS CABINAS	
Número máximo de cabinas por tramo: []	5
Distancia horizontal entre cabinas: Lc [m]	20
Peso de una cabina: Mc [kg]	800
Peso medio de una persona: Mp [kg]	75
Capacidad de las cabinas:	<input checked="" type="radio"/> 8 personas/cabina <input type="radio"/> 12 personas/cabina <input type="radio"/> 16 personas/cabina

- DATOS DEL CABLE

Para la comprobación del correcto predimensionamiento de la instalación se emplea un único cable transportador de la empresa argentina IPH, específico para transporte por cable y, en concreto, para telecabinas.

Uno de los datos a introducir es el diámetro del cable, que se elige mediante un desplegable en el que aparecen los diámetros normalizados para ese tipo de cable. Una vez seleccionado el mismo, el propio programa aporta su masa aproximada y su carga mínima de rotura.

Por último, se ha de considerar el hecho de que la longitud real del cable difiere en cierta medida de la longitud teórica, es decir, la que el cable tendría si su configuración fuera la de una recta entre los apoyos. Esta relación se conoce con el nombre de ratio y se trata de un valor adimensional.

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Longitud real del cable}}{\text{Longitud teórica del cable}}$$

Para el caso concreto que se va a analizar, la tabla a rellenar es la siguiente:

Tabla 4. Datos del cable

TABLA 1.3. DATOS DEL CABLE	
Tipo de cable	IPH GP CW
Diámetro: Ø [mm]	24,00 ▼
Masa aproximada: q [kg/m]	2,27
Carga mínima de rotura [kN]	440
Ratio []	1,05

- **DATOS DEL TERRENO**

El terreno sobre el que se va a situar la instalación se ha de evaluar por tramos. El programa ha sido elaborado para una instalación compuesta, como máximo, por 15 pilares y 16 tramos. A excepción del primer y último tramo, todos los demás están delimitados por un pilar a cada lado. Los tramos 0-1 y 15-16 corresponden a la separación entre la estación inferior y el primer pilar y entre el penúltimo pilar y la estación superior, respectivamente.

Los datos del terreno que necesita el programa son la distancia horizontal ocupada por cada tramo y su pendiente expresada en grados. De esta manera, se obtiene la distancia vertical de cada tramo y, con ella, todas las coordenadas necesarias para situar los pilares.

Para el ejemplo concreto que se va a estudiar, los datos del terreno se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Datos del terreno

TABLA 1.4. DATOS DEL TERRENO				
Tramo		Distancia horizontal [m]	Pendiente [°]	Distancia vertical [m]
0	1	50	16	14,337
1	2	30	10	5,290
2	3	20	20	7,279
3	4	40	16	11,470
4	5	65	10	11,461
5	6	45	18	14,621
6	7	50	20	18,199
7	8	30	16	8,602
8	9	20	15	5,359
9	10	40	18	12,997
10	11	65	13	15,006
11	12	45	16	12,904
12	13	50	15	13,397
13	14	30	18	9,748
14	15	20	20	7,279
15	16	40	16	11,470

En el momento en el que han sido introducidos todos los datos mencionados, el programa dispone de toda la información necesaria para realizar el análisis de resistencia y, con ello, determinar si la sección propuesta para los pilares es adecuada.

Se muestra además, en esta primera hoja de cálculo, una tabla que recoge las coordenadas tanto del terreno como de los pilares. Estos últimos se sitúan en los extremos de cada tramo, con lo que su coordenada vertical superior es la correspondiente al terreno en cada punto sumada a la altura de los pilares.

$$\begin{cases} x_{pilar} = x_{terreno} \\ y_{pilar} = y_{terreno} + h_{pilar} \end{cases}$$

Tabla 6. Coordenadas de los pilares

TABLA 1.5. COORDENADAS DE LOS PILARES	Pilar	x pilar [m]	y terreno [m]	y pilar [m]
Estación inferior	0	0	0,000	12,000
	1	50	14,337	26,337
	2	80	19,627	31,627
	3	100	26,906	38,906
	4	140	38,376	50,376
	5	205	49,838	61,838
	6	250	64,459	76,459
	7	300	82,657	94,657
	8	330	91,260	103,260
	9	350	96,619	108,619
	10	390	109,616	121,616
	11	455	124,622	136,622
	12	500	137,526	149,526
	13	550	150,923	162,923
	14	580	160,671	172,671
	15	600	167,950	179,950
Estación superior	16	640	179,420	191,420

Por último, se llevan los datos de la tabla a un gráfico que ofrece una imagen simplificada de la instalación, en el que se muestra el terreno, todos los pilares del sistema y el cable teórico (configuración recta entre los apoyos).

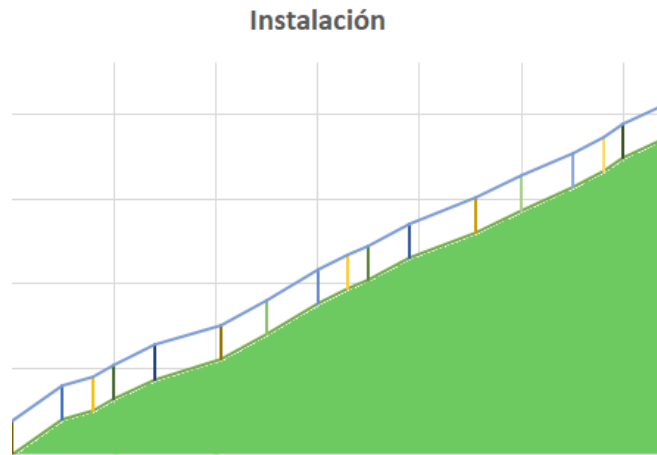


Gráfico 1. Vista simplificada de la instalación

CABLES

La segunda hoja de Excel contiene únicamente una tabla con los datos correspondientes al tipo de cable elegido para la instalación. Los valores que se recogen en la misma han sido extraídos del catálogo de cables de acero para sistemas de transporte por cable de la empresa fabricante de dicho cable, IPH.

El cable escogido es el IPH GP CW, que cuenta con las siguientes ventajas y características:

- Está compuesto por cordones compactados que incrementan tanto la vida del equipo como la del propio cable.
- Maximiza las propiedades de flexibilidad, resistencia a la abrasión y mínima elongación.
- El arrollamiento de los componentes del cable es de tipo torsión Lang, es decir, los alambres se tuercen en el cordón en la misma dirección que los cordones en el cable.

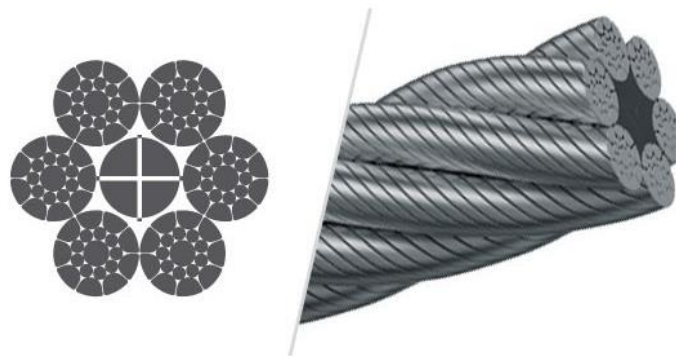


Ilustración 14. Cable IPH GP CW

A continuación se muestra la tabla mencionada, con los valores de masa aproximada y carga mínima de rotura correspondientes a los distintos diámetros del cable.

Tabla 7. Información del cable

Tipo de cable	Código	Diámetro [mm]	Masa aproximada [kg/m]	Carga mínima de rotura [kN]
IPH GP CW	1	20,00	1,58	306
	2	22,00	1,91	370
	3	24,00	2,27	440
	4	26,00	2,67	517
	5	28,00	3,09	599
	6	30,00	3,55	688
	7	32,00	4,04	782
	8	34,00	4,56	883
	9	36,00	5,11	990
	10	38,00	5,7	1100
	11	40,00	6,31	1220
	12	42,00	6,96	1340
	13	44,00	7,64	1480
	14	48,00	9,09	1760
	15	52,00	10,67	2070
	16	56,00	12,37	2390
	17	60,00	14,2	2750

TENSIONES

Un paso fundamental para calcular los esfuerzos internos de los pilares es obtener las tensiones del cable que se transmiten a los mismos. Esta tercera hoja de Excel está dedicada a la determinación de dichas tensiones producidas por los distintos tipos de carga.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el cable de teleférico está sometido a dos tipos de carga, que son el peso propio del cable y el peso de las cabinas con o sin pasajeros en el interior.

Antes de comenzar con el estudio de las tensiones, se han de obtener para los distintos tramos de la instalación las coordenadas x e y de los pilares que los delimitan. Dichas coordenadas se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 8. Coordenadas de los pilares extremos de cada tramo

Tramo	$x(i-1)$	$x(i)$	$y(i-1)$	$y(i)$
1	0	50	12	26,337
2	50	80	26,337	31,627
3	80	100	31,627	38,906
4	100	140	38,906	50,376
5	140	205	50,376	61,838
6	205	250	61,838	76,459
7	250	300	76,459	94,657
8	300	330	94,657	103,260
9	330	350	103,260	108,619
10	350	390	108,619	121,616
11	390	455	121,616	136,622
12	455	500	136,622	149,526
13	500	550	149,526	162,923
14	550	580	162,923	172,671
15	580	600	172,671	179,950
16	600	640	179,950	191,420

En el desarrollo de esta segunda hoja de Excel se adopta la simplificación de considerar únicamente la subida de las cabinas, es decir, se omite el cable de bajada, pero se tendrá en cuenta más adelante.

TENSIONES DEBIDAS AL PESO PROPIO DEL CABLE (CATENARIA)

En primer lugar, se realiza el análisis del cable de teleférico sometido exclusivamente a su propio peso, cuya figura de equilibrio recibe el nombre de catenaria. Esta configuración del cable se obtiene mediante integración y eligiendo, por motivos de simplicidad, el origen de coordenadas a una distancia T_0/q por debajo del punto inferior de la curva, siendo T_0 la tensión horizontal del cable y q el peso por unidad de longitud del mismo. Dicha distancia se conoce por el nombre de parámetro de la catenaria α .

Como el sistema de coordenadas de la instalación no se corresponde con el mencionado para la curva de catenaria, para cada tramo se ha de realizar un cambio de coordenadas del sistema (x,y) al (x',y') .

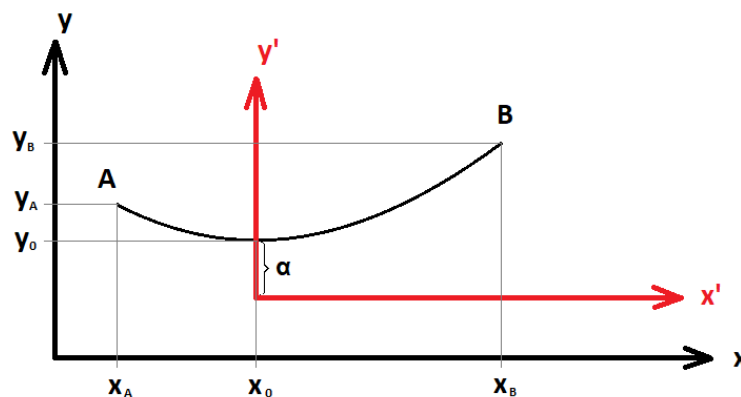


Ilustración 15. Cambio de coordenadas de la curva de catenaria

Siendo A y B los puntos extremos superiores de los pilares inicial y final de cada tramo respectivamente y x_0 el punto más bajo de la curva en el sistema inicial (x,y) , se tiene:

$$x'_A = x_A - x_0$$

$$x'_B = x_B - x_0$$

Las coordenadas verticales en el nuevo sistema se pueden calcular mediante la ecuación final de la catenaria como:

$$y'_A = \alpha \operatorname{Ch}\left(\frac{x'_A}{\alpha}\right) = \alpha \operatorname{Ch}\left(\frac{x_A - x_0}{\alpha}\right)$$

$$y'_B = \alpha \operatorname{Ch}\left(\frac{x'_B}{\alpha}\right) = \alpha \operatorname{Ch}\left(\frac{x_B - x_0}{\alpha}\right)$$

Como x_0 y α son desconocidos, se necesitan dos ecuaciones para poder resolver el sistema y obtener las dos incógnitas.

