



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANTEPROYECTO DE ESQUELETO ESTRUCTURAL PARA MINI-
LOOP SIMPLIFICADO ADAPTADO AL TRAYECTO ENTRE
SEDES DE LA EII**

Autor: D. Ignacio Redondo Martín
Tutor: D. Antolín Lorenzana Iban

Valladolid, septiembre, 2018



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANTEPROYECTO DE ESQUELETO ESTRUCTURAL PARA MINI-
LOOP SIMPLIFICADO ADAPTADO AL TRAYECTO ENTRE
SEDES DE LA EII**

Autor: D. Ignacio Redondo Martín
Tutor: D. Antolín Lorenzana Iban

Valladolid, septiembre, 2018

RESUMEN

El presente trabajo busca desarrollar el anteproyecto de un sistema de transporte para personas. Se hace una propuesta conceptual de dos estaciones de embarque (una en la sede de Paseo del Cauce y otra en la sede Mergelina) y del esqueleto estructural aéreo por el que podrían transitar cápsulas no motorizadas de pasajeros entre sedes. Para ello, se analizan diferentes tecnologías existentes del transporte y se realizan los cálculos necesarios para generar el diseño preliminar.

ABSTRACT

This paper seeks to develop the preliminary design of a transportation system for people. A conceptual proposal is made for two boarding stations (one at the Paseo del Cauce headquarters and another at the Mergelina headquarters) and the aerial structural skeleton through which non-motorized passenger capsules could pass between sites. To do this, different existing transport technologies are analyzed and the necessary calculations are made to carry out the preliminary design.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad de Valladolid por todos estos años como estudiante. A mi tutor y a mi familia.

CONTENIDO

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo del trabajo	1
1.2 Alcance del trabajo	1
1.3 Motivación del trabajo	1
1.4 Estructura del Documento	2
Capítulo 2 ACTA DE CONSTITUCIÓN	3
2.1 Información del trabajo	3
2.2 Justificación del trabajo	3
2.3 Descripción del trabajo y entregables	3
2.4 Objetivos del trabajo	3
2.5 Requerimientos de alto nivel	4
2.6 Premisas	4
2.7 Restricciones	4
2.8 Riesgos y Oportunidades	4
2.9 Resumen del cronograma	5
2.10 Resumen del presupuesto	5
2.11 Identificación de partes interesadas	6
2.12 Requisitos de aprobación del trabajo	6
Capítulo 3 REQUISITOS Y CAPACIDAD	7
3.1 Recopilar requisitos	7
3.2 Análisis de capacidad	8
3.2.1. Estimación	8
3.2.2. Recorrido inicial	9
Capítulo 4 ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS DEL TRANSPORTE ...	11
4.1 Transporte por cable	12
4.1.1. Funiculares	12
4.1.2. Teleférico	13
4.1.2.1 Teleférico de vaivén	13
4.1.2.2 Telecabina	14
4.1.2.3 Telesilla	15
4.1.3. Otros	16
4.2 Montañas rusas	16
4.3 Trenes y metros ligeros	19
4.4 Otros	21
4.4.1. Hyperloop	21
4.5 Selección	22
4.5.1. Transporte por tubo sobre pilares	22
4.6 Cable portante-Vías-Otros	23

4.6.1. Sistema de tracción	23
4.6.2. Sistema eléctrico	24
4.6.3. Sistemas de seguridad.....	24
Capítulo 5 CÁLCULOS	25
5.1 Confort	25
5.1.1. Confort por aceleraciones	25
5.1.2. Espacio y ergonomía.....	27
5.1.3. Confort acústico.....	28
5.1.4. Confort térmico.....	28
5.2 Análisis de fuerzas	28
5.2.1. Rozamiento con las vías	32
5.2.2. Rozamiento con el aire	33
5.2.3. Cálculo de fuerzas.....	35
5.3 Elementos electrónicos.....	37
5.3.1. Sensores en el vehículo.....	37
5.3.2. Sensores en el tubo	42
5.3.3. Sensores en el tubo inclinado	43
5.3.4. Sensores en la estación	44
5.4 Cálculo de potencia	46
5.4.1. Potencia motores.....	46
5.4.2. Potencia sensores	47
5.4.3. Potencia total	48
5.4.4. Generación de potencia.....	48
5.5 Cálculo estructural.....	51
Capítulo 6 DISEÑO PRELIMINAR	53
6.1 General	53
6.2 Estación Paseo del Cauce	54
6.3 Estación Sede Mergelina.....	56
6.4 Módulo horizontal	57
6.5 Tubo acelerador y decelerador	61
6.6 Vehículo	62
Capítulo 7 CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXO 1: CÁLCULO GENERACIÓN POTENCIA	69
Caso 1: Generación Completa.....	69
Caso 2: Producción 75%	74
Caso 3: Cambiar el ángulo de inclinación.....	75
Capítulo 8 ANEXO 2: CÁLCULO ESTRUCTURAL	79
INDICE DE FIGURAS	89
INDICE DE TABLAS.....	91

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

El presente anteproyecto nace de la necesidad de analizar el diseño y construcción de un medio de transporte para los alumnos y profesores de la Universidad de Valladolid que estudien Ingeniería Industrial y necesiten moverse entre la sede ‘Paseo del Cauce’ y la sede ‘Mergelina’.

1.1 Objetivo del trabajo

Los objetivos del presente trabajo son:

- Analizar los diferentes sistemas de transporte y seleccionar el más adecuado.
- Diseñar conceptualmente el esqueleto estructural del sistema de transporte.
- Diseñar conceptualmente las estaciones para los pasajeros.

1.2 Alcance del trabajo

El alcance del trabajo para cada uno de los objetivos será:

- Análisis: Analizar, al menos, 5 tecnologías diferentes de transporte y seleccionar la óptima para el transporte de alumnos y profesores entre sedes.
- Diseño: preliminar del sistema proponiendo los componentes principales del sistema. Para ello se podrán realizar cálculos de dinámica de sólidos, cálculos eléctricos o estructurales. Así mismo, se estimará la capacidad de transporte del sistema.

1.3 Motivación del trabajo

El trabajo busca analizar la viabilidad de un medio de transporte para estudiantes que mejore la imagen de la Universidad de Valladolid, en concreto de la Escuela de Ingeniería, permitiendo aumentar el número de estudiantes de fuera de la ciudad y el reconocimiento exterior.

Además, busca analizar la idea de un sistema de transporte en tubo con sus ventajas y desventajas desde un punto de vista de la investigación.

1.4 Estructura del Documento

El documento va a estar dividido en capítulos. Empiezan con la Introducción y terminan con las Conclusiones. Los capítulos de desarrollo son:

- Acta de constitución
- Requisitos y capacidad.
- Análisis y selección de tecnologías del transporte.
- Cálculos preliminares
- Diseño preliminar final

El documento tiene dos Anexos para el cálculo estructural y para el cálculo de potencia, una Bibliografía, y un índice de tablas y figuras.

Capítulo 2 ACTA DE CONSTITUCIÓN

El presente capítulo desarrollará el acta de constitución. En él, se analizará el alcance del trabajo y se realizará un presupuesto estimado de la realización del anteproyecto. Para el Acta de Constitución se ha usado [1] y [2]

2.1 Información del trabajo

- Empresa / Organización: Universidad de Valladolid
- Proyecto: Anteproyecto de sistema de transporte entre sedes
- Fecha: 18/02/2018
- Cliente: Universidad de Valladolid
- Patrocinador principal: Universidad de Valladolid
- Director del Proyecto: Ignacio Redondo Martín

2.2 Justificación del trabajo

La Universidad de Valladolid busca de manera activa el desarrollo de nuevas tecnologías e ideas. El trabajo pretende simular una petición, por parte de la Universidad, al departamento de estructuras, en conjunción con un alumno, para diseñar conceptualmente un sistema de transportes para alumnos y profesores, facilitando la movilidad de los mismos entre sedes y mejorando la visibilidad y el prestigio de cara al exterior.

El trabajo, por consiguiente, pretende utilizar dicha simulación para investigar en la tecnología del transporte por tubos.

2.3 Descripción del trabajo y entregables

El anteproyecto consistirá en un diseño preliminar completo del sistema de transporte, justificando por qué se ha elegido cada tecnología, así como calculando la capacidad necesaria del mismo. Se podrán realizar cálculos mediante programas informáticos para pre-dimensionar el sistema.

2.4 Objetivos del trabajo

Los objetivos medibles del trabajo y los criterios de éxito asociados:

- Analizar y seleccionar una solución óptima para el transporte de los alumnos y profesores.
- Realizar los análisis y cálculos necesarios para dimensionar el anteproyecto.
- El diseño debe llamar la atención pues debe ser un elemento simbólico de la Universidad de Valladolid.

2.5 Requerimientos de alto nivel

- Buscar el menor impacto económico y ambiental, priorizando un proyecto sostenible.
- El sistema debe poder funcionar en cualquier época del año.
- La seguridad de los usuarios debe estar garantizada, pero sin eliminar la comodidad del servicio.

2.6 Premisas

Se presupone:

- Que la universidad dispone de un presupuesto ilimitado y busca mejorar su imagen de cara al exterior.
- Que los usuarios utilizarán el sistema.
- Que los cálculos realizados por SAP2000 y otros softwares son correctos, utilizando la metodología de trabajo adecuada, salvo que los resultados difieran altamente con la realidad.

2.7 Restricciones

- El sistema debe realizarse entre las sedes de Paseo del Cauce y Sede Mergelina.
- Debe poder ser expandible y permitir un uso flexible.
- Debe de ser viable técnicamente, sin grandes incompatibilidades.
- Tiene que ser aéreo y utilizar la tecnología de tubos.

2.8 Riesgos y Oportunidades

Riesgos relacionados con el sistema:

- Accidentes y lesiones
- Retrasos.
- Sobrecapacidad
- Inviabilidad técnica.

Riesgos de Marketing y servicio.

- Los usuarios no utilizan el servicio.
- El proyecto no es llamativo y no atrae a alumnos externos.
- El proyecto es inviable económicamente.

Riesgos/Oportunidad de las instalaciones:

- Incendio, terremoto, fuertes vientos, nevadas, lluvias y problemas con los armónicos de la instalación.

- Oportunidad de ahorrar tiempo a los alumnos y profesores y facilidad, permitiendo colocar clases continuas impartidas en diferentes sedes.
- Oportunidad de acortar el tiempo desde la escuela de ingeniería hasta la casa del estudiante.
- Oportunidad de aumentar la rentabilidad de la Uva y expandirse gracias a un aumento en el prestigio exterior.

2.9 Resumen del cronograma

En la figura 2.1 puede verse el resumen de la estimación del cronograma para la realización del anteproyecto.

ACTIVIDADES	SEMANAS											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Redacción trabajo	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Análisis de capacidad		■	■									
Diseño preliminar				■	■	■						
Cálculos						■	■				■	
Presupuesto								■	■	■		
Diseño preliminar final										■	■	

Figura 2.1 Cronograma

2.10 Resumen del presupuesto

En la tabla 2.1 puede verse una estimación del gasto en el que se incurre por la realización del anteproyecto, en el salario del ingeniero está incluido la redacción del documento.

Tabla 2.1 Presupuesto

Gasto	Cantidad
Salario ingeniero	6185 €
Programas informáticos	1000 €
Amortización de equipos	50 €
Partida para contingencias	500 €
TOTAL	7735 €

2.11 Identificación de partes interesadas

Listado de partes interesadas identificando Cliente Directo y Clientes Indirectos:

- Cliente Directo: Universidad de Valladolid (UVa). De ahora en adelante 'Promotor'.
- Cliente indirecto: Usuario final. De ahora en adelante 'Cliente'.
- Director del Proyecto.
- Equipo de Dirección de Proyecto.
- Equipo de Proyecto.
- Departamento de Estructuras de la UVA.
- Instituciones públicas: Hacienda, Junta de Castilla y León, Ayuntamiento y Policía.
- Proveedores

2.12 Requisitos de aprobación del trabajo

Para que el trabajo se considere un éxito deben cumplirse todos los requerimientos y objetivos.

Capítulo 3 REQUISITOS Y CAPACIDAD

En el presente capítulo se analiza los posibles requisitos que pueden tener las diferentes partes interesadas, para que, desde el diseño preliminar del anteproyecto, se tengan en cuenta. Minimizando los riesgos y disminuyendo los costes del diseño. También se realizará una estimación de la capacidad necesaria del sistema de transporte.

3.1 Recopilar requisitos

Esta sección recopilará los diferentes requisitos identificados en función del interesado. Se ha elegido un formato tipo tabla para recoger toda la información. En la tabla 3.1 se encuentran recogidos los requisitos.

Tabla 3.1 Requisitos

Interesados	Requisitos
Promotor UVa	Sistema de transporte seguro, funcional, sencillo, robusto, barato y llamativo. Debe suplir la demanda del transporte para los alumnos y profesores pero sin crear una sobrecapacidad.
Equipo Dirección	Conseguir realizar un anteproyecto que sirva como línea base para futuros trabajos, hasta convertirlo en un sistema 100% funcional y construible. No realizar más de 300 horas de trabajo. Transporte aéreo mediante tubos.
Proveedores	Sistema robusto y sencillo fácil de construir.
Alumnos Y Profesores	Tiempo de espera reducido. Tiempo del transporte reducido, pero sin llegar a ser incomodo por las aceleraciones y deceleraciones. Transporte con ventanas. Habilitado para personas con minusvalía. Con asientos y espacio para las mochilas.
Alumnos y universidades extranjeras	Proyecto visualmente llamativo y de estilo futurista que permita demostrarles la buena preparación que reciben los alumnos y su gran interés por la I+D+I.
Ayuntamiento	El proyecto final debe cumplir la normativa del ayuntamiento, minimizando el impacto ambiental, del tráfico de los coches y de los transeúntes.
Hacienda y Seguridad Social	Todos los trabajadores deben estar dados de alta. El sistema de transporte debe estar asegurado ante accidentes.

3.2 Análisis de capacidad

3.2.1. Estimación

El estudio de capacidad del sistema es muy parecido a un estudio de mercado. Se basa en identificar y estimar la cantidad de clientes potenciales. En este caso, existen 2 grupos de clientes:

- Alumnos estudiantes de ingeniería industrial y en Masters en Valladolid.
- Profesores

Debido a que el grupo de profesores es muy reducido comparado con la masa total de alumnos, se decide incluirlos al final del análisis.

De acuerdo con los datos extraídos, Tabla 3.2, de ‘La Uva en cifras’ del 2016 [3] se puede estimar el número de alumnos que actualmente estudian ingeniería industrial en Valladolid:

Tabla 3.2 Estudiantes UVa

Estudios	Mujeres	Hombres	Total
Grados	637	1660	2297
Títulos propios	5	4	9
Másteres oficiales	86	192	278
Doctorandos	133*	71*	204
		TOTAL	2788

*Para el cálculo del número de doctorandos en Valladolid, al disponer sólo del total de la Uva, se ha supuesto que siguen una distribución igual que el número de alumnos, es decir, que sólo el 50% están en Valladolid.

Los títulos propios se descartan pues no se imparten en ninguna de las dos sedes, a día de hoy, los doctorandos es poco probable que se desplacen entre sedes, por lo que quedan los Másteres y los Grados.

La media de créditos matriculados en grado es de 50 sobre 60, eso es un 83%. Mientras que los Másteres en Ingeniería Industrial con un éxito del 97%, se puede aproximar a una asistencia y matriculación del 100%.

El número total de alumnos que asisten a clase con las ponderaciones (se estima una asistencia del 80% en el grado) puede verse en la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Alumnos ponderados

Estudios	Créditos	Asistencia	Total Ponderación	Alumnos corregidos
Grados	83%	80%	66.4%	1525
Másteres oficiales	100%	100%	100%	278
			TOTAL	1803

A la hora de repartir los alumnos a lo largo del día, se repartirá un 66% por la mañana y un 33% por la tarde para los Grados y un 50/50 para los Másteres. El número máximo de

alumnos por clase se da en primero de Grado con 80 alumnos. En la tabla 3.4 puede verse la repartición de alumnos por la mañana y por la tarde:

Tabla 3.4 Distribución de alumnos

Periodo	Alumnos
Mañana	1145
Tarde	648

Se comprueba, por lo tanto, que las mañanas es el periodo más restrictivo. Sin embargo, no todos los alumnos deberán moverse de sede a la misma hora ni todos los días.

El momento con más afluencia de personas será en los cambios de clase, donde se debe poder transportar a todos los alumnos y profesores entre sedes en un periodo no superior a los 10 minutos.

Los Grados se impartirán en Sede Mergelina y los Master en Paseo del Cauce. Las necesidades de transporte nacen de que todos los laboratorios para prácticas, los despachos de los profesores y gran parte de las instalaciones de administración se encontrarán en Paseo del Cauce, mientras que la mayor parte de los alumnos, y clases, se encontrarán en Sede Mergelina. Esto creará un flujo de profesores yendo, o volviendo, de dar clases y un flujo de alumnos yendo, o volviendo, de solventar problemas administrativos, tutorías o prácticas. Se supone un transporte del 20% de los alumnos, sabiendo que se está sobredimensionando el sistema para incluir el transporte de los profesores.

El número de usuarios que debe transportar el sistema en 10 minutos (valor absoluto en ambos sentidos) es de 230 personas; 115 en cada dirección.