La primera ecuación se consigue igualando la diferencia de altura calculada a partir de las ecuaciones de la catenaria con la diferencia de altura real, siendo estas las siguientes:

$$\Delta y_{real} = y_B - y_A$$

$$\Delta y'_{calculada} = y'_B - y'_A = \alpha \left(Ch\left(\frac{x_B - x_0}{\alpha}\right) - Ch\left(\frac{x_A - x_0}{\alpha}\right) \right)$$

La segunda ecuación se obtiene al igualar la longitud del cable s_{AB} calculada con la longitud real:

$$s_{AB\ real} = Ratio * Longitud\ de\ la\ recta\ AB = Ratio * \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

$$s_{AB\ calculada} = s_B - s_A = \alpha \left(Sh\left(\frac{x_B - x_0}{\alpha}\right) - Sh\left(\frac{x_A - x_0}{\alpha}\right) \right)$$

Una vez planteadas las dos ecuaciones, se procede a la resolución de las mismas mediante el programa de complemento de Excel denominado SOLVER, que calcula los valores de x_0 y α que hacen que se cumplan las dos ecuaciones. Como dicho programa permite únicamente una ecuación de entrada, se expresan las dos igualdades anteriores en una ecuación:

$$\sqrt{(\Delta y_{real} - \Delta y'_{calculada})^2 + (s_{AB\ real} - s_{AB\ calculada})^2} = 0$$

Como se trata de una suma de dos cantidades positivas, para que se cumpla la ecuación ambas expresiones entre paréntesis deben valer cero.

A continuación se muestran los resultados de los cálculos explicados en un gráfico para un tramo concreto de la instalación estudiada. En él se presenta la configuración del cable debida al peso propio del mismo (catenaria), observándose claramente la posición del punto más bajo (x_0, y_0).

La escala empleada en los ejes del gráfico no es la misma para ambos.

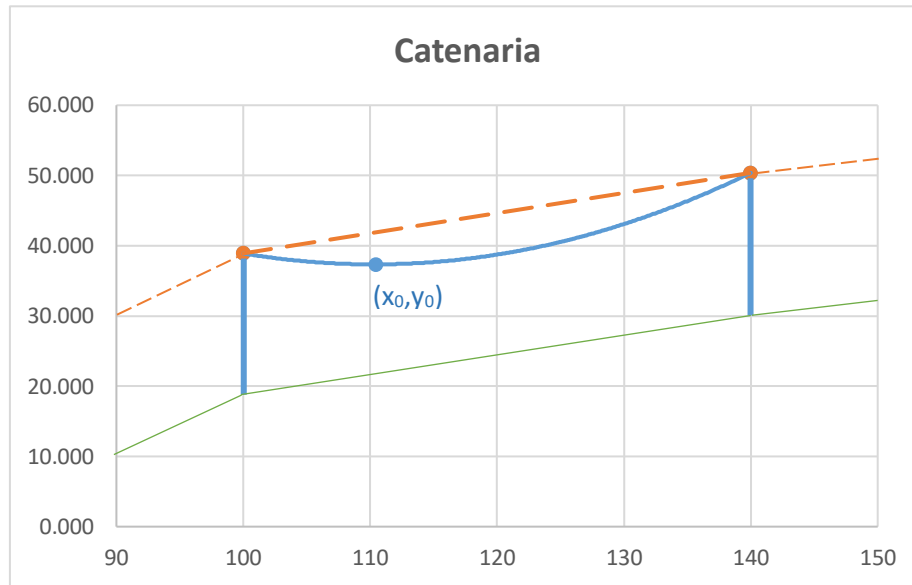


Gráfico 2. Configuración del cable debida a su propio peso (tramo 4)

Una vez conocidos estos valores se procede al cálculo de las tensiones debidas al peso propio del cable. La magnitud y la dirección de las tensiones en los puntos A y B se pueden obtener de la siguiente forma:

$$\begin{cases} T_A = q * y'_A \\ \theta_A = \arctg\left(\frac{s_A}{\alpha}\right) = \arctg\left(Sh\left(\frac{x'_A}{\alpha}\right)\right) \end{cases}
 \quad
 \begin{cases} T_B = q * y'_B \\ \theta_B = \arctg\left(\frac{s_B}{\alpha}\right) = \arctg\left(Sh\left(\frac{x'_B}{\alpha}\right)\right) \end{cases}$$

Por otro lado, la tensión horizontal, que es la misma en todos los puntos del cable de un mismo tramo, se puede calcular directamente como:

$$T_0 = q * \alpha$$

La proyección vertical de las tensiones se obtiene fácilmente a partir de las tensiones totales en sus puntos correspondientes, de la siguiente manera:

$$T_{Ay} = -T_A \sin(\theta_A) \quad T_{By} = T_B \sin(\theta_B)$$

La componente T_{Ay} lleva un signo negativo, ya que para un ángulo θ_A negativo, la tensión vertical en ese punto será hacia arriba, es decir, positiva.

Al ser éstos cálculos que se han de repetir para cada tramo, resulta interesante programar una macro que realice el cálculo de las tensiones para cada tramo de manera automática, pulsando un único botón. Dicho botón se encuentra en el Excel con el nombre de “Catenaria” y, con él, se han calculado todas las tensiones que aparecen en la siguiente tabla expresadas en Newton:

Tabla 9. Tensiones del cable debidas a su peso propio

	T ₀	T _{Ay}	T _{By}	T _A	T _B
1	985,86	295,99	920,23	1029,33	1348,61
2	605,42	238,77	473,51	650,80	768,60
3	385,85	93,13	404,52	396,93	559,03
4	788,69	236,79	736,18	823,47	1078,89
5	1311,74	517,34	1025,95	1410,07	1665,30
6	878,35	237,46	868,87	909,88	1235,48
7	964,63	232,83	1011,31	992,33	1397,59
8	591,57	177,57	552,15	617,65	809,21
9	396,31	124,92	359,20	415,53	534,87
10	780,92	211,01	772,38	808,93	1098,36
11	1298,36	449,74	1110,08	1374,05	1708,22
12	887,23	266,40	828,20	926,36	1213,71
13	990,62	312,35	897,98	1038,69	1337,04
14	585,36	158,39	579,19	606,41	823,47
15	386,14	93,01	404,61	397,19	559,30
16	788,98	236,68	736,26	823,72	1079,15

TENSIONES DEBIDAS AL PESO DE LAS CABINAS VACÍAS

Los pesos de las cabinas se consideran cargas puntuales verticales, que van a ser analizadas para distintas posiciones de la cabina inicial en cada tramo.

El parámetro de entrada para el estudio de estas tensiones es la coordenada horizontal de la primera cabina del tramo relativa al pilar A, que no debe ser mayor que la distancia horizontal entre cabinas que se introduce en la primera hoja de Excel “Datos”.

La posición absoluta de dicha cabina se obtiene, por lo tanto, de la siguiente forma:

$$x_{c1} = x_A + x_{rel(c1-A)}$$

La restricción mencionada se debe principalmente a dos motivos.

Por un lado, escoger un valor mayor a la distancia entre cabinas supondría que una nueva cabina entra en juego, saliendo otra de ellas, a su vez, del tramo considerado. Por lo tanto, al estar todas las cabinas vacías y ser el valor de sus pesos el mismo, la situación a analizar sería idéntica a una de las recogidas introduciendo únicamente valores de distancia al primer pilar entre cero y la distancia horizontal entre cabinas.

El segundo motivo es que al ser el parámetro de entrada la posición de la primera cabina, elegir una posición de la misma superior a la distancia horizontal entre cabinas no tendría en cuenta la aparición de un nuevo vehículo en el tramo, ya que entonces la cabina inicial sería otra diferente a la considerada.

El número máximo de cabinas por tramo es 5, como se ha especificado anteriormente. La posición en el eje x de todas las cabinas del tramo, a excepción de la cabina inicial, se calcula de la siguiente forma, siendo L_c la distancia horizontal entre cabinas:

$$x_{c(i+1)} = x_{ci} + L_c$$

La expresión anterior es válida siempre y cuando la coordenada horizontal de las cabinas sea menor que la del pilar B, ya que en caso contrario se encontrarán fuera del tramo en cuestión. El programa se encarga de gestionar este problema, asignando a las cabinas que sobrepasan el pilar B un valor de x igual al de la última cabina que se encuentra dentro del tramo, de manera que cuando esto ocurre, el peso de esas cabinas excedentes se considera nulo.

Al igual que ocurría en el apartado anterior, en el que se calculaban las tensiones debidas al peso propio del cable, la incógnita de la que dependerán todas las ecuaciones se obtiene empleando SOLVER. Dicha incógnita es, en este caso, el ángulo inicial θ_1 que se muestra en la siguiente ilustración:

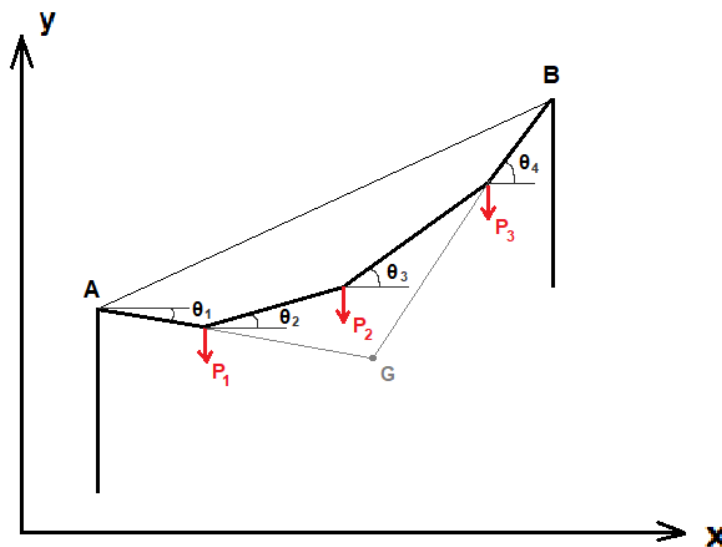


Ilustración 16. Tramo de teleférico con 3 cabinas

A continuación se explica el procedimiento seguido para calcular las tensiones deseadas.