3.2.2. Recorrido inicial

En la figura 3.1 puede verse una imagen de Google Maps [4] con el que se ha calculado el recorrido entre Sedes.

La distancia total del recorrido inicial es de 418 m. Lo cual equivale, utilizando el propio Google Maps para la estimación, a 8 minutos andando entre Sedes. Por lo tanto, el tiempo de espera y transporte debe ser igual o inferior a los 8 minutos para que los usuarios decidan cogerlo.

Se elige una velocidad de diseño de 15 m/s, lo cual equivale a 54 km/h. Se elige esta velocidad para mantener el sistema seguro y simplificar todos los elementos.

Por consiguiente, los valores de tiempo característico del transporte son:

- Ttransporte = 28 s
- Tcarga = 16 s (Ampliable a 30 s en caso de necesidad)
- Tdescarga = 16 s (Ampliable a 30 s en caso de necesidad)

El tiempo de transporte medio será de 60 s. Sabiendo el tiempo de transporte se pueden estimar el número de carros necesarios.

$$(1) \quad \frac{4 \text{ personas por carro} \times 6 \text{ minutos} \times N_{\text{carros}}}{1 \text{ minuto/trayecto}} = 230 \text{ personas}$$



Figura 3.1 Recorrido Inicial

- **Ncarros= 9,6 carros → 10 carros.**

De esta manera, en 6 minutos y con 10 carros, se consigue transportar a toda la gente entre sedes. Los otros 2 minutos se tienen en cuenta para retrasos, espacio de seguridad entre carros, zonas de aceleración y deceleración que aumenten el tiempo de transporte y carros que vayan con menos de 4 personas.

A la hora de realizar el trazado del recorrido, se ha priorizado su paso por aceras en vez de por el parque, para minimizar el impacto visual, ambiental y evitar problemas con la normativa relativa a parques. Al llevarlo por la acera, se pueden colocar los pilares en el lugar de las farolas, evitando molestias extras a los transeúntes.

Capítulo 4 ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS DEL TRANSPORTE

En este capítulo se van a analizar las diferentes tecnologías del transporte y seleccionar cual es la más adecuada para el sistema de transporte.

Todos los sistemas de transporte disponen de un vehículo, de un medio y de un sistema impulsor. Dependiendo de los grados de libertad del vehículo, puede tener un movimiento libre, ir en carriles o canales o en vías.

Se elige un sistema de transporte terrestre para el trabajo porque:

- No existe un canal de agua, y la obra civil para la realización de uno es inviable. Además, el coste energético es mayor y sólo es más barato para el transporte de grandes pesos.
- Un sistema de transporte aéreo no tripulado, aunque evitaría el coste del conductor, es inviable tanto por la normativa actual de Vehículos No Tripulados, como por el gasto energético en sustentación de estos sistemas, muy superior al de un sistema de transporte terrestre.

Dentro del transporte terrestre, se puede clasificar en aéreo, subterráneo o sobre el suelo.

- El transporte subterráneo es inviable económicamente, pues la obra civil tiene un coste enorme al tener que mover grandes cantidades de tierra, además el impacto en la ciudad sería enorme.
- Un transporte sobre el suelo, como es el caso del tranvía, influiría en el tráfico de la ciudad, por lo que incumpliría uno de los requisitos básicos del trabajo.

Atendiendo a estas consideraciones, se estudiarán mayoritariamente sistemas aéreos, en la figura 4.1 puede verse un diagrama que resume las tecnologías que se van a analizar. Se analiza el tranvía y el metro ligero por su capacidad para funcionar parcialmente en tramos aéreos. Se analiza el funicular por su capacidad de salvar desniveles.

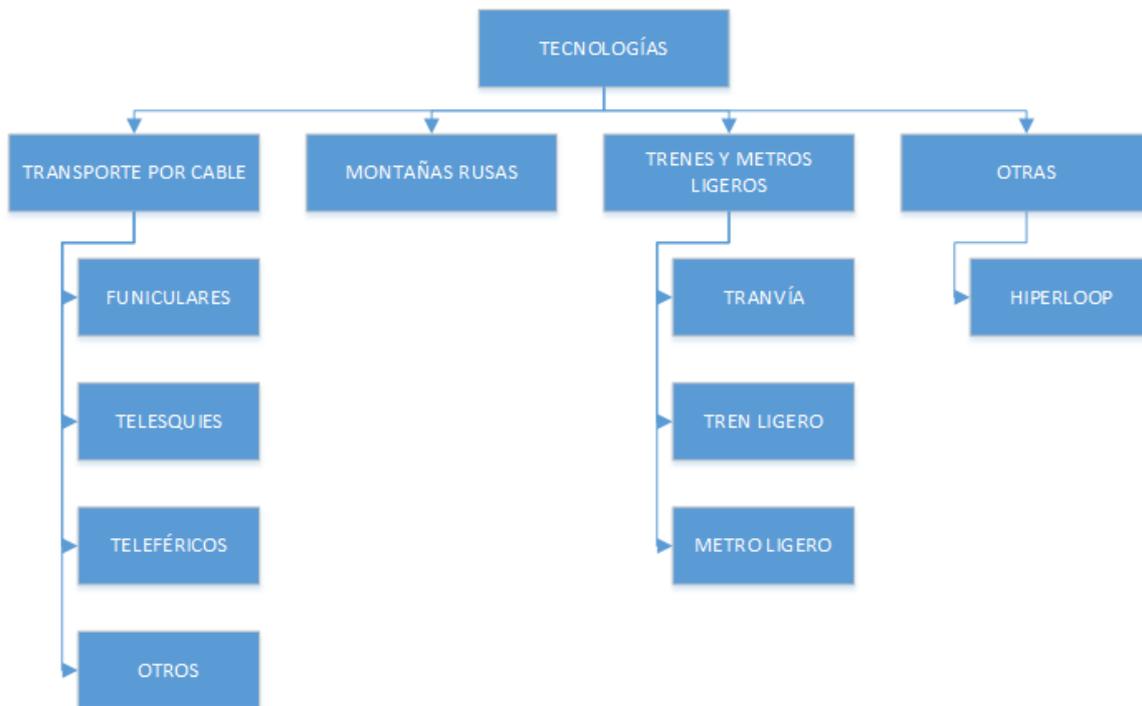


Figura 4.1 Tecnologías del transporte

4.1 Transporte por cable

El transporte por cable es una de las tecnologías de transporte más utilizadas en la actualidad, y lleva utilizándose desde hace miles de años. Todos los sistemas tienen en común que son traccionados por un cable, es decir, que el movimiento impulsos del vehículo lo realiza un cable. En este apartado se hablará del Funicular, Tele-esquí, Teleférico y otros de menor importancia. Para el desarrollo del presente apartado, se ha utilizado [5], [6] como fuentes de la información.

4.1.1. Funiculares

Un funicular es un sistema terrestre de transporte, un tipo especial de ferrocarril para salvar grandes pendientes, en el que los vehículos se desplazan movidos por ruedas, que apoyan sobre los carriles.

El esfuerzo de tracción motora lo pueden realizar uno o varios cables. En la figura 4.2 puede verse un ejemplo de un funicular.



Figura 4.2 Funicular [7]

Normalmente consiste en dos cabinas con movimiento de vaivén, es decir, uno de los vehículos asciende traccionado por el cable, mientras otro desciende, retenido por el mismo, aprovechando de esta forma la energía potencial del sistema.

La polea motora se ubica en la estación superior. Suelen utilizar la misma vía excepto en el medio, cuando se cruzan, que existe un desdoblamiento. El cable discurre por el centro de la vía y se apoya en las “poleas de línea”.

Una de las limitaciones de este sistema de transporte es la longitud de la línea. Ésta no puede ser ilimitada ya que el cable resultaría excesivamente pesado y presentaría problemas de dilatación térmica. Para solucionarlo, actualmente se usan cables lastre, o contra cables, y sistemas de tensado de los cables, en la estación inferior.

4.1.2. Teleférico

Teleférico se usa genéricamente para todos los sistemas aéreos de transporte que utilizan el cable como medio de impulsión.

4.1.2.1 Teleférico de vaivén

Los teleféricos de vaivén son sistemas de transporte bi-cable, figura 4.3. Consisten en dos cabinas que circulan sobre un cable portador mediante un carretón que realiza un movimiento de vaivén. El cable de tracción está unido permanentemente al vehículo.

- Capacidad del sistema: 100 y 1000 viajeros/hora.
- Vanos más largos, superiores a 1 km y mayores vientos. La longitud del vano vendrá determinada por la resistencia de los cables y la flecha.
- Altura sobre el suelo de acuerdo con el Pliego de condiciones técnicas vigente en España (Orden 14-1-98): La altura es ilimitada siempre que dispongan de cabina de evacuación.
- Las cabinas son cerradas y con capacidades que van de los 2 hasta los 180 pasajeros.



Figura 4.3 Teleférico de Vaivén [8]

4.1.2.2 Telecabina

Las telecabinas son sistemas mono-cable y de movimiento continuo unidireccional, figura 4.4. Mono-cable significa que sólo existe un grupo de cables transportadores responsable tanto del soporte de la carga como del esfuerzo motor.

El sistema de unión del cable es del tipo desembragable, es decir, que la pinza que une a la cabina al cable puede soltarse. Esto permite circular a velocidad reducida en las estaciones, a cuya entrada se desacoplan las pinzas del cable transportador; y con ello se reduce la velocidad de la cabina hasta casi su detención, facilitando el acceso y el abandono de la misma por los pasajeros.

Posteriormente, la pinza vuelve a engancharse al cable. El uso de sistemas desembragables, hace necesarias zonas de llegada y lanzamiento en las estaciones.

- Altura 60 m como máximo según el pliego español.
- Capacidad de transporte, de 1000 a 3000 viajeros/hora.
- Las cabinas tamaño (hasta 30 pasajeros).
- Velocidad: Normalmente 5 m/s



Figura 4.4 Telecabina Expo Zaragoza [9]

4.1.2.3 Telesilla

Los telesillas son sistemas monocable de movimiento unidireccional como las telecabinas.

La unión puede ser de pinza fija o desembragable. En los telesillas de pinza fija, las sillas permanecen enganchadas al cable a lo largo de todo el trayecto, quedando la velocidad máxima limitada a 2,5 m/s para permitir la bajada de los esquiadores.

En los telesillas desembragables, la velocidad del cable es de 5 m/s a lo largo de todo el recorrido, hasta llegar a las estaciones superior e inferior, en las que la silla se desacopla y circula a una velocidad de 0,3 m/s.

A fin de aumentar la densidad de sillas en el cable, se ha inventado el sistema de doble acceso, que consiste en hacer circular las sillas que llegan a la base del remonte por dos caminos diferentes alternativamente, dando así más tiempo a los pasajeros para acceder, volviendo a ponerse una detrás de la otra en el momento de reenganche al cable.

- La capacidad oscila entre los 1000 y los 3000 viajeros/hora.
- El número de posibles ocupantes por silla es de entre uno y ocho, siendo los más frecuentes de 4 y 6 personas.

Los telesquíes son idénticos a los telesillas, sólo que en vez de una cabina es un cable con un agarre al que van sujetos los esquiadores a la hora de hacer el remonte de la montaña.

4.1.3. Otros

Se han desarrollado nuevos sistemas combinando los sistemas anteriores:

- Teleférico de grupo o telecabina pulsado: Instalación mono-cable, con pinzas fijas y movimiento circulante intermitente. Puede tener dos o cuatro grupos de cabinas y se detiene en las estaciones para que los viajeros suban o se apeen. Es un sistema sencillo, pero la capacidad depende de la longitud de la línea. Para solucionarlo se podría aumentar los grupos de cabinas, pero conllevaría a un número excesivo de paradas.
- Teleféricos mono-cables de doble anillo DLM: Son una variante de las telecabinas en las que se disponen dos cables transportadores paralelos, formando una vía. La gran ventaja es que la gran anchura de la vía confiere una mayor estabilidad frente al viento y la posibilidad de realizar mayores vanos.
- Teleférico tri-cable de movimiento continuo (3-S): Teleférico bi-cable, dos cables portadores (o cables carril), y un cable tractor. El movimiento es continuo unidireccional. Con velocidades elevadas, de hasta 8 m/s.

4.2 Montañas rusas

Para el desarrollo del presente apartado 4.2, se ha usado [10] como fuente de la información y las figuras.

Las montañas rusas son un tipo de sistema de transporte que tiene como finalidad la de entretener a sus ocupantes durante el recorrido, gracias a las altas velocidades, aceleraciones y giros. Son un sistema de transporte aéreo en continuo desarrollo, y muchas de las tecnologías que se usan en las montañas rusas se pueden incorporar a sistemas de transporte de obra civil.

Suelen distinguirse entre montañas de acero o de madera. Las montañas de acero permiten mayores velocidades y acrobacias, mientras que las de madera, debido a las imprecisiones durante la fabricación, ofrece una mayor sensación de inestabilidad.

Las montañas rusas están formadas por el carro, las vías y la estructura portante. Normalmente el carro se une a la vía mediante un sistema de 3 ruedas que le confiere una seguridad máxima contra el descarrilamiento. En la figura 4.5 pueden verse el sistema de 3 ruedas. Las vías suelen ser tubulares, por ser capaces de recibir esfuerzos en cualquier dirección y por el ahorro de material.

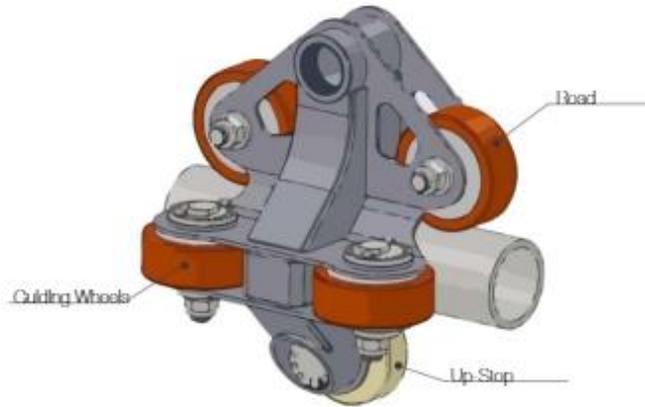


Figura 4.5 Rueda y tubo[10]

Las montañas rusas se basan en el principio de conservación de la energía, es decir, cargan de energía potencial el vehículo en la primera colina (la más alta) y el resto del recorrido se realiza transformando en energía cinética en las bajadas y en potencial en las subidas, por lo que las cimas cada vez serán más bajas debido a la fricción. Ejemplo en la figura 4.6:

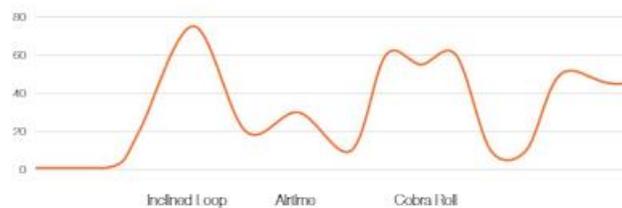


Figura 4.6 Distribución de energía[10]

Para cargar el vehículo y subirlo hasta la cima se utiliza o una cadena o un sistema de lanzamiento. La cadena, accionada por un motor, arrastra el carro hasta la cima de manera controlada mediante un eslabón y una uña, que se desacoplan de manera automática en la zona de la bajada. En la figura 4.7.



Figura 4.7 Eslabón de subida[10]

El sistema más importante de seguridad durante la salida es el sistema de no retorno, que impide que el carro en caso de fallo, rotura de la cadena, por ejemplo, se caiga. El sistema más utilizado puede verse en la figura 4.8 y es el culpable del característico ruido que se escucha en las atracciones durante la subida a la primera cima. Existen otros sistemas como imanes controlados electrónicamente pero no son tan populares.

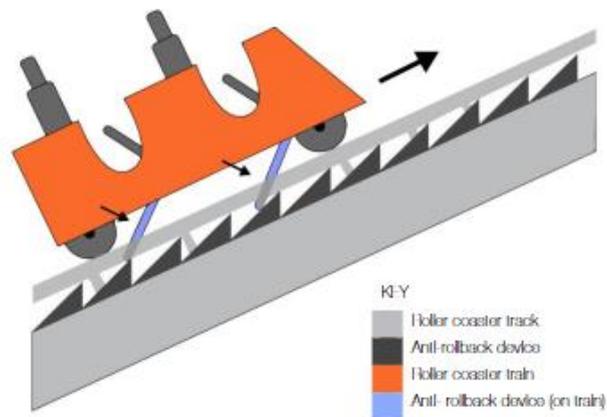


Figura 4.8 Sistema *anti-rollback*[10]

Cuando no se quiere utilizar una cadena o no se quiere colocar una cima al inicio de la atracción se utilizan sistemas de lanzamiento. Los sistemas de lanzamiento tienen como función aportar energía al sistema, normalmente en forma de velocidad. Los sistemas de lanzamiento más utilizados son:

- Neumático: se utiliza aire comprimido para acelerar el vehículo. Bajo mantenimiento, pero muy ruidosos.
- Hidráulico: se utilizan pistones hidráulicos accionados por una bomba. Son muy eficientes, pero requieren mucho mantenimiento y son muy costosos.
- Electromagnético: mismo funcionamiento que un motor eléctrico. Gran eficiencia, se controlan electrónicamente.
- Ruedas de fricción: Ruedas, normalmente neumáticos, accionados por un motor que giran y aceleran el carro. Solución barata y sencilla pero poco eficiente energéticamente. Suelen usarse en los sistemas por cable desembragables.