El punto G que aparece en la ilustración corresponde al centro de gravedad del conjunto de cabinas que se encuentran dentro del tramo a analizar. Su interés reside en el hecho de que respecto a G únicamente crean momento los pesos de las cabinas. La coordenada horizontal de dicho punto puede obtenerse de manera general para el número máximo de cabinas por tramo como:

$$x_G = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i * x_{ci}}{\sum_{i=1}^5 P_i}$$

La coordenada vertical de G puede expresarse en función de la incógnita del sistema de la siguiente manera:

$$y_G = y_A + (x_G - x_A) * tg(\theta_1)$$

Con las coordenadas del punto G y el punto superior del pilar B se puede despejar el valor del último ángulo, que para el caso de 5 cabinas por tramo es el siguiente:

$$\theta_6 = arctg\left(\frac{y_B - y_G}{x_B - x_G}\right)$$

Planteando el equilibrio de fuerzas del sistema completo (tramo que se está considerando), se tienen, por un lado, las tensiones en los puntos extremos y, por otro, los pesos de las cabinas.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0 \quad T_B \cos(\theta_6) - T_A \cos(\theta_1) = 0 \\ \sum F_y = 0 \quad T_B \sin(\theta_6) - T_A \sin(\theta_1) - \sum_{i=1}^5 P_i = 0 \end{array} \right.$$

De las dos ecuaciones anteriores se obtienen las tensiones que se transmiten a los pilares T_A y T_B:

$$T_A = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{\cos(\theta_1) * tg(\theta_6) - \sin(\theta_1)}$$

$$T_B = T_A \frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\theta_6)}$$

El siguiente paso es analizar el equilibrio de fuerzas en cada nudo para obtener las expresiones de los restantes ángulos que intervienen en el tramo y, de esa manera, calcular la posición en el eje y para cada cabina. A continuación, se muestra el ejemplo para el nudo de la primera cabina:

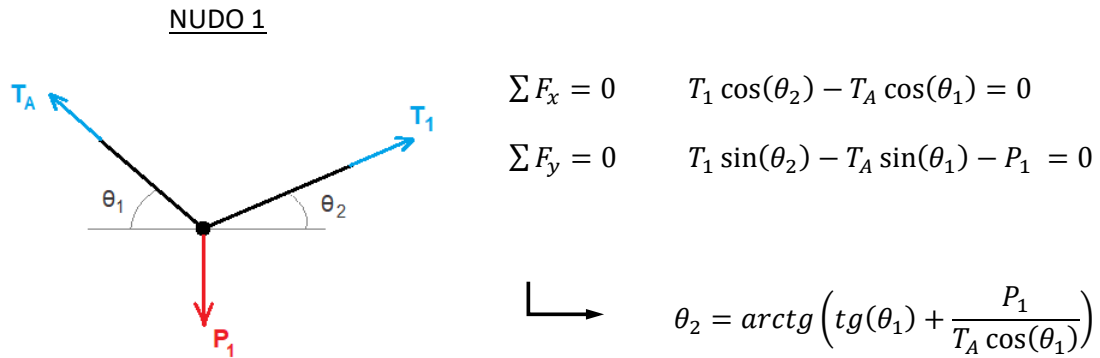


Ilustración 17. Equilibrio del nudo 1

Generalizando el cálculo para el resto de ángulos intermedios, se obtiene la siguiente expresión:

$$\theta_{i+1} = \arctg \left(\operatorname{tg}(\theta_i) + \frac{P_i}{T_A \cos(\theta_i)} \right)$$

Una vez calculados todos los ángulos y antes de proceder a descomponer las tensiones en las direcciones horizontal y vertical, se obtienen las coordenadas verticales de las cabinas para presentar un gráfico orientativo de la configuración del cable.

$$y_{c1} = y_A + (x_{c1} - x_A) * \operatorname{tg}(\theta_1)$$

$$y_{c2} = y_{c1} + (x_{c2} - x_{c1}) * \operatorname{tg}(\theta_2)$$

$$y_{c3} = y_{c2} + (x_{c3} - x_{c2}) * \operatorname{tg}(\theta_3)$$

$$y_{c4} = y_{c3} + (x_{c4} - x_{c3}) * \operatorname{tg}(\theta_4)$$

$$y_{c5} = y_B - (x_B - x_{c5}) * \operatorname{tg}(\theta_6)$$

Por último, se obtienen las tensiones proyectadas en las direcciones de los ejes del sistema, que serán las que se empleen posteriormente para el cálculo de los esfuerzos internos de los pilares.

$$T_0 = T_A \cos(\theta_1)$$

$$T_{Ay} = -T_A \sin(\theta_1)$$

$$T_{By} = T_B \sin(\theta_6)$$

Como se comentaba al inicio del desarrollo, todas las expresiones que se han obtenido dependen de la incógnita del sistema θ_1 . Para poder calcular su valor es necesario disponer de una ecuación a la que se llega igualando la longitud real total del cable y la suma de longitudes parciales.

$$L_{total} = Ratio * Longitud\ de\ la\ recta\ AB = Ratio * \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

$$L_1 = \sqrt{(x_{c1} - x_A)^2 + (y_{c1} - y_A)^2}$$

$$L_2 = \sqrt{(x_{c2} - x_{c1})^2 + (y_{c2} - y_{c1})^2}$$

.

.

.

$$L_6 = \sqrt{(x_B - x_{c5})^2 + (y_B - y_{c5})^2}$$

$$L_{total} = \sum_{i=1}^6 L_i$$

A continuación se presenta en un gráfico la configuración del cable debida al peso de las cabinas vacías (en naranja) en el tramo 4, para una posición relativa de la cabina inicial respecto del pilar izquierdo de 5 metros. Se puede observar, como para el caso escogido se encuentran únicamente 2 cabinas dentro del tramo.

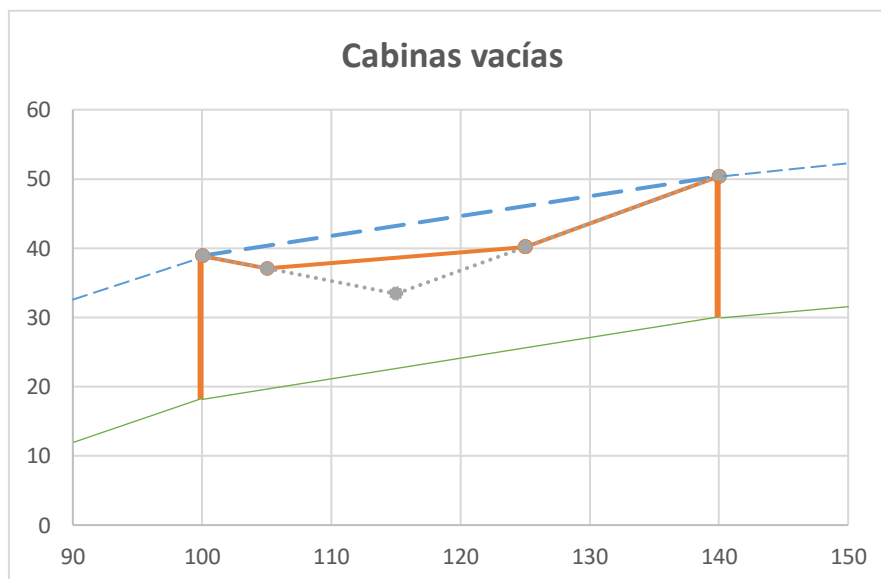


Gráfico 3. Configuración del cable debida al peso de las cabinas vacías (tramo 4)

Las tensiones obtenidas para la posición de la cabina inicial considerada se muestran en la siguiente tabla junto con las correspondientes a otras localizaciones de la misma dentro del tramo 4, expresadas todas en kilogramos:

Tabla 10. Tensiones del cable debidas al peso de las cabinas vacías (tramo 4)

Tramo 4					
$\Delta x_{(c1-A)}$	T_A	T_B	T_0	T_{Ay}	T_{By}
0	1447,72	1370,86	1158,87	867,70	732,30
5	1631,44	1851,33	1532,07	560,69	1039,31
10	1658,59	2059,52	1624,58	334,16	1265,84
15	1511,26	2074,10	1501,74	169,38	1430,62
20	1160,85	1370,86	1158,87	67,70	732,30

Los resultados de las tensiones de los tramos restantes se presentan en una tabla como la anterior.

TENSIONES DEBIDAS AL PESO DE LAS CABINAS LLENAS

Al igual que los de las cabinas vacías, los pesos de las cabinas llenas de personas se consideran cargas verticales puntuales. El procedimiento de cálculo para la obtención de las tensiones en este caso es idéntico al del apartado anterior.

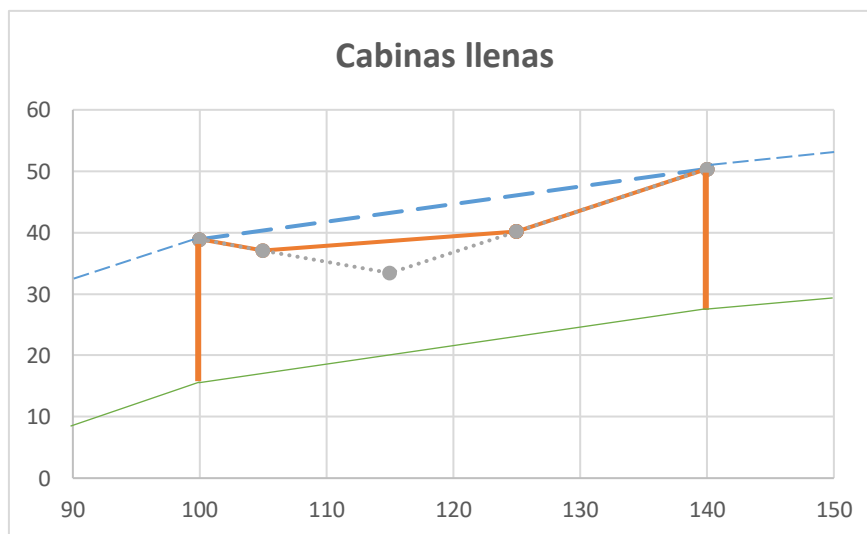


Gráfico 4. Configuración del cable debida al peso de las cabinas llenas (tramo 4)

La tabla de tensiones obtenida para el tramo considerado es idéntica a la del caso de las cabinas vacías:

Tabla 11. Tensiones del cable debidas al peso de las cabinas llenas (tramo 4)

Tramo 4					
$\Delta x_{(c1-A)}$	T_A	T_B	T_0	T_{Ay}	T_{By}
0	2533,50	2399,00	2028,02	1518,47	1281,53
5	2855,03	3239,82	2681,12	981,20	1818,80
10	2902,53	3604,15	2843,01	584,78	2215,22
15	2644,71	3629,67	2628,04	296,42	2503,58
20	2031,48	2399,00	2028,02	118,47	1281,53

Una vez obtenidas todas las tablas de las tensiones debidas a los pesos puntuales de las cabinas, tanto vacías como llenas para distintas posiciones de las mismas en cada tramo, se han de extraer aquellos valores que pueden crear las situaciones más desfavorables en los pilares.

Resulta lógico que dichas situaciones se den para combinaciones de cargas máximas y mínimas en cada pilar, dándose las cargas máximas en los casos de las cabinas completamente llenas y las mínimas en los casos de las cabinas vacías.

Por último, a los valores máximos y mínimos de las tensiones de cada tramo se les ha de sumar la tensión provocada por el peso propio del cable. De esta manera, se puede comprobar, además, si el cable escogido es capaz de soportar las cargas o si, por el contrario, se supera su carga mínima de rotura, en cuyo caso se deberá aumentar el diámetro del mismo.

RESULTADOS

El último paso en el análisis de la instalación de teleférico es el estudio de la capacidad de resistencia de los pilares frente a las cargas existentes.

Como ya se ha mencionado, dichas cargas se transmiten a los pilares a través de las tensiones que causan en el cable. Al tratarse de un teleférico unidireccional, los pilares tienen forma de T, de manera que sirven como soporte para dos cables: el de subida y el de bajada. Por lo tanto, un mismo pilar estará rodeado por cuatro tramos, a la derecha e izquierda de los puntos A y B, como se muestra en la ilustración:

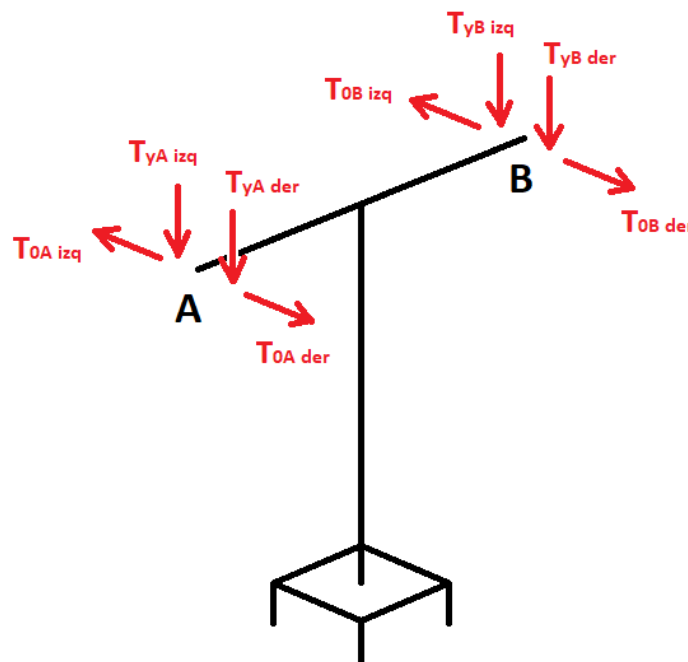


Ilustración 18. Pilar sometido a las tensiones del cable

Para conocer la capacidad de resistencia de cada pilar se han de estudiar los esfuerzos en la sección más comprometida, es decir, en la sección del empotramiento, ya que estará sometida al mayor momento. Para ello, se ha de estudiar el efecto que tienen las diferentes cargas que aparecen en la ilustración en dicha sección.