Los sistemas de lanzamiento también pueden colocarse en la mitad del trazado para acelerar el vehículo y realizar un aporte de energía extra para aumentar la velocidad o escalar una cima más alta.

Al igual que existen sistemas de lanzamiento, también existen sistemas de frenado para reducir la velocidad del carro a la llegada al apeadero. Los dos más utilizados son:

- Frenos magnéticos: utilizan imanes para frenar el carro.
- Frenos de fricción: zapatas o ruedas de fricción que desaceleran el vehículo.

4.3 Trenes y metros ligeros

Para el desarrollo del presente apartado, se ha utilizado [11] como fuente de información.

El tren ligero es un sistema de transporte como el ferrocarril pero que incluye segmentos parcial o totalmente segregados por el tráfico, con carriles reservados o vías apartadas.

Tiene una capacidad media de transporte a escala regional y metropolitana. El tren ligero permite la conexión entre zonas peatonales en núcleos urbanos y zonas rurales, creando además nuevos potenciales de desarrollo urbano.

Es común clasificar los tranvías como un subtipo del tren ligero y no como un tipo particular de transporte debido a las altas similitudes entre ambos.

Un sistema especial de tren o metro es el Transporte Público Guiado (TPG), el cual está totalmente automatizado y los vehículos están dirigidos por un carril-guía. Un caso particular de TPG es el transporte hectométrico, o transporte automático de personas (*Automated People Movers*, APM) muy utilizado en aeropuertos y metros.

Pueden ser monorraíl o duorraíl y pueden estar autopropulsados por motores eléctricos o sistemas de tracción por cable.

En la figura 4.9 puede verse un ejemplo de tren ligero.



Figura 4.9 Ejemplo de Tren Ligero ‘*Beechurst Station*’ de Morgantown Autor: Brian M. Powell

Dentro de los trenes ligeros se pueden diferenciar:

- TRANVÍA

Circula sin separación del tráfico, figura 4.10. Alimentación eléctrica por cable (aéreo o soterrado) o mediante baterías. Más eficiente que el autobús.

Existen tranvías híbridos que pueden adaptar su tensión y vías para circular como tren o tranvía.



Figura 4.10 Tranvía de Vitoria foto tomada por Zarateman

- TREN LIGERO

Es un sistema que gran parte del recorrido se encuentra separado del tráfico parcial o totalmente.

- METRO LIGERO

Derivado del tren ligero. Sistema con vía propia con separación total del tráfico.

4.4 Otros

4.4.1. Hyperloop

Toda la información del presente apartado está extraída del documento oficial de Elon Musk [12], figuras incluidas.

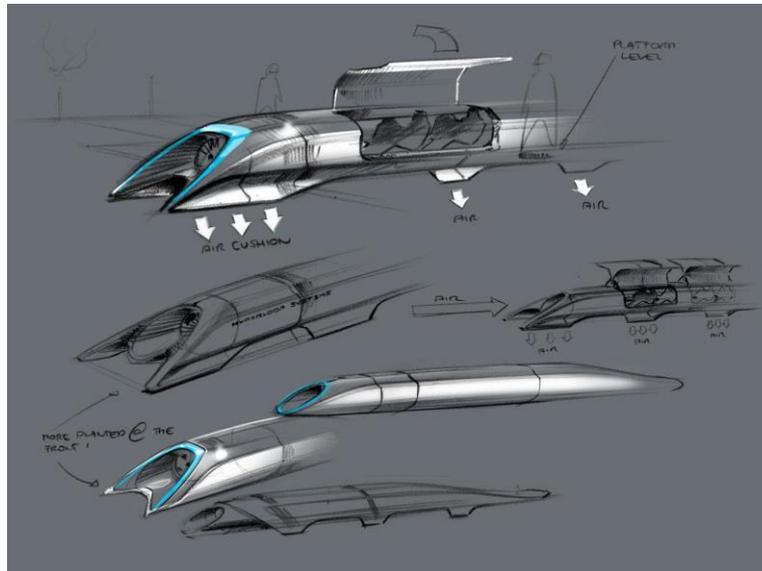


Figura 4.11 Boceto cabina Hyperloop [12]

Elon Musk desarrolló un nuevo sistema de transporte denominado ‘Hyperloop’, en la figura 4.11 puede verse un ejemplo de uno de los croquis de la cabina.

El sistema, que busca desbancar al tren y a los aviones supersónicos en distancias menores a los 1500 km, está compuesto por un tubo a baja presión de acero reforzado, soportado por pilares de 6 m de altura y con una luz de 30 m, y un carro, con un compresor en el morro para eliminar el límite de Kantrowitz (evitar la compresión del aire debido a la alta velocidad del vehículo). La velocidad de diseño es de 1200 km/h, cercana a los 1235 km/h de la velocidad del sonido.

El carro es acelerado con un sistema electromagnético de lanzamiento, como el de las montañas rusas, donde el rotor se encuentra en el carro y el estator en el tubo, y posteriormente se desplaza por el tubo utilizando el propio aire como sistema de suspensión de baja fricción.

Elon busca con este sistema solucionar una serie de inconvenientes que a día de hoy existen en la media distancia:

- Más seguridad.
- Más rápido.
- Bajo coste.
- Más conveniente.
- Inmune a las condiciones climatológicas.
- Sistema sostenible.
- Resistente a terremotos.
- De bajo impacto durante el recorrido.

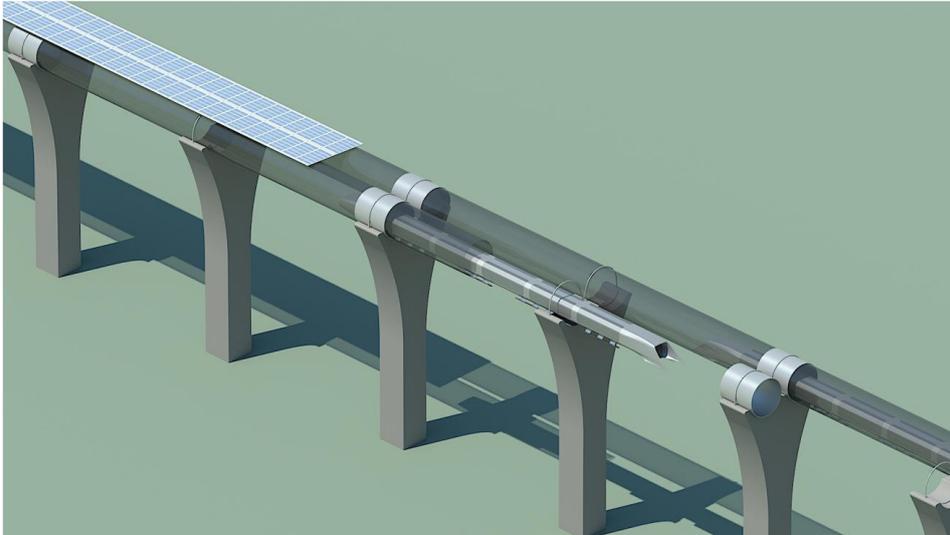


Figura 4.12 Boceto estructura Hyperloop[12]

Los apoyos disponen de amortiguadores para proteger al Sistema de deslineamientos en caso de terremoto, figura 4.12. Todo el transporte está alimentado por paneles solares encima del tubo que aportarían energía suficiente para que el transporte fuese 100% autónomo.

4.5 Selección

A la hora de seleccionar las diferentes tecnologías se deben tener presente todos los objetivos y requisitos anteriormente planteados.

4.5.1. Transporte por tubo sobre pilares

Aunque el Hyperloop es muy novedoso y se está desarrollando por todo el mundo, es un sistema económicamente inviable de realizar en este caso. Además, debido a la corta distancia y los bajos requerimientos de velocidad, el efecto de la fricción del aire o de las vías no suponen unas pérdidas importantes, por lo que es injustificable el uso de esta tecnología de forma completa.

Sin embargo, varias de las características del Hyperloop sí pueden aprovecharse mediante un sistema por tubo sobre pilares:

- **Tubo:** La utilización de un tubo permite que el sistema funcione independientemente de las condiciones atmosféricas y sirve de protección auxiliar frente a descarrilamientos u otros accidentes. Además, si el material que se selecciona ofrece una buena insonorización, reduciremos el impacto ambiental del transporte. Un sistema por tubo es visualmente futurista y llamativo cumpliendo con las necesidades de impacto visual. Si el tubo es parcialmente transparente evitaremos la utilización de pantallas como en el caso del Hyperloop.

- Pilares: La utilización de pilares en altura reduce drásticamente el coste del proyecto, evitando el soterramiento y, al mismo tiempo, prácticamente eliminamos el impacto al tráfico de peatones y personas. La selección de una luz adecuada es imprescindible.

4.6 Cable portante-Vías-Otros

Respecto a cómo se va a soportar el peso del vehículo a lo largo del recorrido, las tres posibilidades más utilizadas y sencillas son:

- Cable portante: Como ya se vio en las telecabinas, el cable portante es una solución económica de soporte cuando no se necesitan altas velocidades de transporte y la flecha puede ser alta. Si se necesitan flechas pequeñas, hay que añadir un sistema de tensionado que aumentaría los costes. Es más inestable.
- Vías carril: Solución muy utilizada en la mayor parte de las aplicaciones como en las montañas rusas o en los sistemas ferroviarios. Es un sistema fiable, que permite grandes velocidades y muy robusto. Puede ser mono o birraíl y el riesgo de descarrilamiento es muy bajo.
- Tubo portante + Ruedas: Otra posible opción es utilizar el tubo como estructura portante y guía para unas ruedas colocadas en la periferia de la cabina. Es un sistema más inestable que la utilización de vías o carriles, pero es utilizado en el diseño de Elon Musk.

Debido a que el tubo debe ser parcialmente o totalmente transparente para permitir el paso de la luz, la utilización de un tubo portante haría muy complicada la realización del proyecto y muy cara. Por ello, la viga portante será un elemento separado del sistema y sostendrá el peso del tubo y del vehículo.

La opción más óptima en este caso, es la utilización de un sistema birraíl.

4.6.1. Sistema de tracción

En los sistemas de tracción existen dos tipos de tracción básica: autopropulsados o traccionados de manera externa.

- Los sistemas autopropulsados aumentan la flexibilidad y la robustez del sistema, pero, en cambio, encarecen drásticamente el coste del sistema, tanto por aumentar el peso del vehículo (aumentado el coste estructural) como por el aumento de componentes.
- Los sistemas traccionados de manera externa reducen el peso de los vehículos y el número de componentes. Normalmente suele ser un cable o un sistema de lanzamiento.

El sistema elegido para el trabajo será un sistema híbrido, tendrá un sistema de lanzamiento para aportar la velocidad necesaria de embrague y subirlo a la altura de transporte, minimizando la fuerza que tiene que soportar el cable, y una tracción por cable con pinza desembragable que

permita dar seguridad y flexibilidad al sistema, permitiendo parar y almacenar las cabinas en las estaciones.

4.6.2. Sistema eléctrico

Desde el punto de vista de impacto ambiental, el sistema debe de ser eléctrico y sostenible. Se necesita flexibilidad a la hora de poder cambiar de fuente de generación por lo que la energía eléctrica es la más adecuada.

El uso del sistema va a ser diurno mayoritariamente, aunque se analiza con más profundidad más adelante, por lo que la utilización de placas solares fotoeléctricas puede ser una solución perfecta, pues se aprovecha toda la superficie superior del tubo que no se utiliza. Esta idea está basada en el Hyperloop de Elon Musk.

4.6.3. Sistemas de seguridad

La seguridad es un elemento primordial, por lo que se deben tener en cuenta una serie de soluciones durante el diseño que permitan que el sistema sea seguro:

- Frenos de emergencia: Todos los vehículos deben disponer de un freno mecánico de emergencia que desembrague el carro y frene.
- Anti-Retorno: Todas las subidas deben llevar un sistema anti-retorno para evitar que en caso de fallo eléctrico o mecánico el carro se caiga. Todas las bajadas deben llevar un sistema anti-caída para evitar que, en caso de fallo de las zapatas, el vehículo caiga por su propio peso.
- Giróscopo y acelerómetro: Es una solución muy sencilla y barata que permite detectar muchos problemas, y entrar en modo emergencia, como un carro que se ha desembragado por accidente o una velocidad diferente a la teórica.
- Cámara interior con sistema de comunicación: una cámara de control en cada vehículo es indispensable para poder gestionar una situación de emergencia. Además, evita actos vandálicos.
- Otros: sensorización de asientos y cinturones, control de paso en el vehículo, puertas externas para evitar caídas a la vía, control de acceso mediante tarjeta UVa, sistemas de control de posicionamiento externo del carro, detección de obstáculos...

Capítulo 5 CÁLCULOS

En este capítulo se van a realizar todos los cálculos preliminares que permitan realizar un diseño preliminar adecuado.

Uno de los problemas principales a la hora de diseñar un proyecto, es la integración de los diferentes sistemas y una aproximación inicial cercana a la realidad para reducir el número de iteraciones.

Por ello, primero se calcularán los diferentes parámetros que aseguren un correcto confort de los clientes, después, se calcularán las fuerzas involucradas en el proceso, luego los equipos y electrónica, el sistema eléctrico y posteriormente el estructural.

De manera paralela se llevará un diseño del sistema en 3D utilizando CATIA V5[13].

5.1 Confort

El confort en los sistemas de transporte es uno de los requisitos más importantes, y que más va a condicionar el diseño posterior. Esto es debido a que un sistema que no es confortable va a ser discriminado en relación con otros sistemas de transporte más confortables.

5.1.1. Confort por aceleraciones

Las aceleraciones son una de las variables que pueden crear disconfort en un sistema de transporte. Existen diferentes aceleraciones como son:

- Transversal: perpendicular al movimiento.
- Longitudinal: en dirección del movimiento.
- Vertical: perpendicular al movimiento.

De acuerdo con las fuentes [14]–[16], la aceleración transversal, que normalmente es centrífuga, es la más limitante de todas a la hora de diseñar un sistema de transportes, pues una aceleración superior a 1.5 m/s² [16] creará disconfort entre los pasajeros. La aceleración centrífuga tiene como fórmula:

$$(2) \quad \mathbf{Ac} = \frac{v^2}{R}$$

La aceleración centrípeta va a condicionar, por lo tanto, el radio máximo de giro en las curvas para nuestra velocidad. Con una velocidad nominal de 15 m/s, el radio máximo es de 150 m. Para reducir el radio máximo, se suele realizar un peralte en las curvas. Un peralte es una diferencia en la altura entre el interior y el exterior de una curva. Con un peralte de 7.5 grados, el radio máximo a velocidad nominal es entonces 100 m despejando en la fórmula:

$$(3) \quad \mathbf{Ac} = \frac{v^2}{R} - \frac{h}{S} g$$

Donde h es la diferencia en altura, S la distancia entre vías y g la aceleración de la gravedad.

La aceleración vertical es la más tolerada, y va perpendicular al plano que forman los dos railes. La tendremos en las curvas peraltadas pegando a las personas al asiento y en los cambios de nivel debido a la fuerza centrífuga.

Limitará los radios en las curvas y la velocidad de cambio de desnivel, 11 m/s^2 [14] genera disconfort en el 90% de las personas, pues sobrepasa la fuerza de la gravedad y hace que las personas se despeguen de los asientos.

En la figura 5.1 puede verse que aceleraciones en torno a la gravedad empiezan a generar alta cantidad de disconfort.

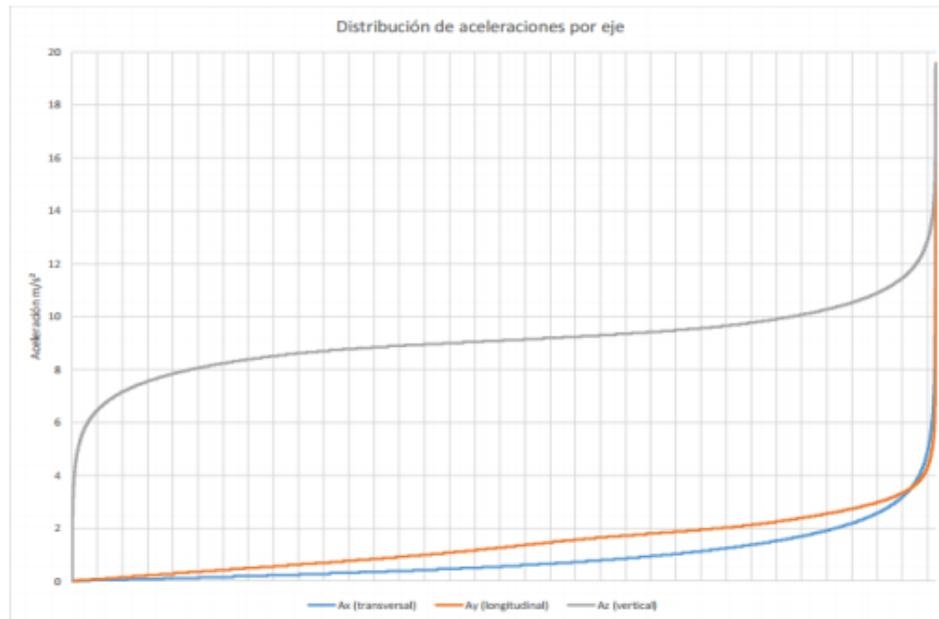


Figura 5.1 Aceleraciones y confort [14]

Se decide limitar la aceleración vertical hasta un medio de la gravedad. Con la fórmula de la aceleración centrífuga se llega a unos valores de velocidad en los cambios de nivel de 3 m/s y un radio de cambio de altura de 4 m .

La aceleración longitudinal se da durante las aceleraciones y frenazos del sistema. Las aceleraciones positivas longitudinales en un automóvil pueden alcanzar los 7 m/s^2 , como en el Ferrari F450, y las aceleraciones negativas (deceleraciones) suelen darse durante un frenazo brusco y pueden alcanzar valores de -6.4 m/s^2 . Para calcular la deceleración brusca anterior se ha partido de un vehículo que necesita 196 m , de media, para frenar totalmente cuando va a 180 km/h (50 m/s).

Una aceleración negativa brusca de un vehículo no es confortable, por ello, y ante la imposibilidad de hallar valores empíricos de niveles de disconfort, se toma una deceleración de 2.7 m/s^2 como deceleración de diseño.

Por lo tanto, durante las aceleraciones en las estaciones y hasta alcanzar la altura de transporte, para alcanzar los 3 m/s (con una aceleración de 0.25 m/s^2) Necesitaremos un mínimo de 20 metros (un módulo). Una vez en la altura de transporte, necesitaremos 40 m para alcanzar la velocidad nominal. (lo mismo durante las deceleraciones, pues por simetría y simplicidad se han tomado iguales)

Con todas estas aceleraciones calculadas, ya se puede diseñar la estructura alámbrica del sistema de transportes con las velocidades y curvas en cada tramo. En la siguiente figura 5.2 puede verse el trazado final. En azul, tramos de aceleración, en rojo, tramos de deceleración y en verde, zonas de velocidad constante. Las estaciones se han marcado con un punto.

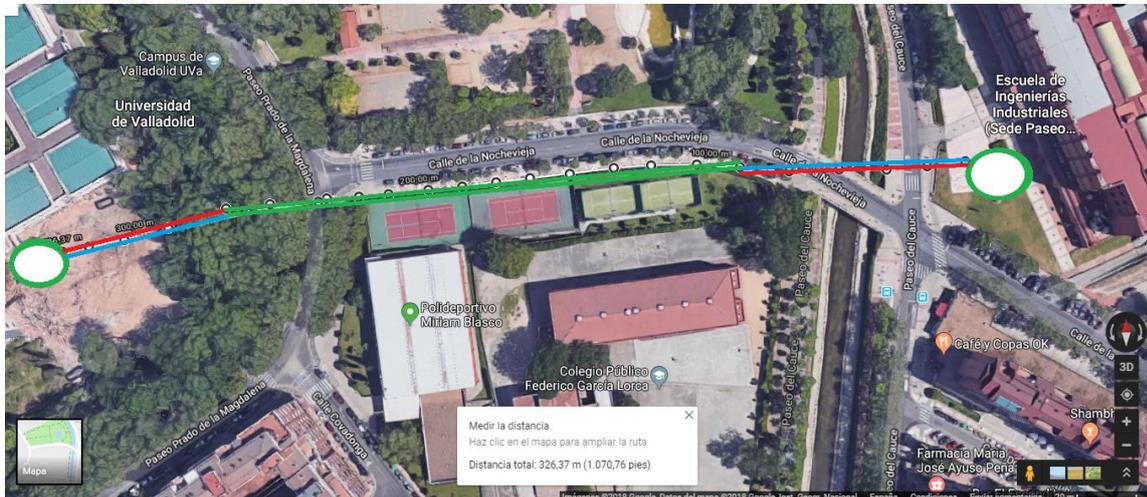


Figura 5.2 Recorrido y trazado final

En la imagen puede verse claramente que el recorrido es prácticamente recto con ningún giro de menos de 100 m de radio. Cada punto está espaciado alrededor de 12 m. La distancia del recorrido se ha recortado hasta los 327 m, esta distancia no tiene en cuenta el tamaño de las estaciones.

5.1.2. Espacio y ergonomía

El sistema de transportes debe estar adaptado para personas con sillas de ruedas, eso significa que la puerta debe tener un ancho de, al menos, 0,8 m. Se realizan unas puertas de 0,9 m. Así mismo, para que la silla de ruedas pueda girar con facilidad, se tiene que disponer de al menos 1 m x 1,5 m en el interior. En este caso, para cumplir con el espacio sin aumentar demasiado las dimensiones del vehículo, se decide colocar asientos plegables que permitan aportar 1,3 m x 2 m en el interior del habitáculo.

Respecto a la ergonomía de los asientos, y basándome en el estudio de [10] los asientos se colocarán a una altura de 0,4 m, con una profundidad de 0,42 m y un alto y ancho del respaldo de 0,5 m. Los asientos deberán ser mullidos con cinturón de seguridad y plegable para colocar la silla de ruedas.

Otro de los aspectos importantes en el confort es la altura y la sensación de claustrofobia. Elon Musk lo solventa mediante el recubrimiento del vehículo con pantallas. En este caso, como el tubo es transparente y se transporta en presión atmosférica, la colocación de grandes ventanas

para abrir el espacio y una altura de 2 m en el interior, mitigarán el efecto de claustrofobia y permitirán disfrutar de una experiencia más estimulante durante el trayecto.

5.1.3. Confort acústico

Al no disponerse de motor en el vehículo, los niveles de ruido durante el transporte se reducen notablemente, por lo que no es una variable que vaya a influir en el diseño del sistema.

5.1.4. Confort térmico

El confort térmico es una de los parámetros más importantes a tratar en el confort en viajes de larga duración, pero debido a la corta duración de este desplazamiento, 1 minuto, se ve innecesario la inversión necesaria en calefactar o refrigerar el sistema. El propio tubo con aire y vehículo forman un buffer térmico que regulará los cambios de temperatura ligeramente.

5.2 Análisis de fuerzas

Para poder estimar correctamente los equipos necesarios para que funcione el sistema, se necesita saber las fuerzas necesarias en cada momento sobre el vehículo y el sistema.

En la figura 5.3 se puede ver el vehículo ya diseñado siguiendo los parámetros calculados en el apartado 5.1 sobre el confort. En la figura 4.4 aparece el trineo inferior y en la figura 5.5 el esqueleto estructural del vehículo.



Figura 5.3 Vehículo 3D

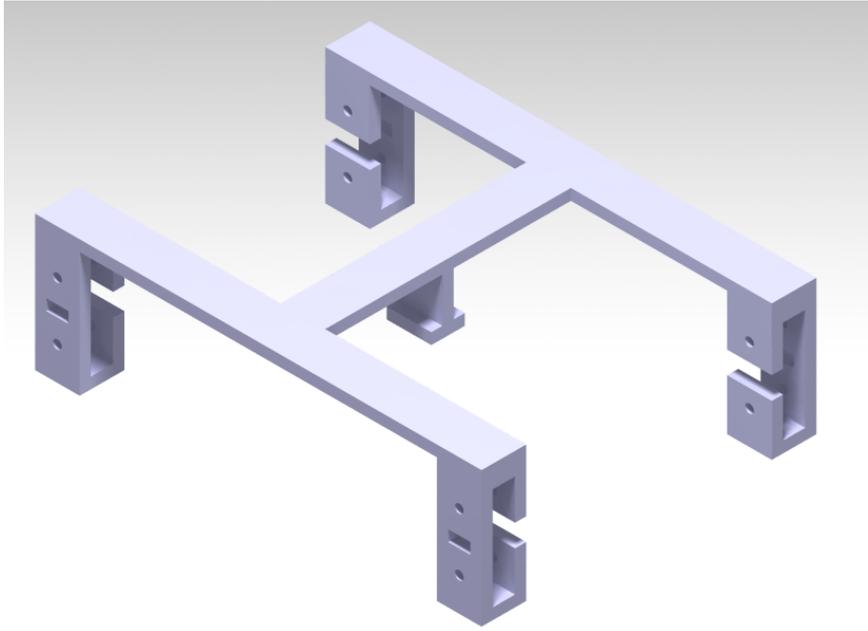


Figura 5.4 Trineo



Figura 5.5 Estructura vehículo

En la tabla 5.1 pueden verse los pesos una vez diseñado en CATIA y aplicado los materiales. Puede verse que el peso total del vehículo es de 1444 kg.

Tabla 5.1 Pesos vehículo

Vehículo	Masa (kg)
Estructura	432
Cristal	30
Tapa trasera	25
Puerta y tapas laterales	195
Asientos	40
Trineo con ruedas y pinza	270
Electrónica	2
Personas	400
Equipamiento	50
TOTAL	1444

El peso del vehículo puede reducirse en la versión final del proyecto, se ha realizado un sobredimensionado de la estructura para tener margen frente a cambios.

Por consiguiente, las fuerzas que actúan durante el transporte horizontal serán:

- PESO y NORMAL (N).
- ROZAMIENTO CON LAS VIAS
- ROZAMIENTO CON EL AIRE
- ACELERACIONES o DECELERACIONES
- TENSIÓN DEL CABLE

A continuación, se analizan mediante figuras, las fuerzas que actúan sobre el vehículo en cada situación.

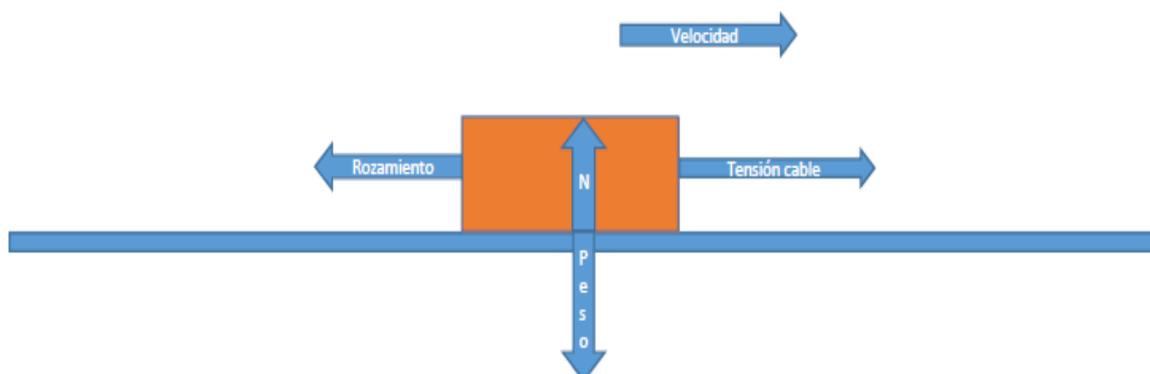


Figura 5.6 Fuerzas situación horizontal

En la situación horizontal, figura 5.6, a velocidad nominal, la tensión del cable sólo debe suplir la fuerza necesaria para vencer el rozamiento.

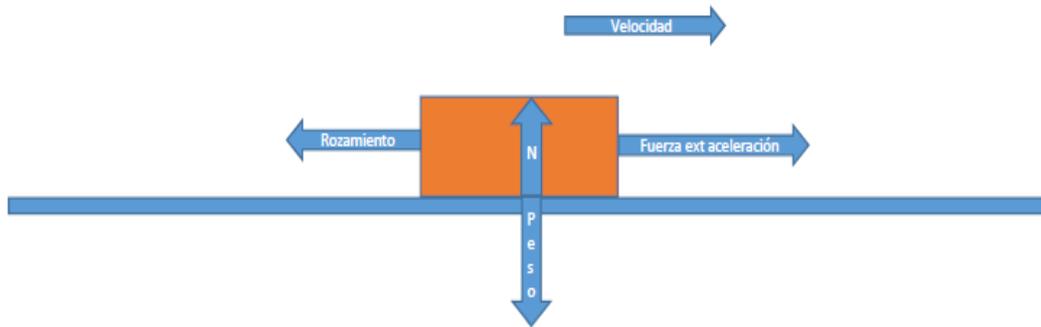


Figura 5.7 Fuerzas horizontal aceleración

En el caso de los tubos horizontales de aceleración, figura 5.7, la fuerza externa deberá suplir las fuerzas de rozamiento y, además, aportar la aceleración necesaria al vehículo para alcanzar la velocidad nominal.

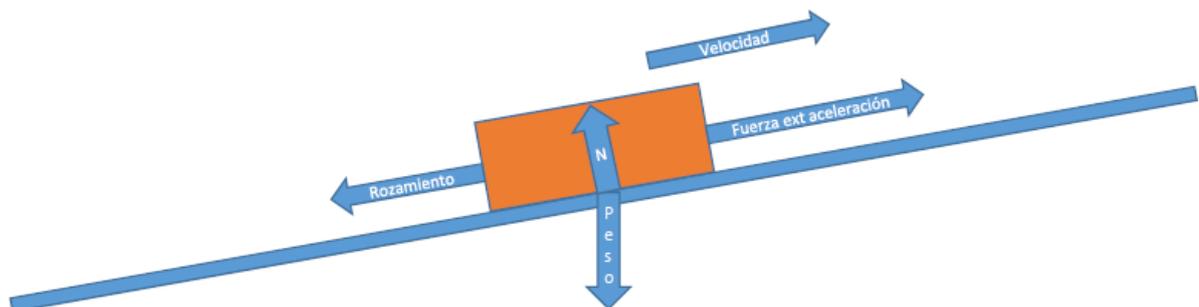


Figura 5.8 Fuerzas inclinadas

En el tubo de aceleración inclinado, figura 5.8, la fuerza externa suplir el rozamiento, aporta la aceleración necesaria al vehículo y, además, la componente del peso que tiene la misma dirección y sentido que el rozamiento.

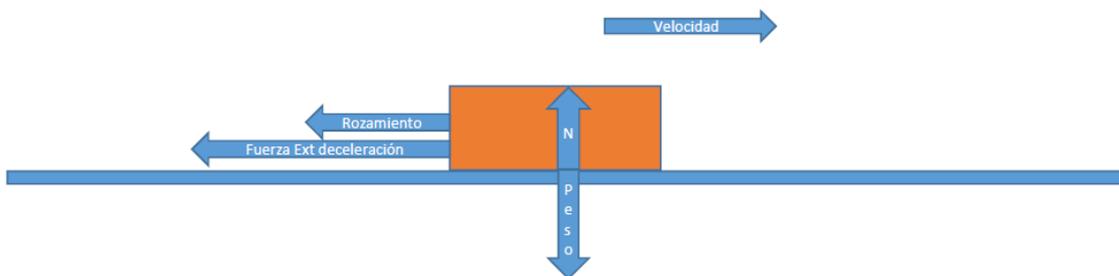


Figura 5.9 Fuerzas deceleración

En el caso de los tubos horizontales de deceleración, figura 5.9 la fuerza externa deberá suplir la fuerza necesaria para decelerar el vehículo con una deceleración de 2.7 m/s^2

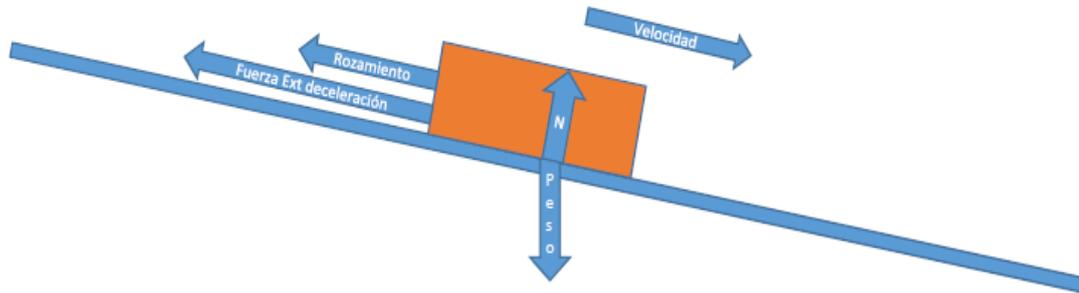


Figura 5.10 Fuerzas declinado

En el tubo de deceleración declinado, figura 5.10, la fuerza externa y el rozamiento aportan la fuerza suficiente para neutralizar la componente de la fuerza en dirección a la velocidad y decelerar el vehículo según lo diseñado.

El peso se conoce y es 14440 N. La tensión del cable deberá aportar la fuerza necesaria para mantener una velocidad constante en el vehículo supliendo las pérdidas de energía por rozamiento (por diseño el cable no se encarga de acelerar y decelerar el vehículo, esto permite alargar notablemente la vida del cable pues se reducen los esfuerzos bruscos y la frecuencia de los mismos).

5.2.1. Rozamiento con las vías

La fuerza de rozamiento es la fuerza que existe entre dos superficies en contacto y se opone al movimiento relativo entre ambas superficies. Es un fenómeno presente en todos los medios de transporte. En este caso, las ruedas y el tubo, figura 5.11, tienen un punto de contacto Teflón-Acero, pues las ruedas son de teflón y el tubo es de acero. En la tabla 5.2 puede verse el coeficiente de fricción entre diferentes materiales.