Las fuerzas verticales T_y únicamente provocan una tensión normal, creada por un esfuerzo de compresión N y un momento flector M_z . Por el contrario, las fuerzas horizontales causan tanto tensiones normales como cortantes debidas a un momento flector M_y y un esfuerzo cortante V y momento torsor M_x , respectivamente.

Para un pilar i como el de la ilustración, los valores correspondientes de las tensiones son los siguientes:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_A \text{ izquierda (pilar } i) = T_B \text{ (tramo } i) \\ T_A \text{ derecha (pilar } i) = T_A \text{ (tramo } i+1) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} T_B \text{ izquierda (pilar } i) = T_B \text{ (tramo } i) \\ T_B \text{ derecha (pilar } i) = T_A \text{ (tramo } i+1) \end{array} \right.$$

Las tensiones verticales se consideran positivas hacia abajo y las horizontales positivas hacia fuera como se muestran en la ilustración 18.

En total el pilar se ve afectado por estas 4 tensiones que, al descomponerse cada una de ellas en las direcciones vertical y horizontal, se presentan como 8.

Las tensiones en cuestión vendrán definidas por el estado de carga que se desee analizar. Al tratarse de 4 tensiones y poder tomar cada una de ellas un valor mínimo o máximo, el número total de combinaciones de las mismas será de 16. Para que el usuario pueda escoger el estado de carga a estudiar en profundidad, en esta última hoja de Excel se presenta la siguiente tabla:

Tabla 12. Estado de carga

	MAX '1' / MIN '0'
T_A izquierda	1
T_A derecha	0
T_B izquierda	1
T_B derecha	1

En ella se ha de introducir el valor 0 si se quiere que la tensión sea mínima, lo que corresponde al caso de las cabinas vacías, o 1 si se desea que sea máxima, es decir, que las cabinas estén llenas de pasajeros.

A continuación se explica el procedimiento para el cálculo de la capacidad de resistencia de un pilar, que posteriormente será generalizado para todos los pilares y estados de carga.

Considerando el estado de carga que se presenta en la tabla 12, se extraen de la hoja de Excel "Tensiones" las correspondientes a dicho estado y se presentan en una tabla junto con su descomposición en los ejes horizontal y vertical. Se escoge como ejemplo el pilar 5 que se ve sometido, en este caso, a las siguientes tensiones expresadas en Newton:

Tabla 13. Tensiones correspondientes al estado de carga elegido (pilar 5)

	Ty	T0
T _A izquierda	30495,08	40251,27
T _A derecha	781,5468	15306,27
T _B izquierda	30495,08	40251,27
T _B derecha	6156,367	29627,29

Para el análisis de la resistencia de los pilares se emplea un nuevo sistema de coordenadas en el que el eje X se corresponde con el eje del pilar, y los ejes Y y Z son perpendicular y paralelo a T₀, respectivamente:

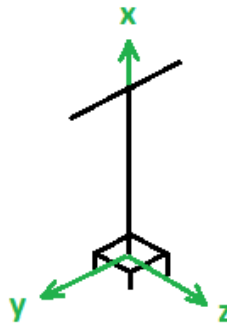


Ilustración 19. Nuevo sistema de coordenadas

El siguiente paso es el cálculo de los esfuerzos internos en la sección del empotramiento, para los cuales se emplearán las dos dimensiones del pilar introducidas al inicio: la altura h y la distancia entre cables paralelos d. Como más adelante, para el cálculo de las tensiones en dicha sección, va a ser necesario proporcionar unas dimensiones estimadas de la sección de los perfiles tubulares de los pilares, se presenta la siguiente tabla:

Tabla 14. Dimensiones de los pilares

Dimensiones de los pilares	
Altura: h [mm]	20000
Distancia entre cables: d [mm]	7000
Diámetro exterior: Ø _{ext} [mm]	450
Espesor: e [mm]	30
Diámetro interior: Ø _{int} [mm]	390
Área: A [mm ²]	39584,07
I _y = I _z [mm ⁴]	8,77E+08
I _p [mm ⁴]	1,75E+09

Los valores del área y los momentos de inercia y polar de la sección que se presentan en la tabla se obtienen a partir del diámetro exterior y el espesor del perfil tubular de los pilares:

$$\phi_{int} = \phi_{ext} - 2 * e$$

$$A = \pi \left(\left(\frac{\phi_{ext}}{2} \right)^2 - \left(\frac{\phi_{int}}{2} \right)^2 \right)$$

$$I_y = I_z = \frac{\pi}{4} \left(\left(\frac{\phi_{ext}}{2} \right)^4 - \left(\frac{\phi_{int}}{2} \right)^4 \right)$$

$$I_p = 2 * I_y$$

Las expresiones que permiten obtener los esfuerzos internos en la sección crítica (el empotramiento del pilar) a partir de las tensiones transmitidas por los cables son:

$$N = T_{yA izquierda} + T_{yA derecha} + T_{yB izquierda} + T_{yB derecha}$$

$$V = T_{0A izquierda} - T_{0A derecha} + T_{0B izquierda} - T_{0B derecha}$$

$$M_y = V * h$$

$$M_z = \frac{d}{2} \left((T_{yA izquierda} + T_{yA derecha}) - (T_{yB izquierda} + T_{yB derecha}) \right)$$

$$M_x = \frac{d}{2} \left((T_{0A izquierda} - T_{0A derecha}) - (T_{0B izquierda} - T_{0B derecha}) \right)$$

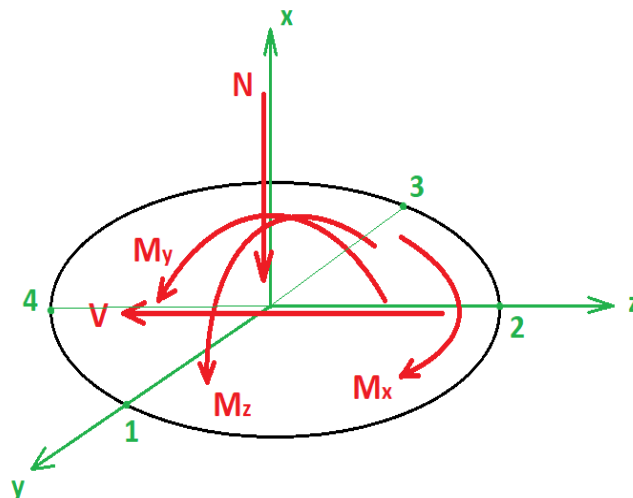


Ilustración 20. Esfuerzos de sección

En la siguiente tabla se presentan los valores de los esfuerzos internos del pilar 5 que se está estudiando provocados por las tensiones de la tabla 13, expresados en Newton y Newton·milímetro:

Tabla 15. Esfuerzos en la sección del empotramiento (pilar 5)

N	67928,0648
V	35568,97864
My	426827743,6
Mz	-13437050,1
Mx	35802538,3

El cálculo de las tensiones en la sección del empotramiento provocadas por los esfuerzos internos que transmiten las cargas se ha de realizar en los 4 puntos que aparecen marcados en la ilustración 20, ya que en cada uno de ellos dichos esfuerzos tienen diferente efecto.

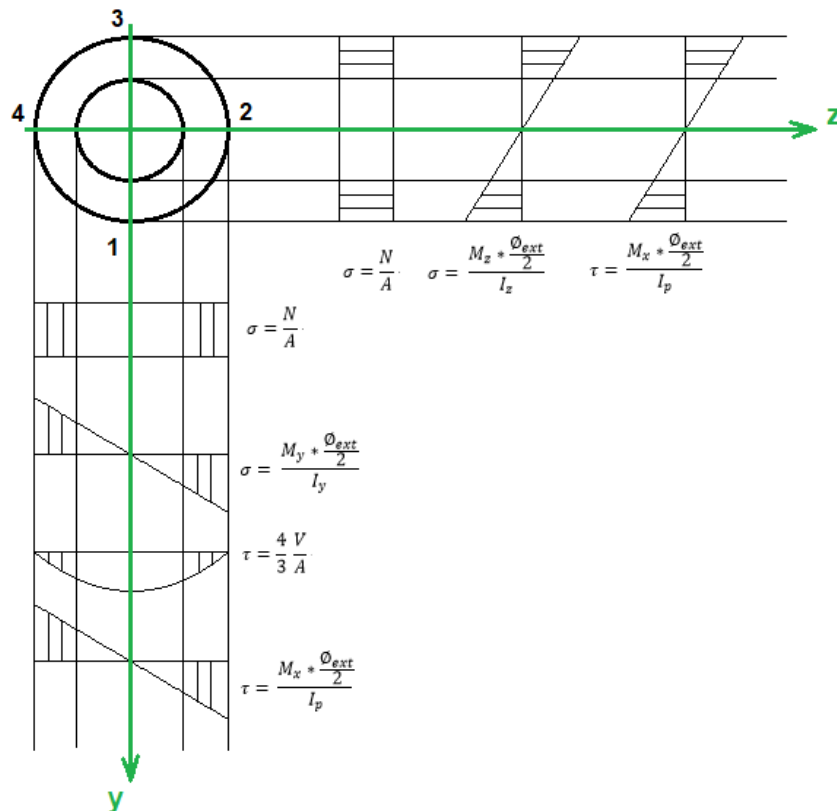


Ilustración 21. Distribución de tensiones en la sección de empotramiento

En la siguiente tabla se recogen las expresiones de las tensiones normal y cortante para los 4 puntos críticos:

Tabla 16. Expresiones de las tensiones en los puntos críticos de la sección

<p>PUNTO 1</p> $\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_z * \frac{\phi_{ext}}{2}}{I_z}$ $\tau = \frac{4 V}{3 A} + \frac{M_x * \frac{\phi_{ext}}{2}}{I_p}$	<p>PUNTO 2</p> $\sigma = \frac{N}{A} - \frac{M_y * \frac{\phi_{ext}}{2}}{I_y}$ $\tau = - \frac{M_x * \frac{\phi_{ext}}{2}}{I_p}$
<p>PUNTO 3</p> $\sigma = \frac{N}{A} - \frac{M_z * \frac{\phi_{ext}}{2}}{I_z}$ $\tau = \frac{4 V}{3 A} - \frac{M_x * \frac{\phi_{ext}}{2}}{I_p}$	<p>PUNTO 4</p> $\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_y * \frac{\phi_{ext}}{2}}{I_y}$ $\tau = \frac{M_x * \frac{\phi_{ext}}{2}}{I_p}$

Para cada uno de los puntos estudiados se obtiene la tensión de Von Mises equivalente, que es la que se va a emplear para conocer si la sección escogida resistirá las cargas:

$$\sigma_{equivalente} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2}$$

Los resultados de las tensiones que se producen en la sección del empotramiento del pilar 5 se muestran en la siguiente tabla, expresadas en megapascales:

Tabla 17. Tensiones en los puntos críticos de la sección de empotramiento (pilar 5)

	1	2	3	4
σ	-1,06292	-62,9072	2,95752	64,80185
τ	3,339454	-2,67808	-2,0167	2,678077
σ_{eq}	5,880957	63,07803	4,576915	64,96765

El último paso es calcular si la sección escogida para los pilares soporta el estado de carga analizado y su porcentaje de aprovechamiento. Como se suponen las mismas dimensiones para todos los pilares, dicho porcentaje se obtendrá en base a la sección del pilar más comprometido. Para ello se repiten los cálculos realizados para el pilar 5 en cada uno de los pilares de la instalación, utilizando los valores que se presentan en las tablas del Anexo III. Los esfuerzos obtenidos para todos los pilares se tabulan junto con las tensiones de Von Mises equivalentes en cada uno de sus puntos críticos. La repetición de los cálculos se programa en una macro, de manera que pulsando un botón se consigan automáticamente las tablas que se presentan a continuación:

Tabla 18. Esfuerzos de sección y tensiones en la secciones de empotramiento

	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8
N	71945,28	37690,52	31133,58	79474,00	67928,06	61151,86	72621,80	39222,55
V	29585,91	6562,93	24364,57	-6456,91	35568,98	10979,91	28632,43	-22539,34
My	355030907,67	78755145,41	292374841,19	-77482919,18	426827743,65	131758867,01	343589173,54	-270472083,11
Mz	-22247824,19	-8078567,56	-12681397,79	-43957324,70	-13437050,13	-22648026,72	-19035400,57	3622531,19
Mx	31459597,29	58662578,49	41303549,42	41720906,40	35802538,30	36152608,20	30548353,59	123353725,73

σ_{eq}								
1	5,540	7,841	6,308	7,544	5,881	5,640	5,214	15,295
2	52,269	13,582	43,635	13,802	63,078	19,432	50,544	44,014
3	5,340	7,590	5,127	9,516	4,577	6,061	4,911	16,708
4	54,270	14,465	44,497	11,795	64,968	21,091	52,564	42,997

$\sigma_{eq} \max$	54,270	14,465	44,497	13,802	64,968	21,091	52,564	44,014
--------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
N	37750,53	77992,29	82312,33	63197,71	66300,34	38944,41	41236,30
V	78145,83	-6242,61	36533,47	2620,23	32433,65	-10134,55	52121,68
My	937749915,77	-74911378,01	438401582,52	31442739,82	389203754,12	-121614568,35	625460205,11
Mz	-11353579,80	-41882073,73	-36217401,69	-25690667,19	-18006108,10	4549881,36	-12681397,79
Mx	40537463,12	40853494,71	27646820,84	37752802,01	30127111,46	93358956,76	41303549,42

σ_{eq}							
1	7,857	7,262	6,394	5,791	5,255	11,833	7,153
2	139,862	13,386	64,538	6,208	57,434	22,302	93,149
3	3,526	9,179	6,993	6,740	4,611	12,423	4,427
4	140,914	11,420	66,830	7,424	59,279	21,397	94,298

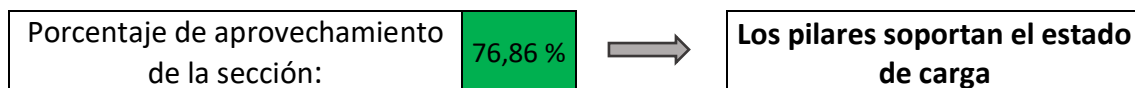
$\sigma_{eq} \max$	140,914	13,386	66,830	7,424	59,279	22,302	94,298
--------------------	---------	--------	--------	-------	--------	--------	--------

De las tensiones de Von Mises máximas de cada uno de los pilares se extrae la máxima total, que es la que se va a comparar con la tensión admisible para calcular el porcentaje de aprovechamiento de la sección de los pilares de la instalación para ese estado de carga:

$$\text{Porcentaje de aprovechamiento de la sección} = \frac{\sigma_{eq\ MAX} * CS}{\sigma_{adm}} * 100$$

Dependiendo del resultado que se obtenga de la operación anterior, aparecerá un mensaje en pantalla: si es menor de 90%, la sección de los pilares aguantará con seguridad el estado de carga analizado (celda verde); si se encuentra entre 90 y 100%, los pilares soportarán las cargas pero prácticamente al máximo de su capacidad (celda amarilla); si es mayor que 100%, los pilares de la instalación fallarán (celda roja).

En el estado de carga estudiado, la tensión equivalente máxima se da en el pilar 9 (≈140 MPa) y el resultado es el siguiente:



Mediante una nueva macro se automatizan todos los cálculos anteriores, consiguiéndose analizar los 16 posibles estados de carga como se muestra en las tablas del Anexo IV. Se puede observar que los porcentajes de aprovechamiento máximo de la sección de los pilares se dan para los estados de carga 0-1-0-1 y 1-0-1-0, que se corresponden con los casos de momento flector M_y máximo. En ambos casos el porcentaje calculado es menor que 100%, por lo tanto la sección elegida para los pilares soportará todas las combinaciones de carga que puedan darse.

Si se diera el caso de que los pilares exceden su capacidad de resistencia, se debería elegir una sección mayor de los mismos. Como valores de referencia para facilitar la selección de la nueva sección se muestra una tabla de perfiles tubulares de la empresa Protubsa (Anexo II).

4. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

En todo proyecto se ha de llevar a cabo una fase de planificación en la que se han de definir los plazos y objetivos a alcanzar. Además de la estructura de trabajo y duración de cada tarea, resulta de gran importancia la fijación de hitos para el control de estos aspectos.

En primer lugar se describen brevemente cada una de las tareas que forman parte del trabajo. A continuación, dichas tareas se presentan en un diagrama Gantt junto con su fecha de comienzo y su duración, de manera que resulte más sencilla y visual la planificación del trabajo.

4.1. FASES DEL PROYECTO

DESCRIPCIÓN DE TAREAS

El trabajo se compone de 5 tareas principales que se dividen en una serie de subtareas. El contenido de las mismas y la organización que siguen se presenta a continuación:

ELECCIÓN DEL TRABAJO

El primer paso en la planificación del proyecto es elegir la especialidad en la que se desea que esté enfocado el trabajo y reunirse con el tutor para comentar los diferentes ámbitos de interés dentro de la misma. Tanto tutor como alumno reflexionan individualmente durante unos días sobre posibles propuestas de proyecto y de entre todas ellas, una vez puestas en común, se elige el trabajo que va a realizarse.

ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Conocida la idea de proyecto, se han de definir los objetivos y el alcance del mismo. Seguidamente se propone una primera aproximación de índice, que se presenta al tutor en una reunión. Una vez fijados los apartados del trabajo se da comienzo a la búsqueda de información en diferentes libros y páginas web para adquirir los conocimientos necesarios para la realización del mismo. Por último, el alumno se ha de familiarizar con el software Excel, que es el que se va a utilizar para el desarrollo del trabajo.

PROGRAMACIÓN DEL EXCEL

Se trata de la tarea principal del trabajo y, por lo tanto, la más densa. En primer lugar se ha de realizar un esquema del programa que se va a crear, que servirá de orientación a la hora de crear las diferentes hojas de Excel. Una vez definida la estructura, se procede al diseño de la hoja de introducción de datos, que debe ser clara para que su uso resulte lo más sencillo posible. A continuación se han de programar los distintos cálculos: tensiones del cable, esfuerzos internos en el pilar... con el fin de determinar la resistencia de la sección crítica de los pilares.

REDACCIÓN DEL TRABAJO

El último paso del trabajo, una vez terminado el programa de Excel, es la redacción del mismo. Con la información recopilada y los resultados obtenidos se establece un índice definitivo y se realiza el escrito.

PREPARACIÓN DE LA PRESENTACIÓN

Una vez concluida la redacción del trabajo se han de presentar los resultados obtenidos ante un tribunal.

DEFINICIÓN DE HITOS

En la planificación del trabajo se definen 3 hitos que permiten conocer los momentos más importantes del desarrollo del mismo.

PROYECTO DEFINIDO

La fase de organización del trabajo debe finalizar con unos objetivos y una estructura clara del mismo, tras la cual el proyecto se considerará completamente definido.

VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Al concluir el desarrollo del trabajo es necesario que el tutor compruebe que los resultados obtenidos son correctos antes de proceder a la redacción de los mismos.

ENTREGA DE LA DOCUMENTACIÓN

Cuando el proyecto ha sido completado, se han de realizar una serie de trámites, de manera que se pueda solicitar la defensa del mismo y pueda ser evaluado.

4.2. DIAGRAMA DE GANTT

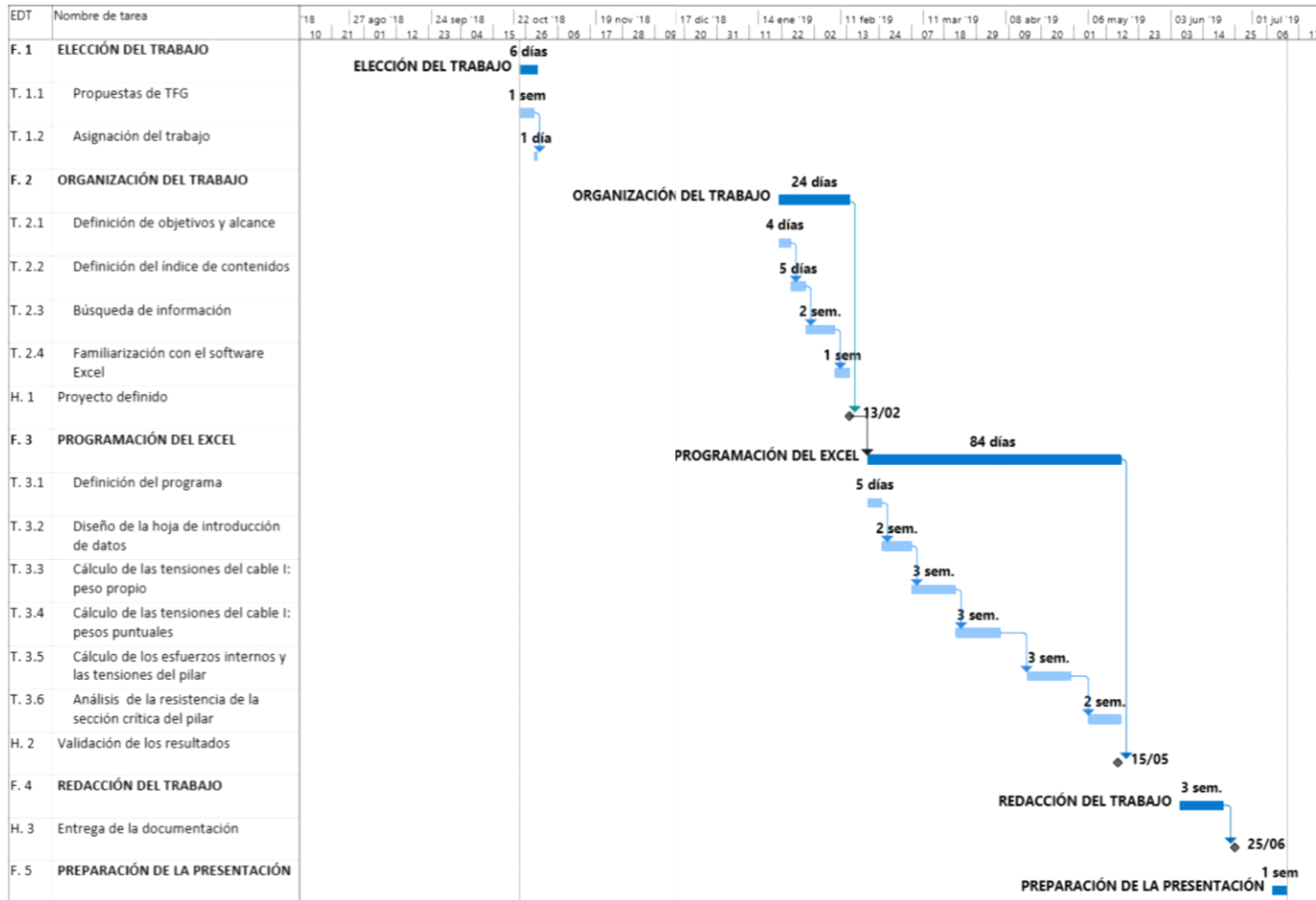


Ilustración 22. Diagrama de Gantt del proyecto

5. ASPECTOS ECONÓMICOS

En este apartado se presenta el presupuesto del proyecto, explicándose brevemente cada una de sus partidas. Finalmente se realiza un resumen de los gastos y se muestra en un gráfico el peso específico de cada una de las partidas.

5.1. PARTIDAS DEL PRESUPUESTO

HORAS INTERNAS

Dentro de esta partida se recogen las horas que han sido necesarias para la realización del proyecto y se contabilizan multiplicándolas por el coste horario de cada una de las personas que han trabajado en el mismo.

En este caso, el equipo de trabajo del proyecto está formado por dos personas: el tutor y el alumno. Dada la experiencia del tutor en el ámbito de trabajo del proyecto, su coste horario será superior al del alumno. No obstante, al ser el alumno el que ha de desarrollar el trabajo, las horas dedicadas al trabajo son superiores en su caso.

AMORTIZACIONES

Entre activos fijos empleados en el proyecto el principal es un ordenador (alrededor de 850€ y 4 años de vida útil), que se utiliza tanto para la búsqueda de información y la redacción del trabajo como para la programación en Excel. Por otro lado, para poder hacer uso de la herramienta de cálculo mencionada, es necesario disponer de una licencia de Microsoft Office (1 año de vida útil considerando que se trabaja 8 horas al día, es decir, un total de 2920 horas).

Los costes de amortización de los activos mencionados se calculan de la siguiente forma:

$$\text{Amortización} = \frac{\text{Precio de adquisición}}{\text{Vida útil}} * \text{Tiempo de utilización}$$

GASTOS

Los útiles empleados para el proyecto se reducen al material de oficina y los libros “Mecánica Aplicada: Estática y Cinemática” y “Cálculo Elástico de Sólidos”. Su uso se considera exclusivo para este proyecto.

SUBCONTRATACIONES

No se considera la subcontratación de ningún servicio del proyecto a externos.

COSTES INDIRECTOS

Los costes que no se pueden imputar directamente al trabajo presente abarcan la electricidad, la luz, internet... Estos costes se calculan como un porcentaje de los costes directos (suma de todos los anteriores).

5.2. COSTES TOTALES

A continuación se muestra el presupuesto del proyecto con los costes correspondientes a las partidas presentadas en el apartado anterior:

Tabla 19. Presupuesto

Concepto	Unidades	Nº Unidades	Coste horario	Coste
Horas internas				6.250,0 €
Tutor	H	25	50	1250 €
Alumno	H	200	25	5000 €
Amortizaciones				18,0 €
Ordenador	H	185	0,075	14 €
Licencia de Microsoft Office	H	165	0,025	4 €
Gastos				100,0 €
Material de oficina				20 €
Libros				80 €
Subcontrataciones				0,0 €
COSTES DIRECTOS				6.368,0 €
Costes indirectos	10%			636,8 €
COSTES TOTALES				7.004,8 €
IVA	21%			1.471,0 €
TOTAL				8.475,8 €

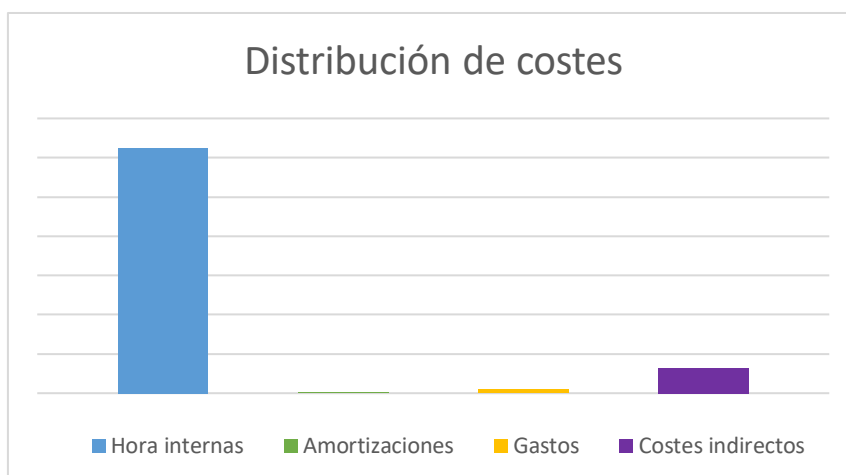


Gráfico 5. Distribución de costes del proyecto

6. CONCLUSIONES

El programa creado en el presente proyecto proporciona la verificación del correcto predimensionamiento de una instalación de teleférico.

Por un lado, permite obtener los esfuerzos que se producen en los elementos estructurales más importantes de este tipo de sistemas, que son el cable y los pilares, para las diferentes posiciones de las cabinas a lo largo del recorrido.

Por otro lado, no se trata únicamente de un programa que cuantifica las tensiones soportadas, sino que también aporta un análisis de la resistencia de la instalación a estudiar, ya que sirve para comprobar si la hipótesis de partida es o no adecuada, indicando en qué grado.

Además de tratarse de una aplicación de hojas de cálculo, el Excel es una herramienta de gran utilidad puesto que permite programar el proceso de obtención de los diferentes resultados, de manera que se realicen automáticamente los cálculos deseados pulsando un único botón, sin necesidad de repetir cada uno de ellos. Gracias a esto, el programa desarrollado en el trabajo cumple con la finalidad de ofrecer un uso sencillo y una ejecución relativamente rápida.

El hecho de que el software empleado posibilite la representación gráfica de los resultados obtenidos permite al usuario formarse una idea aproximada de la instalación real. Los gráficos presentados también suponen una gran ventaja a la hora de programar los cálculos, ya que reflejan de una manera más clara e intuitiva si se producen errores en el desarrollo del trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] “Mecánica Aplicada: Estática y Cinemática”. Sólidos funiculares. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao 2008.

[2] “Elasticidad y Resistencia de Materiales”. Teoría general de la flexión. Tensiones. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao 2015.

[3] “Cálculo Elástico de Sólidos”. Teoría de la torsión. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao 2015.

[4] “Elementos de Máquinas”. Correas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao 2007.

[5] Orro, A.; Novales, M.; Rodríguez, M.: Transporte por cable. Tórculo Artes Gráficas, A Coruña 2003.

[6] REGLAMENTO (UE) 2016/424 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 9 de marzo de 2016 relativo a las instalaciones de transporte por cable y por el que se deroga la Directiva 2000/9/CE

Páginas de internet:

- Cables de acero para el transporte por cable: aerosilla y telecabina. IPH.
<https://www.iphglobal.com/>
- Tubos de acero estructurales. Protubsa.
<https://www.protubsa.com/>
- Elementos de teleféricos. Leitner Ropeways.
<https://www.leitner-ropeways.com/es/empresa/informaciones-utiles/elementos-de-telefericos/>

ANEXOS

ANEXO I: Tabla de características del cable IPH GP CW

CABLES PARA AEROSILLA Y TELECABINA



Ventajas y Características

- Cordones compactados que incrementan la vida del equipo y del propio cable.
- Maximiza las propiedades de flexibilidad, resistencia a la abrasión y mínima elongación.
- Construcciones: 6x19S, 6x26WS, 6x31WS, 6x36WS.
- Torsión Lang.
- Alma fabricada en IPH, de polipropileno de alta densidad.

Diámetro	Masa aproximada	Carga Mínima de Rotura		Carga Mínima de Rotura	
		Grado 1770 N/mm ²	Grado 1960 N/mm ²	Grado 1770 N/mm ²	Grado 1960 N/mm ²
[mm]	[kg/m]	[kN]	[kN]	[t]	[t]
20.00	1.58	276	306	28.2	31.2
22.00	1.91	334	370	34.1	37.7
24.00	2.27	397	440	40.5	44.9
26.00	2.67	466	517	47.6	52.7
28.00	3.09	541	599	55.2	61.0
30.00	3.55	621	688	63.3	70.2
32.00	4.04	707	782	72.1	79.8
34.00	4.56	798	883	81.4	90.1
36.00	5.11	895	990	91.2	101
38.00	5.70	996	1100	102	112
40.00	6.31	1100	1220	112	124
42.00	6.96	1220	1340	124	137
44.00	7.64	1330	1480	136	151
48.00	9.09	1590	1760	162	180
52.00	10.67	1870	2070	191	211
56.00	12.37	2160	2390	220	244
60.00	14.20	2490	2750	254	281

Consulte a IPH por diámetros o resistencias no especificados en la tabla.



ANEXO II: Tabla de tubos de acero redondos de la empresa Protubsa

Ø ext. mm.	Espesor en mm.																Ø ext. mm.						
	20,0	22,2	25,0	28,0	30,0	32,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0		85,0	90,0	95,0	100,0		
33,7																							33,7
38,0 - 42,4																							38,0
44,5																							44,5
48,3																							48,3
51,0																							51,0
54,0																							54,0
57,0 - 60,3																							57,0
63,5																							63,5
67,0																							67,0
70,0																							70,0
73,0																							73,0
76,1																							76,1
82,5																							82,5
88,9																							88,9
95,0																							95,0
101,6																							101,6
108,0																							108,0
114,3																							114,3
121,0																							121,0
127,0 - 133,0 - 139,7																							127,0 - 133,0 - 139,7
141,3 - 146,0																							141,3
152,4 - 159,0																							152,4
165,1																							165,1
168,3 - 171,0 - 177,8																							168,3 - 177,8
181,8 - 191,0																							181,8
193,7 - 203,0																							193,7 - 203,0
216,0																							216,0
219,1																							219,1
229,0																							229,0
241,0																							241,0
244,5																							244,5
254,0 - 267,0																							254,0 - 267,0
273,0																							273,0
279,0																							279,0
292,0																							292,0
298,5 - 305,0 - 318,0																							298,5 - 305,0 - 318,0
323,9																							323,9
330,0 - 339,7 - 343,0																							330,0 - 339,7 - 343,0
355,6																							355,6
368 - 377,8																							368 - 377,8
381,0																							381,0
394,0																							394,0
406,4																							406,4
419,1																							419,1
426,0																							426,0
431,8 - 445,0																							431,8 - 445,0
457,2																							457,2
470,0																							470,0
475,0																							475,0
482,6 - 495,0																							482,6 - 495,0
508,0																							508,0
521,0 - 530,0																							521,0 - 530,0
533,4 - 546,0																							533,4 - 546,0
558,8																							558,8
572,0 - 584,2																							572,0 - 584,2
609,6																							609,6
622,0																							622,0
630,0 - 635,0																							630,0 - 635,0
660,4 - 711,2																							660,4 - 711,2
762 - 812,8 - 863,0																							762 - 812,8 - 863,0

Tubos de acero redondos
GAMA DIMENSIONAL
 Soldados · Descordonados · Sin soldadura
 Calidad estándar en stock S355J2H / S355NH

ANEXO III: Tablas de las tensiones del cable obtenidas con Excel expresadas en kg