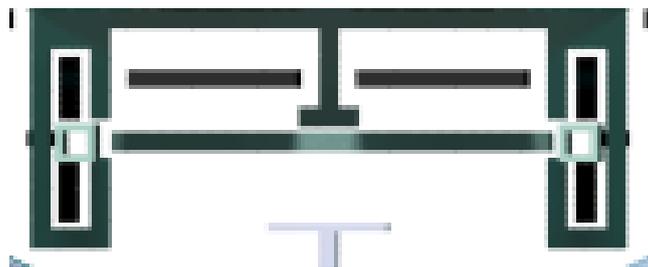


Figura 5.11 Contacto Ruedas-Carril

Tabla 5.2 Coeficientes de fricción [17]

Materiales	Coef. de Fricción Estática μ_s	Coef. de Fricción Cinética μ_k
Acero - Acero	0.74	0.57
Aluminio - Acero	0.61	0.47
Cobre - Acero	0.53	0.36
Latón - Acero	0.51	0.44
Cinc - Hierro colado	0.85	0.21
Caucho - Concreto	1.0	0.8
Madera - Madera	0.25-0.5	0.2
Vidrio - Vidrio	0.94	0.4
Cobre - Vidrio	0.68	0.53
Hielo - Hielo	0.1	0.03
Teflón - Teflón	0.04	0.04
Teflón - Acero	0.04	0.04

La fórmula que relaciona la fuerza de rozamiento por fricción con el coeficiente dinámico es:

$$(4) \quad Fr = N\mu$$

El coeficiente de fricción dinámico, por lo tanto, para nuestro transporte es de 0.04. Para la fuerza Normal más desfavorable (14440 N) la fuerza de fricción es de 566.7 N. En el caso del vehículo en las rampas de aceleración y deceleración, el rozamiento con las vías será de 550 N pues las rampas están diseñadas con una inclinación de 14 grados.

5.2.2. Rozamiento con el aire

El rozamiento con el aire es, de hecho, de mayor valor normalmente que el rozamiento con el suelo, sobretodo en vehículos de alta velocidad. Tiene como peculiaridad que depende directamente de la velocidad, de las condiciones atmosféricas del aire y de la forma del vehículo.

El desplazamiento con el aire creará una fuerza de arrastre, en contra del movimiento y denominado rozamiento, y otra fuerza perpendicular, normalmente llamada empuje, y que puede tener valor positivo o negativo [18] (En los aviones tiene valor positivo y se usa para elevarlo, mientras que en un F1 se utiliza para pegarlo al asfalto, y tiene signo negativo).

La fórmula la fuerza de arrastre es:

$$(5) \quad \text{FuerzaArrastre}(N) = Cd \frac{1}{2} v^2 \rho St$$

Donde Cd es el Coeficiente de arrastre, v es la velocidad relativa con respecto del aire en m/s, ρ la densidad del aire en kg/m³ y St la superficie total en m². Análogamente, la fuerza de empuje será:

$$(6) \quad \text{FuerzaEmpuje}(N) = Ce \frac{1}{2} v^2 \rho St$$

Donde C_e es el Coeficiente de empuje.

Se desprecia el efecto del empuje debido a la baja velocidad y a la magnitud del resto de fuerzas. La velocidad máxima se conoce, así como las condiciones atmosféricas del aire medias en Valladolid. La densidad será de $1,225 \text{ Kg/m}^3$ de aire.

Por lo tanto, falta por calcular el coeficiente de fricción del vehículo. Debido a la geometría tan compleja se decide usar un programa de cálculo CFD (*Computational Fluid Dynamics*, Dinámica de Fluidos Computerizada). Existen numerosos programas como ANSYS u OPENFOAM, pero debido a los altos tiempos de simulación de estos sistemas, el alto coste de los mismos y que se trata de un anteproyecto, se decide usar *Flow Design* de Autodesk[19] con licencia de estudiante gratuita.

En la siguiente figura 5.12 puede verse la fuerza resultante y el coeficiente de arrastre una vez configurado con la velocidad nominal y la densidad. La fuerza de rozamiento será 411 N y el coeficiente de arrastre de 0,83.

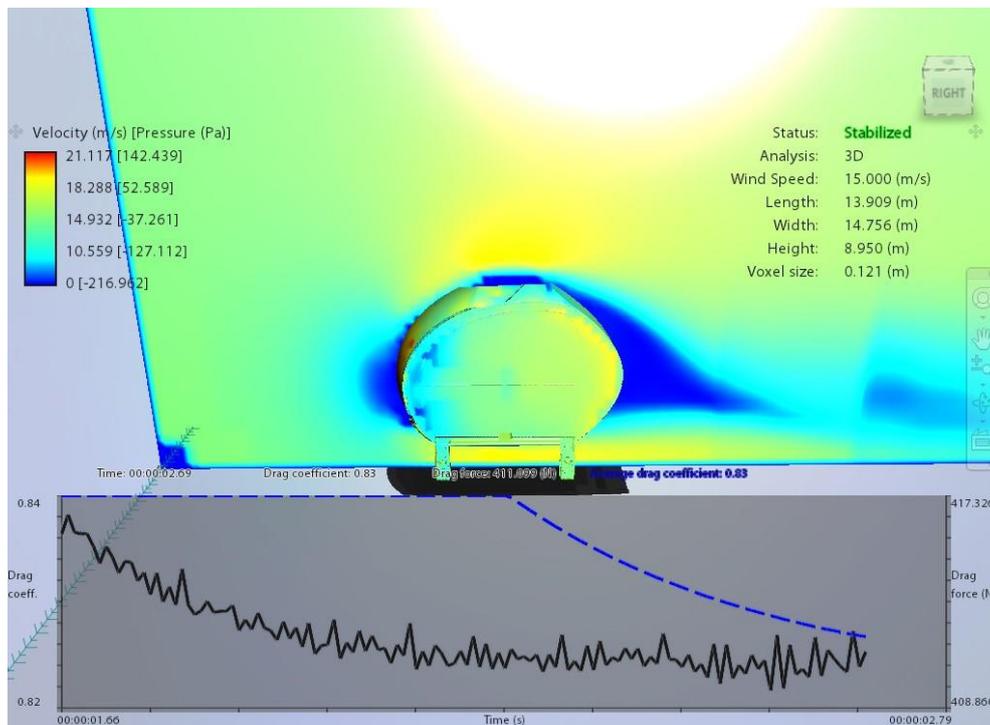


Figura 5.12 Análisis CFD

En la imagen puede verse la convergencia de la simulación a lo largo del tiempo.

Para una velocidad menor a la nominal, la fuerza se reducirá mucho, debido a que la velocidad está al cuadrado, siendo de 16,44 N para una velocidad de 3 m/s.

5.2.3. Cálculo de fuerzas

Con las aceleraciones calculadas en el apartado de confort y el rozamiento, sólo falta analizar el sistema en la posición horizontal e inclinada, las rampas tienen un ángulo de 14 grados. Todas las fuerzas se encuentran en Newtons.

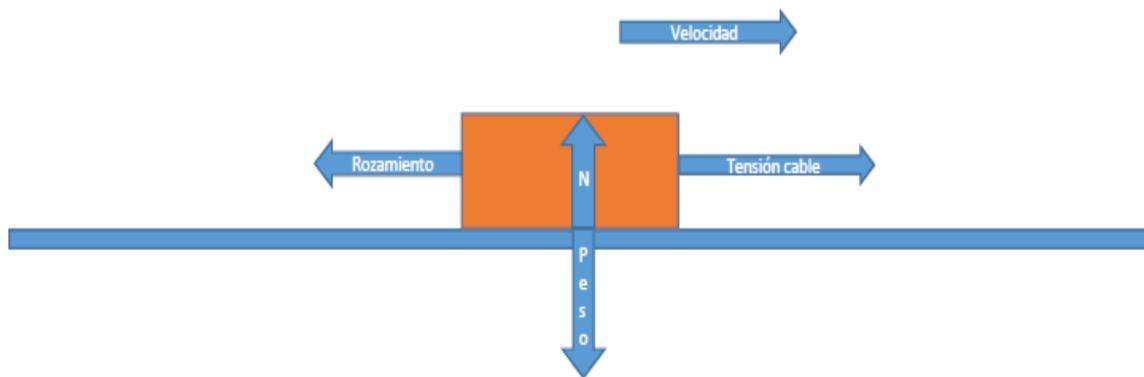


Figura 5.13 Fuerza horizontal

Para el caso horizontal, figura 5.13, se necesitará de acuerdo con la tabla 4.3 Una fuerza externa de 977,6 N que deberá aportarla el cable.

Tabla 5.3 Fuerzas situación horizontal

+Fuerza aceleración	0 N
+Rozamiento horizontal	566,63 N
+Rozamiento aire	411 N
FUERZA TOTAL	977,63 N

En los tramos horizontales de aceleración y deceleración serán las ruedas y zapatas de fricción las responsables de aportar la fuerza externa.

En la tabla 5.4 se encuentra el cálculo horizontal de aceleración y en la tabla 4.5 la deceleración.

Tabla 5.4 Fuerzas situación acelerada

+Rozamiento horizontal	566,63 N
+Fuerza aceleración	3898,8 N
+Rozamiento aire	411 N
FUERZA TOTAL	4876,43 N

Tabla 5.5 Fuerzas situación decelerada

-Rozamiento aire	411 N
+Fuerza deceleración	3898,8 N
-Rozamiento horizontal	566,63 N
FUERZA TOTAL	2921,17 N

Cuando el vehículo está inclinado, el cable está desembragado, y la fuerza necesaria externa la aportarán las ruedas de fricción o las zapatas de fricción.

En la figura 5.14 puede verse el diagrama de fuerzas durante la aceleración inclinada y en la figura 5.15 durante una deceleración inclinada.

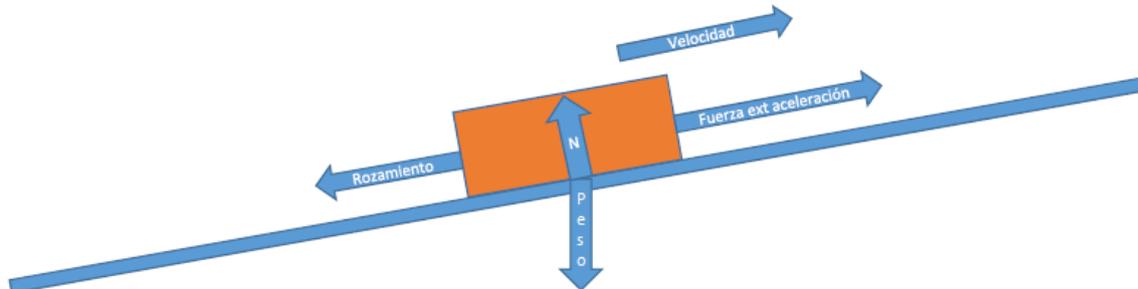


Figura 5.14 Fuerzas situación inclinada

En la tabla 5.6, se ha calculado la fuerza externa necesaria en la aceleración y en la tabla 5.7 durante la deceleración.

Tabla 5.6 Fuerzas situación inclinada

+Rozamiento aire	16,44 N
+Fuerza aceleración	324,9 N
+Rozamiento inclinado	549,8 N
+Componente del peso	3427 N
FUERZA TOTAL	4318,12 N

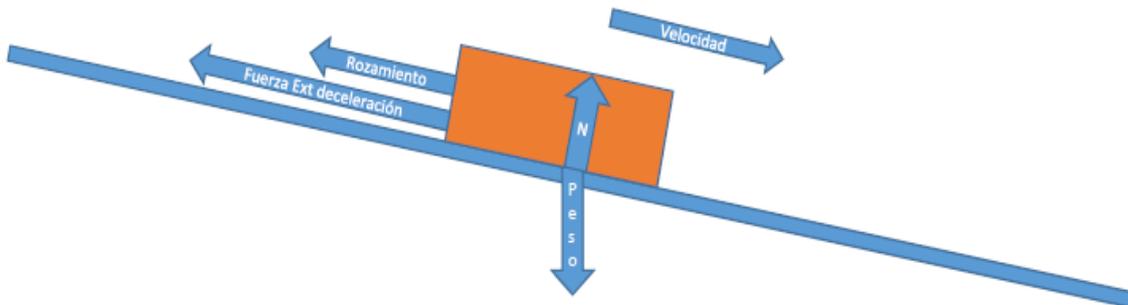


Figura 5.15 Fuerzas declinada

Tabla 5.7 Fuerzas declinadas

-Rozamiento aire	16,44 N
-Rozamiento inclinado	549,8 N
+Fuerza deceleración	324,9 N
+Componente del peso	3427 N
FUERZA TOTAL	3186 N

Con todas las fuerzas calculadas ya se puede hacer una estimación de los equipos necesarios.

5.3 Elementos electrónicos

Debe existir una red de diferentes equipos (sensores, controladores y actuadores) que permitan que el sistema funcione correctamente.

5.3.1. Sensores en el vehículo

La sensorización interior debe permitir asegurar un correcto confort y seguridad interior. Para ello, se ve necesarios los siguientes sensores, tabla 5.8:

Tabla 5.8 Sensores vehículo

VEHÍCULO
GPS
Compas
IMU (Unidad de Medición Inercial)
LiDAR (<i>Light Detection and Ranging</i>)
Amperímetro
Voltímetro
Temperatura
Humedad
Encoder puerta
Fin de carrera
Sistema de comunicación
Sistema de video vigilancia

El sistema de video vigilancia y comunicación permite detectar actos vandálicos y emergencias por el equipo de control. Para ello, se necesita una cámara, un micrófono, una pantalla, un controlador y un altavoz (todo ello conectado a un transmisor receptor).

Por simplicidad, y porque no se necesita video de calidad, se elige 2.4 GHz (protocolo ETHERNET Wifi).

Existen numerosos equipos que ya funcionan con esta frecuencia, es fácil de configurar y de colocar diferentes nodos y repetidores de señal, haciéndola bastante robusta. Un pequeño transmisor receptor de 433 MHz podría añadirse para que, en caso de emergencia, cuando la red wifi no funcione, pudiese actuar los frenos o enviar una señal de emergencia.

Debido a la dificultad que existe para estimar el consumo y peso de los sensores mayoritarios que se necesitan colocar en el vehículo se selecciona la placa Pixhawk que dispone ya de muchos de esos sensores. APM además reducirá el coste al ser una solución ampliamente

utilizada, y de código libre, en el diseño de vehículos autónomos (QUAD, Aviones, Submarinos, Rovers...)

De acuerdo con [20], [21] y [22], Pixhawk es la versión actualizada del controlador APM que acabó quedando obsoleto. Ha sido desarrollado por Ardupilot[23] y 3DR. 3DR fabrica el original, pero debido a que es Open Source hay multitud de otras empresas que fabrican Pixhawk. En la figura 5.16 puede verse la placa con sus distintas características.



Figura 5.16 Controlador [20]

La placa tiene las siguientes características:

Procesador

- 32-bit ARM Cortex M4 core con FPU
- 168 Mhz/256 kB RAM/2 MB Flash
- 32-bit co-procesador a prueba de fallos

Sensores

- MPU6000 principal acel y gyro
- ST Micro 16-bit giroscopio
- ST Micro 14-bit acelerometro/compas
- MEAS barómetro

Energía

- Varios sistemas de seguridad y de protección en las entradas y salidas.

Salidas/Entradas

- 5x UART
- Spektrum DSM/DSM2/DSM-X
- Futaba S.BUS entrada
- PPM sum
- RSSI (PWM o Voltaje) entrada
- I2C, SPI, 2x CAN, USB
- 3.3 y 6.6 ADC entradas

Dimensiones

- Peso 38 g
- Ancho 50 mm
- Altura 15.5 mm
- Longitud 81.5 mm

Pixhawk y sus clones permiten un gran rendimiento con muchas funciones configurables y muchos módulos de expansión para añadir sensores. La placa tiene varios sistemas duplicados para aumentar la seguridad como un segundo procesador. Así mismo, se puede dar potencia a la placa de tres formas diferentes: mediante USB, mediante la entrada de potencia o utilizando los pines de entrada de los servos. Esto permite añadir redundancia y asegurar de que Pixhawk siempre va a disponer de energía suficiente.

El GPS elegido es el U-Blox LEA 6, figura 5.17, se conecta directamente a la controladora de vuelo y su consumo ronda los 120 mW en modo continuo y tiene una batería que es capaz de funcionar de Back up en caso de algún fallo en la alimentación principal.



Figura 5.17 GPS[20]

Por otro lado, como ya se expresó en el apartado correspondiente, el sistema de telemetría funciona a 433 MHz, se ha elegido el sistema desarrollado por Pixhawk, a modo de ejemplo, figura 5.18.



Figura 5.18 Telemetría a 433Mhz[20]

Como se puede ver en la Figura 5.18, el sistema de telemetría consta de dos receptores-transmisores. Uno de ellos irá conectado a la placa controladora mientras que el otro irá conectado en el ordenador. Para la conexión se utiliza el protocolo *MAVLINK*.

Tiene una potencia máxima de 100 mW pero puede ajustarse dependiendo de los requerimientos, disminuyendo la potencia consumida.

Los receptores son los encargados normalmente de dar las señales de control a los servos y drivers, pero cada receptor utiliza un método diferente, es por eso que hace falta un sistema que convierta cada uno de los protocolos utilizados al protocolo PPM que es lo que el controlador puede reconocer. Los protocolos empleados son los siguientes:

- PWM: Es el más común y más barato, la longitud del pulso especifica la posición del acelerador o del servo. Normalmente varía entre 1000 y 2000 microsegundos.
- PPM: También llamado PPMSUM o CPPM, solo usa 1 cable de señal para muchos canales (máximo 8 canales normalmente). Una señal PPM es básicamente una señal PWM mandada tras otra, pero cada una modulada diferente.

- PCM: (*Pulse Code Modulation*) es la versión digital del PPM, más caro, pero con menos posibilidades de interferencias.
- Serial: Es un protocolo que utiliza 3 cables (señal, potencia y tierra) para múltiples canales. Incluye el SBUS, XBUS, IBUS y SUMD.

Cabe destacar que el receptor no dará la potencia a los servos o motores del vehículo si no que solo entregará las señales a sus drivers

También debe ser capaz de detectar otro vehículo parado en la vía con suficiente antelación para poder parar. La distancia de frenado en emergencia a 50 km/h para un coche ronda los 24m, lo cual coincide con el tamaño del módulo.

Para detectar los obstáculos, una cabina parada y mantener la distancia de seguridad, se incorpora un LIDAR longitudinal o *Rangefinder* (se denomina así porque se usa para medir distancias) como sensor de seguridad.

Los LIDAR longitudinales se utilizan en numerosas aplicaciones y hay muchos tamaños diferentes, pero se utilizará uno relativamente pequeño y barato.

El LIDAR *Rangefinder* se colocará en posición horizontal y permitirá saber la distancia con respecto otros vehículos de manera que se puede definir una distancia de seguridad para evitar accidentes.

No se necesita un LIDAR que sea capaz de medir grandes distancias, se busca uno que pueda medir 50 m, que sea económico, que no pese mucho y que no consuma mucha potencia.



Figura 5.19 Lightware SF11C[20]

Se elige la compañía Lightware por su buena relación calidad/precio. En concreto el SF11/C, Figura 5.19, que nos permite medir distancias de 120 m con una precisión de 0.1 m.

Además, puede conectarse a la controladora Pixhawk por protocolo I2c, figura 5.20.



Figura 5.20 Conexión LiDAR[20]

Características técnicas

- Peso: 35 g (sin cables)
- Rango: 0.1 - 120 m (objetivos naturales) 2 - 40 m (agua en movimiento)
- Resolución: 0.01 m
- Actualización de la medición: 16 lecturas por segundo
- Precisión: ± 0.1 m
- Salidas & interfaces: Serial, I2C (hasta 400 kHz) & analógica con máxima latencia de 65 ms.
- Voltaje fuente de alimentación: $5.0 \text{ V} \pm 0.5 \text{ V DC}$
- Corriente fuente de alimentación: 200 mA (máximo)
- Potencia del láser: 20 mW (pico), 15 mW (media), Class 1M
- Dimensiones: 30 x 56.5 x 50 mm
- Temperatura de operación: 0 ... 40 °C

Todos estos sistemas van alimentados por una batería de Litio que se cargará de manera automática en las estaciones mediante, por ejemplo, escobillas o incluso inducción.

5.3.2. Sensores en el tubo

El tubo, a su vez, debe de tener una serie de equipos para facilitar la comunicación con los vehículos y asegurar un posicionamiento exacto de los mismos dentro del sistema. Los sensores que debe de tener son:

- Sensor de Voltaje y Amperímetro.
- Repetidor de señal 2.4 Ghz.
- Sensor de posicionamiento del vehículo.

Para poder localizar el vehículo y saber si existe un correcto funcionamiento de los sensores interiores, se podrían colocar 2 sensores inductores en 2 puntos del tubo.

De esta manera, se puede calcular la velocidad del mismo, y tener una posición exacta del mismo cada 12 metros máximo, para saber si los sensores interiores del vehículo funcionan correctamente.

En la figura 5.21 puede verse un sensor inductivo.



Figura 5.21 Sensor inductivo Automation24 II7111 – BasicLine [24]

5.3.3. Sensores en el tubo inclinado

En los tubos inclinados, además de los sensores de los tubos horizontales, hay que añadir otros que nos permitan asegurar la seguridad del vehículo, pues es una zona crítica, al estar la pinza desembragada y depender de los sistemas externos para elevar el vehículo. Los sistemas electrónicos necesarios son:

- Sistema de posicionamiento exacto
- Anti-Retorno
- *Encoder*

Para el sistema de posicionamiento más exacto se pueden utilizar los mismos sensores inductivos de los tubos horizontales pero separados 1 m en vez de 12 m. Esto permite tener un posicionamiento más exacto y poder calcular si las aceleraciones son correctas.

En las ascensiones, y en nuestro caso también descensos, según lo visto al analizar la tecnología de las montañas rusas, debe existir un sistema que evite que el vehículo caiga por su propio peso si el sistema principal falla.

La manera más sencilla en las ascensiones es la utilización de un diente con muelle, en el caso de los descensos, lo más interesante es la utilización de un gancho o diente accionado con un motor.

Los *encoder* en los tubos deben asegurar que el sistema de subida o frenado (los rodillos de fricción, zapatas y cadena dentada) transmiten correctamente la potencia y que el motor o los

elementos de transmisión funcionan correctamente. Existen numerosos tipos de *encoder*, como el de la figura 5.22, pero no es un elemento crítico.



Figura 5.22 Encoder incremental ifm electronic RV3100[24]

5.3.4. Sensores en la estación

En la estación existirán diferentes elementos electrónicos, aunque se pueden agrupar en función de su función:

- Sistemas de control de acceso.
- Sistemas de control del transporte (video vigilancia, sensores y controladores).
- Sistemas de control de potencia del motor.

Los sistemas de control de acceso deben encargarse de verificar las tarjetas de los estudiantes y profesores, controlar el flujo de personas al interior de la esta y al interior de cada uno de los vehículos. Para ello, se necesitan puertas giratorias, cámaras, puertas adaptadas para minusválidos y sensores de presencia de personas y conteo (Para evitar que entren más personas de las que el vehículo permite (4 personas).

Los sistemas de control de transporte se encontrarán recogidos en la sala de control (donde se encontrará la única persona de la instalación). Estará dotada de varios monitores y un ordenador central que procesa la información de la red de sensores y actuadores. Deberá estar dotada de un sistema de intercomunicación y desde ella se debe poder acceder a los caminos de mantenimiento y al foso de revisión de los vehículos.

Al lado de la sala de control, y aislado acústicamente, se debe encontrar el motor de la estación con un *encoder*, una IMU, sensores de par, voltaje y amperaje. Gracias a estos sensores se podrá predecir (mediante las vibraciones del motor) o detectar, fallos en la instalación. Una bajada brusca del par puede significar la rotura del cable o el desembrague de uno de los vehículos de manera accidental, por ejemplo.

Con todos estos requisitos, y teniendo en cuenta las necesidades de estaciones vistosas, se diseñan las dos estaciones del sistema. En la Figuras 5.23 puede verse la estación de la Sede Paseo del Cauce, y en la figura 5.24 la de la sede Mergelina.

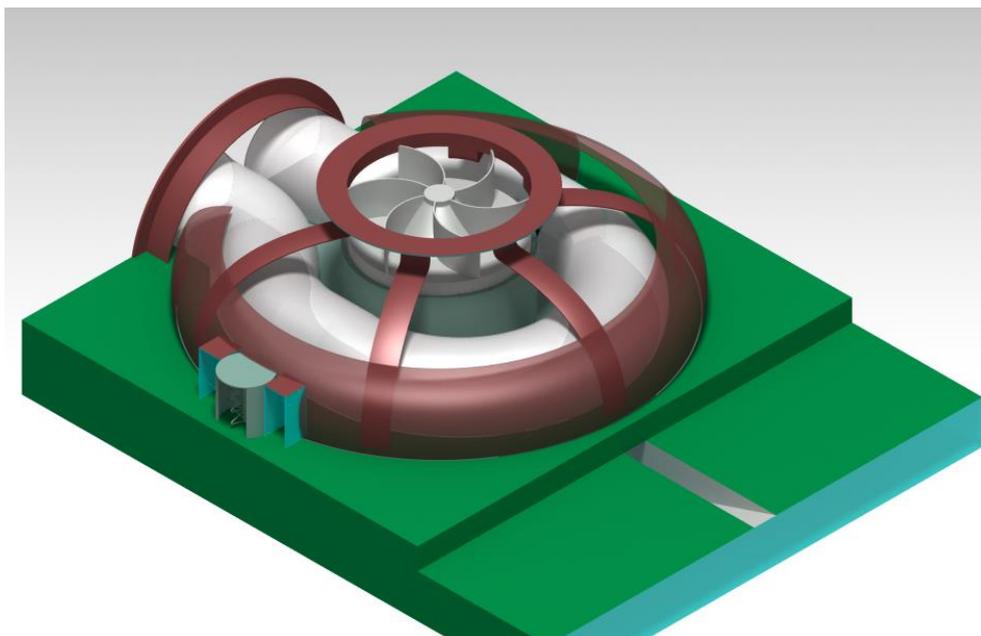


Figura 5.23 Sede Paseo del Cauce 1

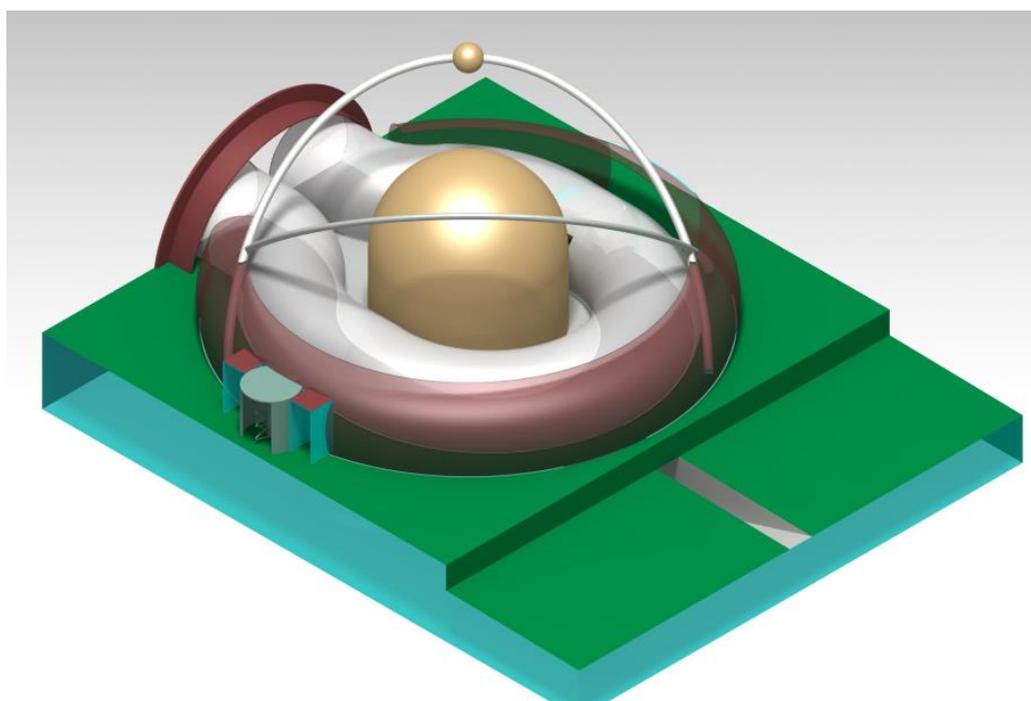


Figura 5.24 Sede Mergelina

5.4 Cálculo de potencia

Una vez definidas las fuerzas que actúan sobre el vehículo y los componentes electrónicos, ya se puede calcular las necesidades de potencia y energía para asegurar que los equipos funcionan

5.4.1. Potencia motores

El sistema tiene una serie de motores en las rampas de aceleración, estaciones y el motor principal que mueve el cable. Para calcular la potencia mecánica neta necesaria, se multiplica la fuerza por la velocidad máxima en cada tramo. En la tabla 5.9 puede verse la potencia neta necesaria en cada tramo (En la potencia del motor del cable, se ha despreciado el peso del mismo).

Tabla 5.9 Potencia neta motores

Elemento	Fuerza (N)	Velocidad (m/s)	Potencia (W)
Tubo acelerador horizontal			
Motores horizontal	4876,42	15	73146,38
Tubo acelerador inclinado			
Motores inclinado	4318,11	3	12954,33
Estación			
Motor cable	977,62	15	17597,26
Motor ruedas estación	566,62	3	1700

Posteriormente, se estima unos rendimientos del 80% en los motores eléctricos. Se eligen motores eléctricos por sus altos rendimientos, bajo mantenimiento y flexibilidad a la hora de elegir la generación de energía y la carga.

La potencia eléctrica necesaria para cada tramo está calculada en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Potencia externa motores

Elemento	Potencia (W)	Potencia externa (W)
Tubo acelerador horizontal		
Motores horizontal	73146.38	91433
Tubo acelerador inclinado		
Motores inclinado	12954.34	16193
Estación		
Motor polea	17597.26	21996.58
Ruedas tubo	1700	2125

A la hora de calcular la potencia necesaria total, hay que tener en cuenta que:

- Sólo puede haber 2 vehículos en las rampas de aceleración.
- Un vehículo en la estación no consume prácticamente energía.

Por lo tanto, la situación más desfavorable se dará cuando haya dos vehículos en las rampas de aceleración y 8 vehículos en tránsito consumiendo una potencia de 359 kW. Sin embargo, los vehículos apenas están 4 segundos en el tubo de aceleración, por lo que, aunque en el proyecto final sí que deben de tomarse en cuenta, por simplicidad, se utilizará el valor estacionario, cuando los 10 vehículos están en tránsito, de 220 kW.

5.4.2. Potencia sensores

Los sensores tienen una alimentación de 5 V, 12 V y 24 V. Para la transformación de energía se utilizan reguladores de voltaje. La estimación de potencia eléctrica necesaria se encuentra recogida en la tabla 5.11

Tabla 5.11 Potencia Sensores

Vehículo	x1 (W)	x10 (W)
Sistema de comunicación	10	100
Puertas (motor + sensor)	20	200
Sensores (APM: GPS, IMU etc)	20	200
Tubo Acelerador Horizontal	x1	x2
Sensores	30	60
Sistema de embrague	100	200
Tubo Acelerador Inclinado	x1	x2
Sensores	30	60
Tubo decelerador	x1	x2
Sensores	30	60
Sistema de desembrague	100	200
Estación	x1	x2
Cámaras	30	60
Altavoces y micro	160	320
Ordenador de control	320	640
Puertas de acceso	600	1200
Sensores(<i>Encoder</i> , tensión cable, amperímetro)	50	100

Se desprecian las pérdidas en los reguladores pequeños.

5.4.3. Potencia total

A la potencia consumida por los motores y por los sensores hay que añadir la potencia de iluminación de la instalación (Sobre todo por la noche). Las necesidades de potencia eléctrica en función de cada zona se encuentran en la Tabla 5.12:

Tabla 5.12 Potencia LEDs

Componente	Por metro	Metros	Potencia	Potencia total
Vehículo			Por vehículo	x10
Luces LED	10	1	100	100
Tubo			Por tubo	x40
Luces LEDS	10	24	240	9600
Estación			Por estación	x2
Luces LED	10	32	320	640

Se eligen LEDs RGB por la posibilidad de alumbrar el tubo y las estaciones con diferentes colores dependiendo de la estación del año y de la fecha a celebrar.

Hay que tener en cuenta que las luces se encienden por la noche y que el resto de componentes funcionan en horario normal de apertura de la universidad, eso significa que hay que tenerlo en cuenta para el cálculo de energía total, pero no en el de potencia total (pues los sistemas que consumen más potencia están apagados).

Con todo esto, las necesidades de potencia total son de 240 kW, y de acuerdo con lo estimado anteriormente de tiempo de utilización del sistema, eso equivale a una energía eléctrica diaria de 480000 Wh/día.

5.4.4. Generación de potencia

A la hora de elegir un sistema de generación de potencia, existen muchas posibilidades. En el Siglo XXI, y con los problemas energéticos y medioambientales existentes, se hace indispensable la utilización de fuentes de energía renovables. La fuente de energía debe:

- Producir energía eléctrica, pues se ha decidido no calefactar el sistema (No se necesita energía térmica, esto elimina la posibilidad de utilizar biomasa en un sistema de cogeneración)
- Debe poder colocarse en la instalación y no tener un alto impacto ambiental. (Esta característica imposibilita utilizar aerogeneradores o saltos de agua)

La energía se utilizará mayoritariamente durante el día, de manera alterna (10 minutos cada hora), por lo que se eligen los paneles fotovoltaicos como fuente principal eléctrica. Para poder almacenar la energía producida durante el día se colocarán baterías. En el Anexo 1 se calcula la cantidad de paneles solares, inversores y baterías que necesita el sistema utilizando diferentes valores de energía. El programa utilizado es CalculationSolar.

La opción elegida es 75% producción solar y un 25% generada con un motor alternativo alimentado con biogás o biomasa durante los meses de invierno, y 100% solar durante los meses de verano.

De esta manera, se consigue optimizar la generación de energía y se consigue solventar parcialmente la sobre-generación, y por lo tanto la sobrecapacidad, de energía durante los meses de verano característica de los sistemas fotovoltaicos.

En la figura 5.25 puede verse la generación del sistema y un consumo del 75%.