Tensiones debidas al peso de las cabinas vacías

T_A																
$\Delta x(c1-A)$	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
0	1948,65	1415,80	1880,12	1447,72	2625,92	1701,43	1833,28	1302,73	3421,54	1407,20	2529,41	1753,11	1976,65	1263,58	2690,74	1447,72
5	1962,74	1480,66	1031,91	1631,44	2528,34	1630,47	1856,03	1381,06	1090,71	1589,19	2443,66	1673,52	1988,38	1345,48	1031,91	1631,44
10	1802,76	1203,96	1110,02	1658,59	2565,65	1709,74	1713,56	1138,47	1172,78	1618,25	2483,97	1752,36	1824,00	1114,18	1110,02	1658,59
15	1808,00	1227,64	900,54	1511,26	2501,26	1660,10	1721,05	1160,85	956,16	1476,00	2424,54	1700,19	1828,64	1136,04	900,54	1511,26
20	1706,80	1119,39	-	1160,85	2327,76	1471,78	1625,82	1055,70	-	1136,04	2258,64	1506,54	1726,00	1032,19	-	1160,85

T_B																
$\Delta x(c1-A)$	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
0	2232,71	1334,75	1996,90	1370,86	2944,05	2132,76	2246,79	1346,07	3540,20	1371,48	2981,94	2121,83	2227,76	1346,92	2857,20	1370,86
5	2528,04	1722,25	1153,30	1851,33	2645,91	1842,08	2557,12	1764,56	1147,42	1857,44	2670,86	1836,65	2519,25	1775,42	1153,30	1851,33
10	2082,63	1250,17	1370,61	2059,52	2860,66	2092,83	2092,40	1263,29	1369,98	2067,73	2890,14	2086,12	2078,86	1264,93	1370,61	2059,52
15	2215,10	1359,95	1284,67	2074,10	2955,64	2181,02	2226,19	1370,86	1281,97	2085,18	2989,10	2172,80	2210,89	1371,48	1284,67	2074,10
20	2232,71	1334,75	-	1370,86	2944,05	2132,76	2246,79	1346,07	-	1371,48	2981,94	2121,83	2227,76	1346,92	-	1370,86

T₀																
$\Delta x(c1-A)$	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
0	1699,97	1117,22	1876,47	1158,87	2268,21	1470,74	1625,10	1055,09	3419,57	1135,62	2221,05	1503,06	1716,58	1029,95	2684,89	1158,87
5	1844,43	1371,41	1004,98	1532,07	2289,24	1527,45	1770,98	1314,68	1042,51	1504,77	2248,09	1554,02	1860,54	1290,50	1004,98	1532,07
10	1743,04	1158,10	1110,01	1624,58	2414,90	1674,61	1677,55	1118,44	1169,58	1593,44	2369,54	1706,18	1757,18	1100,22	1110,01	1624,58
15	1784,88	1213,47	891,88	1501,74	2406,08	1650,88	1711,93	1158,87	954,53	1470,94	2358,20	1684,84	1800,87	1135,62	891,88	1501,74
20	1699,97	1117,22	-	1158,87	2268,21	1470,74	1625,10	1055,09	-	1135,62	2221,06	1503,06	1716,58	1029,95	-	1158,87

T_{Ay}																
$\Delta x(c1-A)$	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
0	952,54	869,67	117,02	867,70	1323,13	855,46	848,51	764,13	-116,27	831,02	1210,31	902,34	980,04	732,02	-177,22	867,70
5	671,12	558,18	234,22	560,69	1073,27	570,37	555,42	423,02	320,66	511,07	957,91	621,06	701,47	380,69	234,22	560,69
10	460,19	329,13	-4,01	334,16	866,49	344,77	349,42	212,63	86,61	282,26	745,26	399,65	489,16	175,85	-4,01	334,16
15	288,19	186,03	-124,62	169,38	683,43	174,71	176,91	67,70	-55,77	122,06	563,26	227,99	317,46	31,02	-124,62	169,38
20	152,54	69,67	-	67,70	523,13	55,46	48,51	-35,87	-	31,02	410,31	102,34	180,04	-67,98	-	67,70

T_{By}																
$\Delta x(c1-A)$	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
0	1447,46	730,33	682,98	732,30	1876,87	1544,54	1551,49	835,87	916,27	768,98	1989,69	1497,66	1419,96	867,98	977,22	732,30
5	1728,88	1041,82	565,78	1039,31	1326,73	1029,63	1844,58	1176,98	479,34	1088,93	1442,09	978,94	1698,53	1219,31	565,78	1039,31
10	1139,81	470,87	804,01	1265,84	1533,51	1255,23	1250,58	587,37	713,39	1317,74	1654,74	1200,35	1110,84	624,15	804,01	1265,84
15	1311,81	613,97	924,62	1430,62	1716,57	1425,29	1423,09	732,30	855,77	1477,94	1836,74	1372,01	1282,54	768,98	924,62	1430,62
20	1447,46	730,33	-	732,30	1876,87	1544,54	1551,49	835,87	-	768,98	1989,69	1497,66	1419,96	867,98	-	732,30

Tensiones debidas al peso de las cabinas llenas

T_A		Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
$\Delta x(c1-A)$																	
0		3410,13	2477,66	3290,21	2533,50	4595,36	2977,51	3208,24	2279,77	5987,70	2462,60	4426,47	3067,94	3459,13	2211,27	4708,79	2533,50
5		3434,79	2591,15	1805,84	2855,03	4424,60	2853,32	3248,05	2416,85	1908,74	2781,08	4276,41	2928,67	3479,67	2354,59	1805,84	2855,03
10		3154,83	2106,94	1942,53	2902,53	4489,89	2992,04	2998,72	1992,32	2052,37	2831,93	4346,96	3066,63	3192,00	1949,82	1942,53	2902,53
15		3164,00	2148,38	1575,95	2644,71	4377,21	2905,17	3011,84	2031,48	1673,27	2583,00	4242,94	2975,34	3200,12	1988,07	1575,95	2644,71
20		2986,89	1958,93	-	2031,48	4073,58	2575,62	2845,18	1847,47	-	1988,07	3952,61	2636,44	3020,49	1806,33	-	2031,48

T_B		Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
$\Delta x(c1-A)$																	
0		3907,25	2335,81	3494,58	2399,00	5152,09	3732,33	3931,87	2355,62	6195,34	2400,09	5218,39	3713,20	3898,58	2357,11	5000,11	2399,00
5		4424,07	3013,94	2018,27	3239,82	4630,34	3223,64	4474,95	3087,97	2007,99	3250,53	4674,01	3214,14	4408,68	3106,98	2018,27	3239,82
10		3644,60	2187,80	2398,56	3604,15	5006,16	3662,45	3661,70	2210,76	2397,46	3618,52	5057,74	3650,71	3638,00	2213,62	2398,56	3604,15
15		3876,42	2379,91	2248,16	3629,67	5172,38	3816,79	3895,83	2399,00	2243,46	3649,07	5230,93	3802,41	3869,07	2400,09	2248,16	3629,67
20		3907,25	2335,81	-	2399,00	5152,09	3732,33	3931,87	2355,62	-	2400,09	5218,40	3713,20	3898,58	2357,11	-	2399,00

T₀																
$\Delta x(c1-A)$	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
0	2974,94	1955,13	3283,83	2028,02	3969,37	2573,79	2843,92	1846,40	5984,24	1987,33	3886,84	2630,35	3004,01	1802,41	4698,56	2028,02
5	3227,76	2399,97	1758,71	2681,12	4006,17	2673,04	3099,21	2300,69	1824,38	2633,35	3934,15	2719,53	3255,94	2258,37	1758,71	2681,12
10	3050,31	2026,68	1942,52	2843,01	4226,08	2930,57	2935,72	1957,26	2046,77	2788,52	4146,70	2985,81	3075,07	1925,38	1942,52	2843,01
15	3123,55	2123,57	1560,79	2628,04	4210,65	2889,04	2995,89	2028,02	1670,43	2574,15	4126,85	2948,46	3151,53	1987,33	1560,79	2628,04
20	2974,94	1955,13	-	2028,02	3969,37	2573,79	2843,92	1846,40	-	1987,33	3886,85	2630,35	3004,02	1802,41	-	2028,02

T_{Ay}																
$\Delta x(c1-A)$	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
0	1666,95	1521,92	204,78	1518,47	2315,48	1497,06	1484,90	1337,22	-203,47	1454,28	2118,04	1579,09	1715,08	1281,03	-310,14	1518,47
5	1174,45	976,82	409,88	981,20	1878,22	998,14	971,98	740,29	561,16	894,37	1676,35	1086,85	1227,57	666,21	409,88	981,20
10	805,34	575,97	-7,02	584,78	1516,37	603,35	611,49	372,10	151,57	493,95	1304,20	699,39	856,04	307,74	-7,02	584,78
15	504,34	325,56	-218,08	296,42	1196,01	305,74	309,59	118,47	-97,59	213,61	985,70	398,99	555,55	54,28	-218,08	296,42
20	266,95	121,92	-	118,47	915,48	97,06	84,90	-62,78	-	54,28	718,04	179,09	315,08	-118,97	-	118,47

T_{By}																
$\Delta x(c1-A)$	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14	Tramo 15	Tramo 16
0	2533,05	1278,08	1195,22	1281,53	3284,52	2702,94	2715,10	1462,78	1603,47	1345,72	3481,96	2620,91	2484,92	1518,97	1710,14	1281,53
5	3025,55	1823,18	990,12	1818,80	2321,78	1801,86	3228,02	2059,71	838,84	1905,63	2523,65	1713,15	2972,43	2133,79	990,12	1818,80
10	1994,66	824,03	1407,02	2215,22	2683,63	2196,65	2188,51	1027,90	1248,43	2306,05	2895,80	2100,61	1943,96	1092,26	1407,02	2215,22
15	2295,66	1074,44	1618,08	2503,58	3003,99	2494,26	2490,41	1281,53	1497,59	2586,39	3214,30	2401,01	2244,45	1345,72	1618,08	2503,58
20	2533,05	1278,08	-	1281,53	3284,52	2702,94	2715,10	1462,78	-	1345,72	3481,96	2620,91	2484,92	1518,97	-	1281,53

ANEXO IV: Tabla de las tensiones en la sección del empotramiento de cada pilar para los diferentes estados de carga expresados en MPa

ESTADO DE CARGA 0-0-0-0

σeq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	0,535	0,192	0,273	0,826	0,674	0,342	0,530	0,181	0,209	0,803	0,666	0,377	0,557	0,185	0,273
2	21,529	8,615	11,042	41,330	29,232	6,072	21,051	4,079	7,915	40,446	26,305	8,241	25,325	5,423	11,042
3	0,535	0,192	0,273	0,826	0,674	0,342	0,530	0,181	0,209	0,803	0,666	0,377	0,557	0,185	0,273
4	22,255	8,836	10,659	40,573	30,059	5,421	21,782	4,407	7,604	39,733	27,227	7,543	25,955	5,734	10,659
MAX	22,255	8,836	11,042	41,330	30,059	6,072	21,782	4,407	7,915	40,446	27,227	8,241	25,955	5,734	11,042

22,544

ESTADO DE CARGA 0-0-0-1

σeq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	4,958	7,080	4,905	7,247	4,949	5,055	4,608	14,485	4,823	6,971	6,029	5,423	4,582	11,023	4,905
2	4,245	34,405	41,122	71,739	5,779	32,499	4,080	85,979	37,458	70,216	7,204	35,830	5,304	62,768	41,122
3	5,592	8,312	6,450	9,820	5,207	6,507	5,173	17,499	6,217	9,474	6,996	7,018	4,934	13,210	6,450
4	4,081	34,102	40,603	70,495	6,410	31,605	3,958	85,696	37,024	69,039	8,380	34,855	5,898	62,513	40,602
MAX	5,592	34,405	41,122	71,739	6,410	32,499	5,173	85,979	37,458	70,216	8,380	35,830	5,898	62,768	41,122