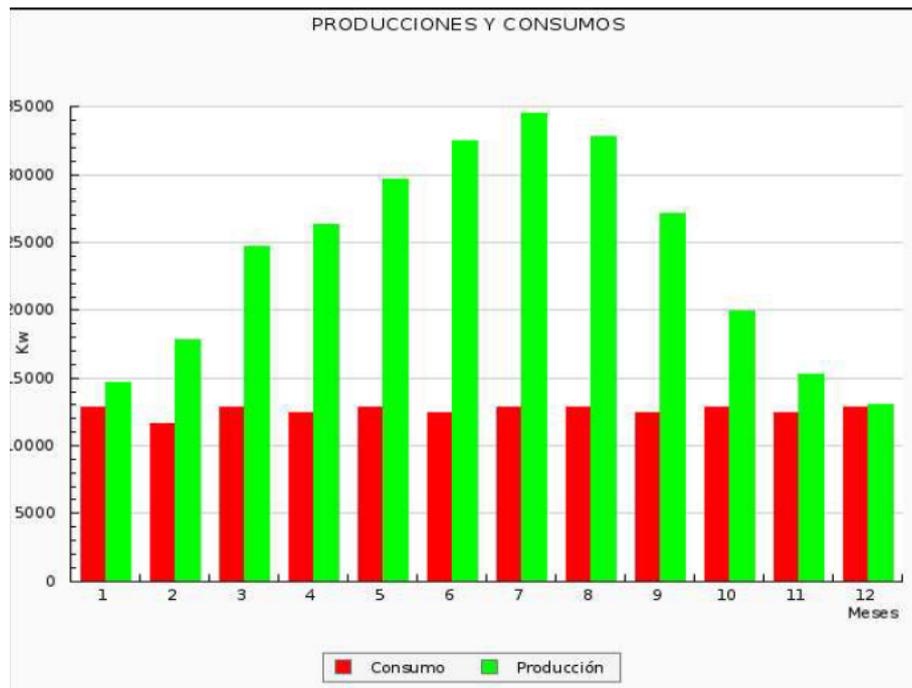


Figura 5.25 Consumos y Producción

En la tabla 5.13 se resume la cantidad de elementos necesarios para conseguir esta generación.

Tabla 5.13 Elementos generación

Unidades	Elementos
768	Modulo tipo -LUXOR Eco line 60/230 W Policristalino
75	Regulador tipo - STECA TAROM 440-48 PWM
24	Bateria tipo - ABSOLYTE GP 1-100G99 FLAT PLATE
5	Inversor tipo -HUAWEI SUN2000 36KTL

Los paneles elegidos para el ejemplo pueden verse en la figura 5.26:



Luxor Eco line 60/230 W

Eficiencia

14.08%

Garantía

Producto garantizado para 10 años.
90% potencia nominal durante 12 años.
80% potencia nominal durante 25 años.

Certificaciones

IEC/TÜV , Protection Class 2

Datos eléctricos

Potencia [Wp]	230.0
V _{mpp} [V]	29.8
I _{mpp} [A]	7.7
V _{ca} [V]	37.0
I _{cc} [A]	8.2
Tolerancia	+1,5/+6,5 Wp
V _{max} [V]	1000.0

Coefficientes térmicos

Coef. P [%/°C]	-0.45
Coef. I [%/°C]	0.05
Coef. V [%/°C]	-0.32

Dimensiones y peso

Largo [mm]	1650
Ancho [mm]	990
Alto [mm]	50
Peso [kg]	21
Área [m ²]	1.63



Luxor, el oro de la energía solar

Los módulos cristalinos Luxor llegan a la península ibérica desde las orillas del río Rin. Luxor, que significa Luz y Valor, tiene un contrato de distribución exclusiva con Krannich. Además de los generadores convencionales, el fabricante germano ofrece módulos de dimensiones reducidas ideales para pequeños sistemas aislados de autoconsumo como la señalización terrestre.

Componentes

Tipo de célula	Policristalino
Número de células	60
Célula [mm]	156
Conector	MC4

Embalaje palet

Unidades por palet	22
--------------------	-----------

Contenedor

Palets	28
Unidades	616

Ref:	KD18362
------	----------------

Figura 5.26 Ficha técnica panel Luxor

La utilización de estos paneles, a modo de ejemplo, permite estimar el peso necesario para soportar los paneles y el área. En la tabla 5.14 se recoge el peso y el área que ocupan. Se colocarán en cada tubo a lo largo de la instalación.

Tabla 5.14 Características panel

Largo (mm)	1650
Ancho (mm)	990
Alto (mm)	50
Peso (kg)	21
Área (m²)	1.63

La utilización de paneles tiene como inconveniente un mayor coste en mantenimiento y la necesidad de colocar trampillas en el techo del tubo para poder realizar la limpieza.

5.5 Cálculo estructural

Con todo lo anteriormente estimado ya se puede hacer una aproximación para saber qué perfiles se necesitan en un módulo de 24 m. Como es un anteproyecto, se realizarán una serie de simplificaciones:

- El tubo y el anillo no son elementos resistentes y sólo actúan sobre la estructura como cargas.
- El tubo está empotrado a sus contiguos, por lo que se desprecia el efecto de las deceleraciones.
- No se considerará carga de viento ni de nieve.
- La estructura de las vías y de soporte del suelo técnico no se tiene en cuenta.

En la tabla 5.15 puede verse un resumen de cargas y su clasificación según sean cargas puntuales, distribuidas o móviles.

Tabla 5.15 Tipos de cargas

Componente	Tipo de Carga	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	Masa unidad (kg para cargas puntuales y móviles y kg/m distribuidas)	Masa total de todas las unidades	N o N/m
Tubo plástico	DISTRIBUIDA	1200	2.654	132.7	132.7	1327
Aro	PUNTUAL	2710	0.282	764.22	764.22	7642.2
Vehículo	MÓVIL	-	-	1444	1444	14440
Panel	PUNTUAL	-	-	21	420	4200
Otros	DISTRIBUIDA	-	-	1	1	10
Cable acero 10mm (6x7+1)	DISTRIBUIDA	-	-	0.357	0.357	3.57

Los cálculos se realizan utilizando SAP2000, el manual [25] y el libro [26]. Se encuentran en el Anexo 2.

En la figura 5.27 se puede ver la estructura final. Cada módulo está compuesto de 2 T en los extremos y una tercera T en el medio.

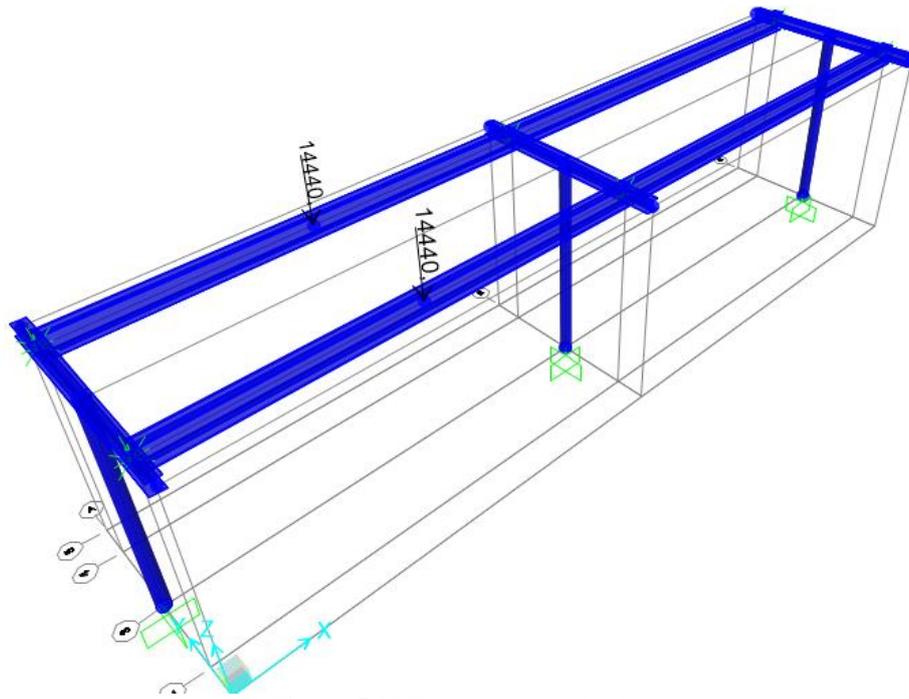


Figura 5.27 Estructura portante

Utilizando un perfil HEB320 en s275 para las vigas de la estructura conseguimos una tensión de 32553376 N/m² admisible y un factor de seguridad de 8,45. Y un perfil tubular de diámetro 323,9 mm con 5mm de espesor en S275 de 6 m para los pilares consiguiendo evitar el pandeo de la estructura, aportándole una estética mejorada respecto a la utilización de un perfil con alas normal.

Existen numerosos análisis que se pueden realizar a mayores para diferentes combinaciones de acciones tanto estáticos como dinámicos, pero eso sería otro TFM diferente y está fuera del alcance de este trabajo.

Para confirmar que una separación de alrededor de 12 m entre pilares es viable, se colocan en el mapa. En la figura 5.28 puede verse la colocación de los puntos.

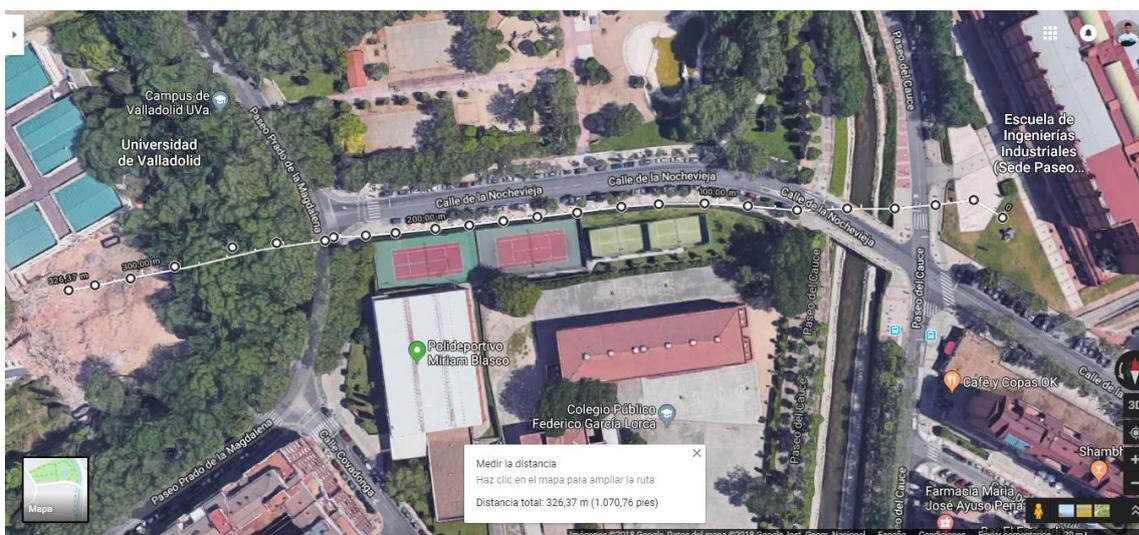


Figura 5.28 Colocación de pilares

Capítulo 6 DISEÑO PRELIMINAR

En el presente capítulo se mostrará el diseño preliminar que se propone, una vez realizados todos los cálculos del trabajo.

6.1 General

A continuación, pueden verse los modelos 3D del diseño, a modo de ejemplo, de 3 módulos y las dos estaciones diseñadas, Figura 6.1 y 6.2. Se han primado los blancos, cobres, cristal y dorado dando un aspecto futurista. El sistema podría alargarse tanto como se quisiera, e incluso incorporar estaciones intermedias gracias a su diseño modular.

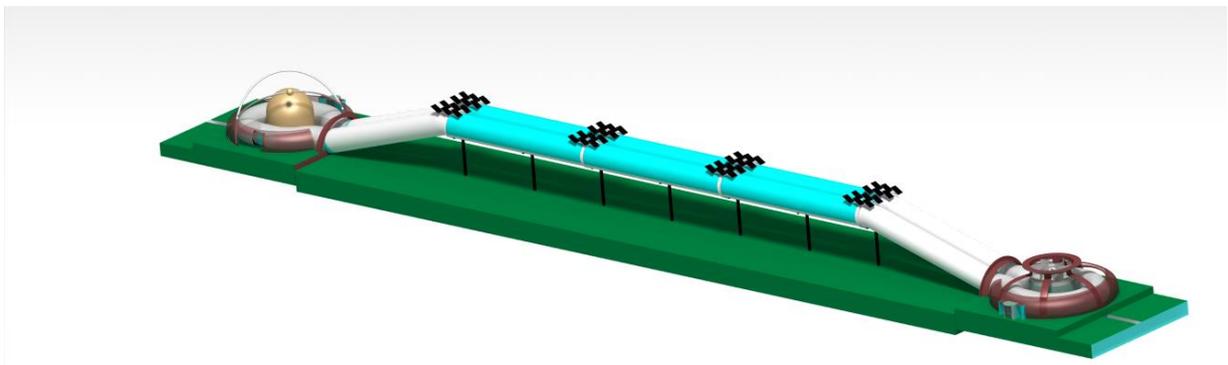


Figura 6.1 Diseño final general

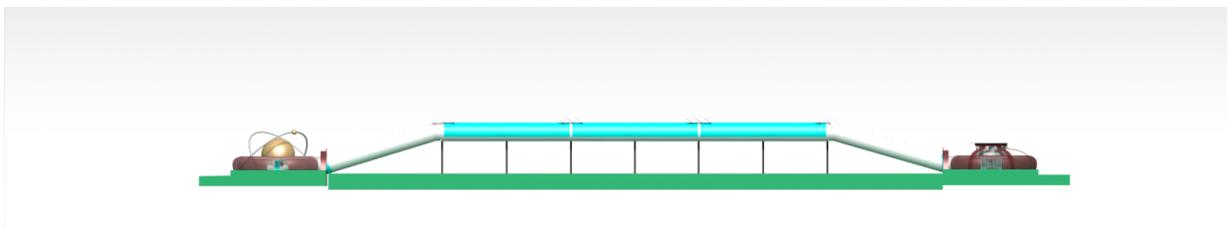


Figura 6.2 Diseño final general II

Para facilitar la visualización de los vehículos, las vías y los carriles transitables de emergencia se oculta el cristal en la figura 6.3. Se opta por un color negro de las zonas por debajo del vehículo para minimizar las necesidades de limpieza de las instalaciones. A simple vista puede apreciarse la espectacularidad y lo llamativo del sistema de transporte.

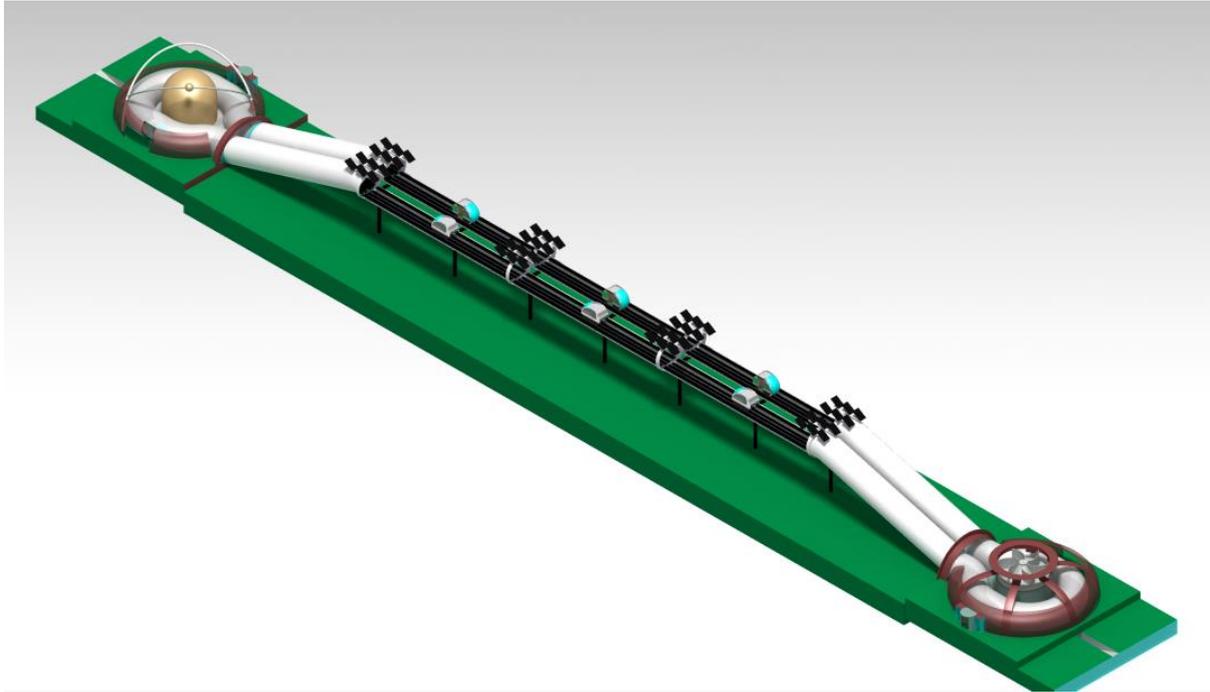


Figura 6.3 Diseño general sin tubo

6.2 Estación Paseo del Cauce

A la hora de diseñar las estaciones, se ha tenido en cuenta dos criterios: espectacularidad y fácil construcción. Como el lugar donde se encuentra la estación paseo del Cauce, coincide con el lugar actual de una turbina hidráulica, se ha decidido diseñar la estación como si fuese una turbina hidráulica centrífuga deconstruida, Figuras 6.4 y 6.5.