46,898

ESTADO DE CARGA 0-0-1-0

σeq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	7,449	5,841	7,327	8,087	7,012	6,467	7,649	6,126	15,024	8,152	7,211	5,761	7,400	6,202	11,737
2	48,421	31,287	31,915	13,059	59,209	19,983	46,976	26,115	82,082	12,720	55,651	11,966	52,409	27,133	57,137
3	9,470	7,010	8,561	8,786	9,387	7,731	9,638	7,271	17,987	8,858	9,571	6,900	9,425	7,356	13,870
4	49,657	31,873	32,454	11,938	60,489	21,007	48,241	26,839	82,689	11,628	57,052	13,007	53,543	27,849	57,817
MAX	49,657	31,873	32,454	13,059	60,489	21,007	48,241	26,839	82,689	12,720	57,052	13,007	53,543	27,849	57,817

45,103

ESTADO DE CARGA 0-0-1-1

σeq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	9,507	6,714	4,452	12,228	7,448	8,110	9,365	11,802	11,215	12,114	11,066	8,438	8,864	8,739	8,457
2	25,474	11,693	2,581	42,117	33,186	6,651	24,709	63,887	52,447	41,156	35,385	15,890	30,462	40,991	26,969
3	11,063	7,498	5,093	13,964	8,988	9,416	10,909	14,137	13,201	13,794	13,041	9,875	10,310	10,311	9,725
4	26,964	11,046	2,985	40,385	34,621	5,346	26,193	63,208	53,177	39,478	37,194	14,521	31,801	40,332	27,780
MAX	26,964	11,693	5,093	42,117	34,621	9,416	26,193	63,887	53,177	41,156	37,194	15,890	31,801	40,991	27,780

34,848

ESTADO DE CARGA 0-1-0-0

oeq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	5,592	8,312	6,450	9,820	5,207	6,507	5,173	17,499	6,217	9,474	6,996	7,018	4,934	13,210	6,450
2	4,245	34,405	41,122	71,739	5,779	32,499	4,080	85,979	37,458	70,216	7,204	35,830	5,304	62,768	41,122
3	4,958	7,080	4,905	7,247	4,949	5,055	4,608	14,485	4,823	6,971	6,029	5,423	4,582	11,023	4,905
4	4,081	34,102	40,603	70,495	6,410	31,605	3,958	85,696	37,024	69,039	8,380	34,855	5,898	62,513	40,602
MAX	5,592	34,405	41,122	71,739	6,410	32,499	5,173	85,979	37,458	70,216	8,380	35,830	5,898	62,768	41,122

46,898

ESTADO DE CARGA 0-1-0-1

oeq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	0,741	1,370	1,302	2,007	0,686	1,185	0,704	3,105	1,217	1,954	0,896	1,283	0,605	2,308	1,302
2	23,901	75,726	70,503	101,740	22,337	58,247	23,034	173,040	66,261	99,587	13,805	62,748	18,144	128,607	70,503
3	0,741	1,370	1,302	2,007	0,686	1,185	0,704	3,105	1,217	1,954	0,896	1,283	0,605	2,308	1,302
4	22,679	75,324	69,837	100,002	21,211	57,090	21,879	172,792	65,696	97,939	12,075	61,476	17,112	128,398	69,837
MAX	23,901	75,726	70,503	101,740	22,337	58,247	23,034	173,040	66,261	99,587	13,805	62,748	18,144	128,607	70,503

94,385

ESTADO DE CARGA 0-1-1-0

oeq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	8,926	12,351	12,923	11,535	10,038	9,524	8,969	21,790	20,410	11,277	8,227	8,772	8,936	17,718	17,075
2	26,983	16,145	13,013	43,469	34,664	11,452	26,167	65,837	55,556	42,485	36,441	17,960	31,691	43,234	31,404
3	10,352	12,190	13,003	10,048	11,709	9,585	10,454	19,843	22,337	9,900	9,731	8,456	10,515	16,631	18,128
4	28,394	15,682	13,099	41,793	36,041	10,746	27,572	65,179	56,245	40,862	38,200	16,762	32,980	42,609	32,103
MAX	28,394	16,145	13,099	43,469	36,041	11,452	27,572	65,837	56,245	42,485	38,200	17,960	32,980	43,234	32,103

35,911

ESTADO DE CARGA 0-1-1-1

oeq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	7,716	6,797	8,321	8,542	7,510	6,948	7,899	8,379	16,007	8,578	7,355	6,171	7,682	7,823	12,705
2	5,578	53,475	29,461	72,520	9,158	33,065	5,385	151,356	27,326	70,921	16,179	43,238	9,991	107,251	12,625
3	9,212	6,194	7,603	8,632	8,893	7,374	9,392	5,862	17,010	8,714	9,441	6,674	9,132	6,178	12,920
4	6,610	52,706	28,652	70,304	10,480	31,523	6,394	150,706	28,038	68,781	18,287	41,584	11,359	106,629	12,380
MAX	9,212	53,475	29,461	72,520	10,480	33,065	9,392	151,356	28,038	70,921	18,287	43,238	11,359	107,251	12,920

82,558

ESTADO DE CARGA 1-0-0-0

seq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	9,470	7,010	8,561	8,786	9,387	7,731	9,638	7,271	17,987	8,858	9,571	6,900	9,425	7,356	13,870
2	48,421	31,287	31,915	13,059	59,209	19,983	46,976	26,115	82,082	12,720	55,651	11,966	52,409	27,133	57,137
3	7,449	5,841	7,327	8,087	7,012	6,467	7,649	6,126	15,024	8,152	7,211	5,761	7,400	6,202	11,737
4	49,657	31,873	32,454	11,938	60,489	21,007	48,241	26,839	82,689	11,628	57,052	13,007	53,543	27,849	57,817
MAX	49,657	31,873	32,454	13,059	60,489	21,007	48,241	26,839	82,689	12,720	57,052	13,007	53,543	27,849	57,817

45,103

ESTADO DE CARGA 1-0-0-1

seq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	10,352	12,190	13,003	10,048	11,709	9,585	10,454	19,843	22,337	9,900	9,731	8,456	10,515	16,631	18,128
2	26,983	16,145	13,013	43,469	34,664	11,452	26,167	65,837	55,556	42,485	36,441	17,960	31,691	43,234	31,404
3	8,926	12,351	12,923	11,535	10,038	9,524	8,969	21,790	20,410	11,277	8,227	8,772	8,936	17,718	17,075
4	28,394	15,682	13,099	41,793	36,041	10,746	27,572	65,179	56,245	40,862	38,200	16,762	32,980	42,609	32,103
MAX	28,394	16,145	13,099	43,469	36,041	11,452	27,572	65,837	56,245	42,485	38,200	17,960	32,980	43,234	32,103

35,911

ESTADO DE CARGA 1-0-1-0

seq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	1,618	1,080	1,366	0,924	1,828	1,095	1,598	1,033	3,074	0,914	1,801	0,933	1,653	1,045	2,268
2	74,825	53,427	73,036	17,505	88,692	44,946	72,432	47,549	168,936	17,276	84,493	31,076	79,036	48,278	122,726
3	1,618	1,080	1,366	0,924	1,828	1,095	1,598	1,033	3,074	0,914	1,801	0,933	1,653	1,045	2,268
4	76,584	54,388	73,763	19,231	90,436	46,399	74,245	48,683	169,863	18,984	86,385	32,552	80,684	49,415	123,735
MAX	76,584	54,388	73,763	19,231	90,436	46,399	74,245	48,683	169,863	18,984	86,385	32,552	80,684	49,415	123,735

92,652

ESTADO DE CARGA 1-0-1-1

seq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	5,540	7,841	6,308	7,544	5,881	5,640	5,214	15,295	7,857	7,262	6,394	5,791	5,255	11,833	7,153
2	52,269	13,582	43,635	13,802	63,078	19,432	50,544	44,014	139,862	13,386	64,538	6,208	57,434	22,302	93,149
3	5,340	7,590	5,127	9,516	4,577	6,061	4,911	16,708	3,526	9,179	6,993	6,740	4,611	12,423	4,427
4	54,270	14,465	44,497	11,795	64,968	21,091	52,564	42,997	140,914	11,420	66,830	7,424	59,279	21,397	94,298
MAX	54,270	14,465	44,497	13,802	64,968	21,091	52,564	44,014	140,914	13,386	66,830	7,424	59,279	22,302	94,298

76,862

ESTADO DE CARGA 1-1-0-0

seq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	11,063	7,498	5,093	13,964	8,988	9,416	10,909	14,137	13,201	13,794	13,041	9,875	10,310	10,311	9,725
2	25,474	11,693	2,581	42,117	33,186	6,651	24,709	63,887	52,447	41,156	35,385	15,890	30,462	40,991	26,969
3	9,507	6,714	4,452	12,228	7,448	8,110	9,365	11,802	11,215	12,114	11,066	8,438	8,864	8,739	8,457
4	26,964	11,046	2,985	40,385	34,621	5,346	26,193	63,208	53,177	39,478	37,194	14,521	31,801	40,332	27,780
MAX	26,964	11,693	5,093	42,117	34,621	9,416	26,193	63,887	53,177	41,156	37,194	15,890	31,801	40,991	27,780

34,848

ESTADO DE CARGA 1-1-0-1

seq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	9,212	6,194	7,603	8,632	8,893	7,374	9,392	5,862	17,010	8,714	9,441	6,674	9,132	6,178	12,920
2	5,578	53,475	29,461	72,520	9,158	33,065	5,385	151,356	27,326	70,921	16,179	43,238	9,991	107,251	12,625
3	7,716	6,797	8,321	8,542	7,510	6,948	7,899	8,379	16,007	8,578	7,355	6,171	7,682	7,823	12,705
4	6,610	52,706	28,652	70,304	10,480	31,523	6,394	150,706	28,038	68,781	18,287	41,584	11,359	106,629	12,380
MAX	9,212	53,475	29,461	72,520	10,480	33,065	9,392	151,356	28,038	70,921	18,287	43,238	11,359	107,251	12,920

82,558

ESTADO DE CARGA 1-1-1-0

seq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	5,340	7,590	5,127	9,516	4,577	6,061	4,911	16,708	3,526	9,179	6,993	6,740	4,611	12,423	4,427
2	52,269	13,582	43,635	13,802	63,078	19,432	50,544	44,014	139,862	13,386	64,538	6,208	57,434	22,302	93,149
3	5,540	7,841	6,308	7,544	5,881	5,640	5,214	15,295	7,857	7,262	6,394	5,791	5,255	11,833	7,153
4	54,270	14,465	44,497	11,795	64,968	21,091	52,564	42,997	140,914	11,420	66,830	7,424	59,279	21,397	94,298
MAX	54,270	14,465	44,497	13,802	64,968	21,091	52,564	44,014	140,914	13,386	66,830	7,424	59,279	22,302	94,298

76,862

ESTADO DE CARGA 1-1-1-1

seq	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 5	Pilar 6	Pilar 7	Pilar 8	Pilar 9	Pilar 10	Pilar 11	Pilar 12	Pilar 13	Pilar 14	Pilar 15
1	1,253	0,789	0,565	1,545	1,230	0,986	1,238	2,374	2,080	1,508	1,580	1,101	1,217	1,614	1,316
2	29,395	30,914	13,575	42,905	37,123	7,229	28,346	129,569	110,590	41,865	44,383	23,431	35,567	85,752	63,265
3	1,253	0,789	0,565	1,545	1,230	0,986	1,238	2,374	2,080	1,508	1,580	1,101	1,217	1,614	1,316
4	31,650	29,772	14,585	40,198	39,167	5,270	30,584	128,516	111,770	39,222	47,083	21,381	37,617	84,716	64,557
MAX	31,650	30,914	14,585	42,905	39,167	7,229	30,584	129,569	111,770	41,865	47,083	23,431	37,617	85,752	64,557

70,674