La estructura curvada cobriza está construida de metal para que sea fácilmente doblada y soldada. El tubo que aloja los vehículos es de plástico blanco translúcido. El rodete está fabricado de fibra para minimizar su peso.

La salida y la entrada están diferenciadas y separadas, ambas con sistemas de control acceso como es la puerta giratoria y dos pasillos adaptados para sillas de ruedas con doble puerta.

El edificio central, que se accede por la puerta subterránea que puede verse en la figura 6.6, es donde se encuentra el motor y la estación de control y está recubierto de hormigón cara vista. Desde ese edificio se tiene acceso a los caminos de emergencia de los tubos para las tareas de mantenimiento. Además, en esa misma figura, puede verse el foso de reparación de los vehículos. El cuadrado principal de terreno es de tamaño 20 m x 20 m.

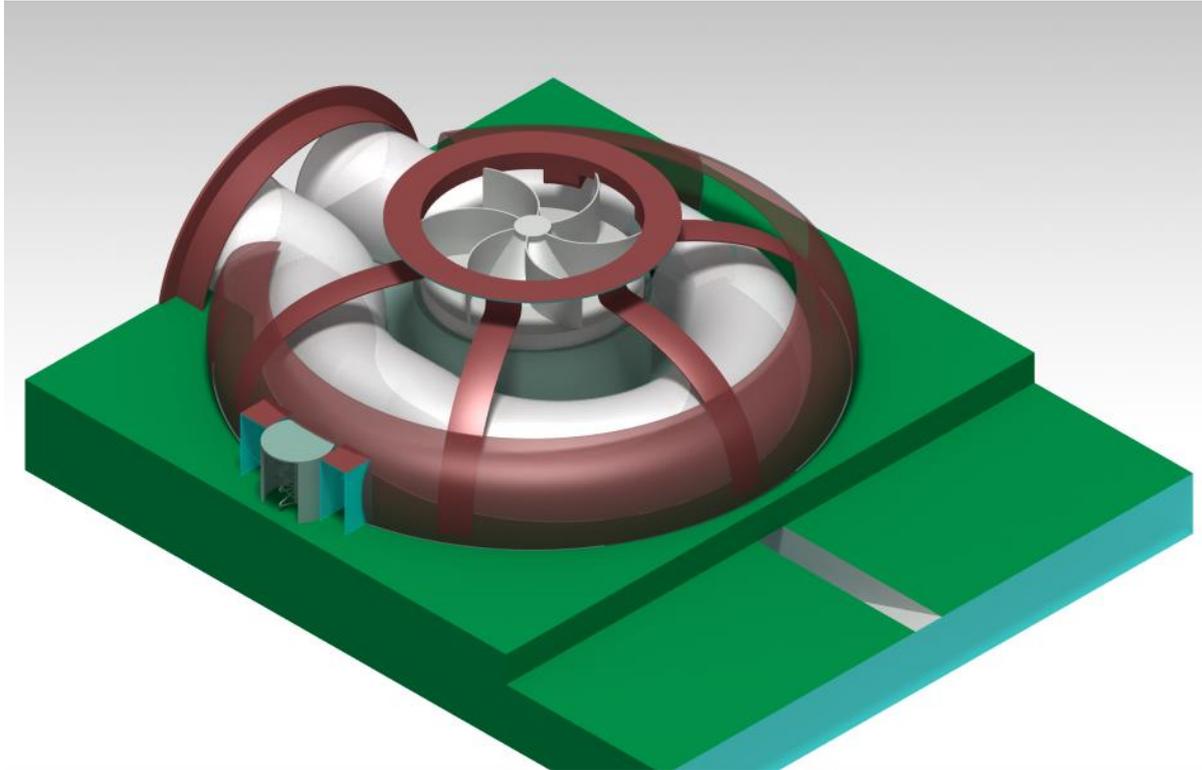


Figura 6.4 Estación Paseo del Cauce

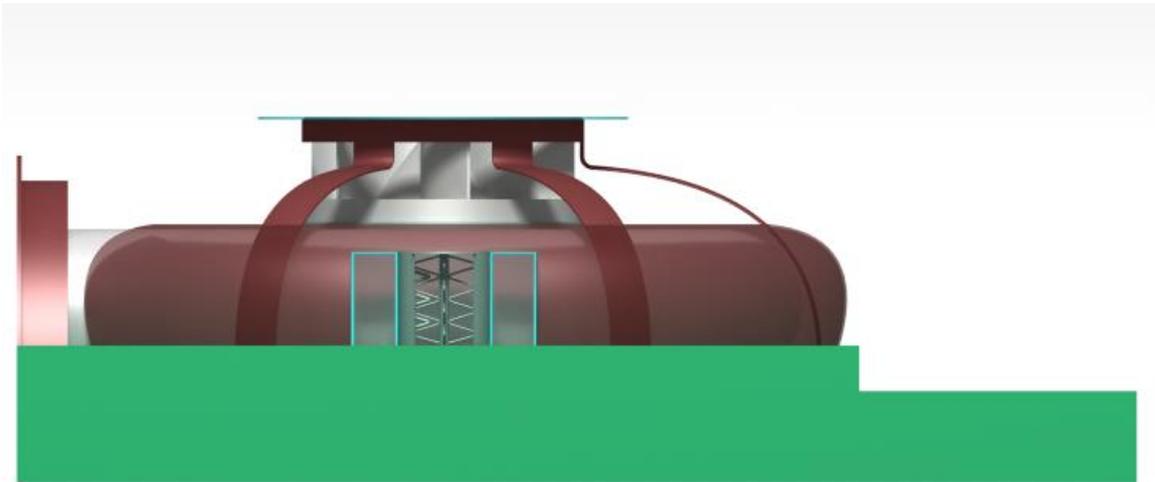


Figura 6.5 Estación Paseo del Cauce II

Se debe colocar cerca del foso de reparación una parte de tubo que se pueda eliminar temporalmente para la extracción de algún vehículo.



Figura 6.6 Foso y zona de entrada

6.3 Estación Sede Mergelina

La estación de la Sede Mergelina está inspirada en uno de los muchos campos que tiene la ciencia y la ingeniería en común: la astronomía. Con este diseño tan llamativo de un planeta con anillo se ha querido recordar el antiguo uso del edificio, ciencias, y del nuevo, ingeniería. Figuras 6.7 y 6.8

Se usan los mismos materiales para la construcción de esta estación. Los anillos se construyen de perfiles tubulares de metal pintados de blanco y el satélite y el planeta se construyen de fibra y se pintan con pintura dorada. Los anillos y el planeta podrán recubrirse de LEDS si se quiere un alto impacto visual por la noche. El cuadrado principal de terreno es de 20 m x 20 m

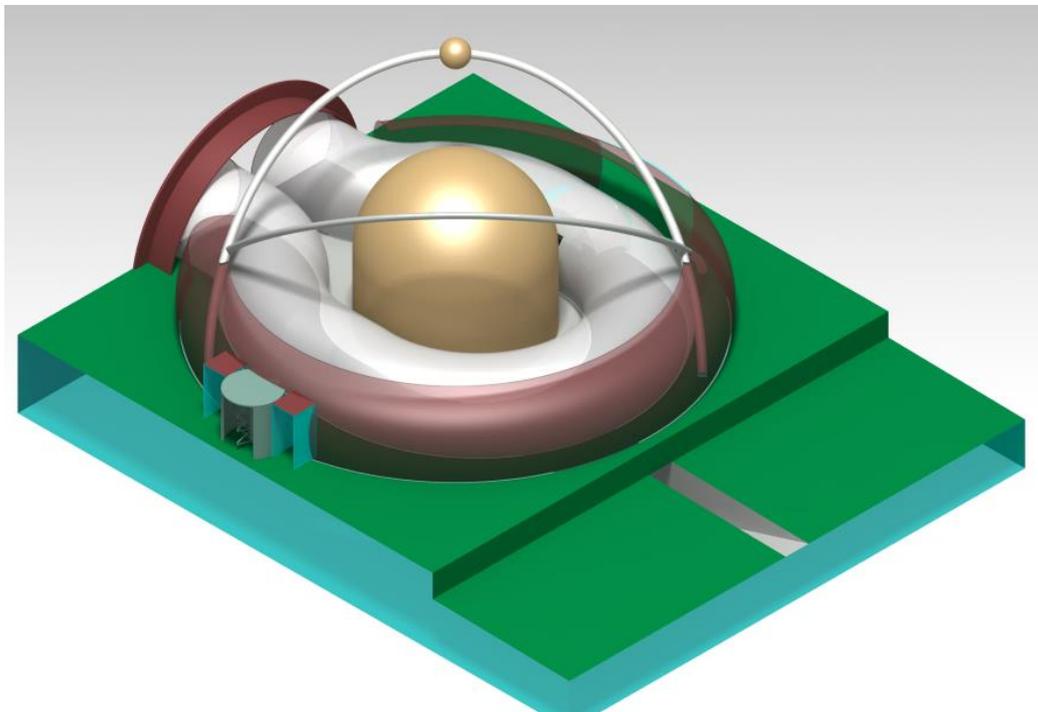


Figura 6.7 Estación Sede Mergelina

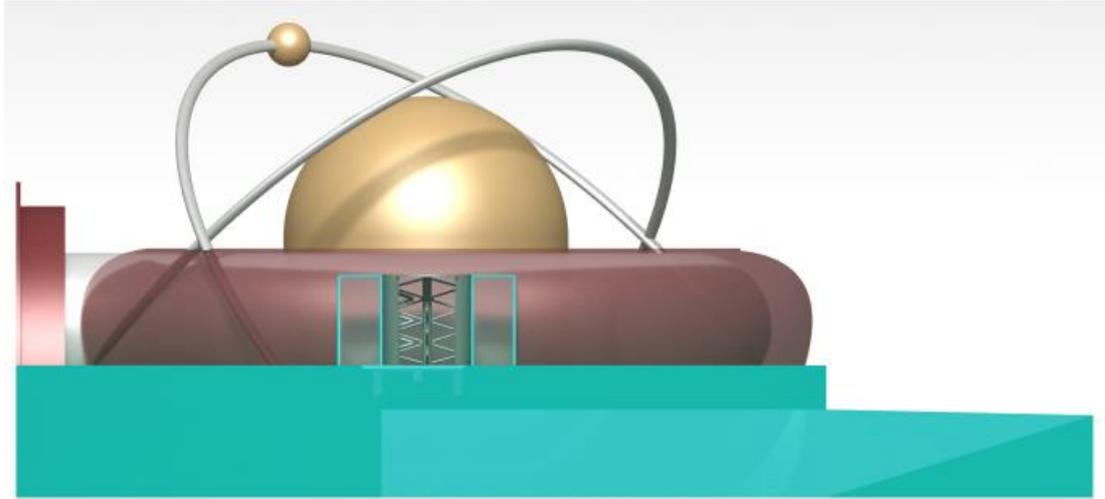


Figura 6.8 Estación Sede Mergelina II

6.4 Módulo horizontal

Los módulos horizontales miden 24 m largo y están apoyados sobre tres T estructurales separadas 12 metros. En la figura 6.9 se ha ocultado el tubo transparente para facilitar la visualización. Todos los módulos tienen un anillo de conexión a sus extremos que le facilita empalmar con otros módulos. En estos anillos, como puede verse, se han colocado los paneles solares que alimentan el sistema de transporte y se encuentra la trampilla para su limpieza.

Toda la zona interior e inferior al vehículo se ha diseñado con colores oscuros para minimizar la limpieza y ocultar los elementos mecánicos a los clientes. El suelo técnico está dividido en 4 secciones y es accesible para labores de mantenimiento. El suelo además permite evacuar a personas en caso de avería.

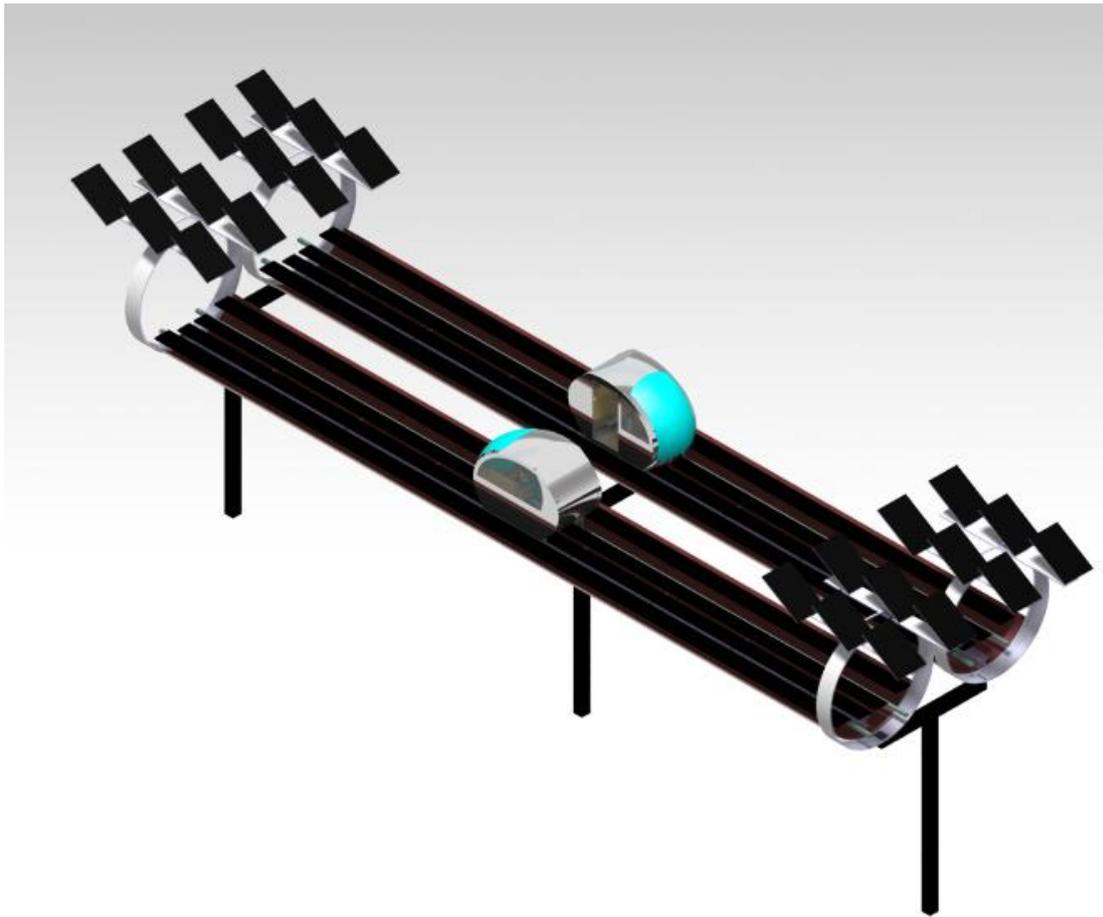


Figura 6.9 Módulo horizontal desnudo

En la figura 6.10 puede verse la vista lateral del módulo. Puede apreciarse que el módulo no es transparente por debajo del vehículo, sino que es opaco y de color exterior blanco. Se ha elegido este diseño para ocultar los componentes mecánicos y dar la sensación exterior de que el vehículo levita. Es un diseño minimalista.

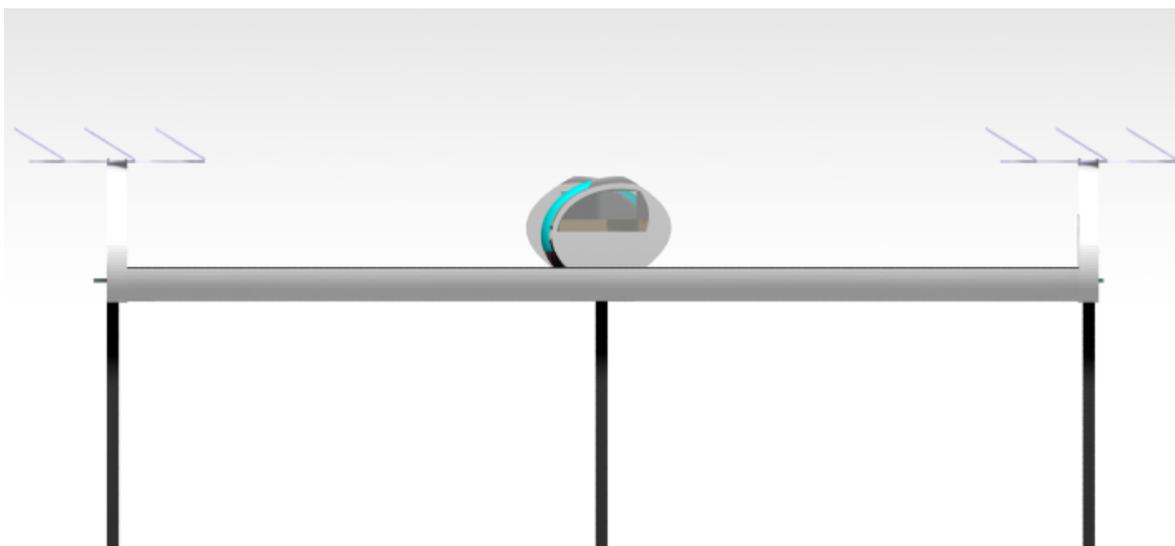


Figura 6.10 Módulo horizontal vista lateral

En la figura 6.11 puede verse el módulo con el tubo transparente.

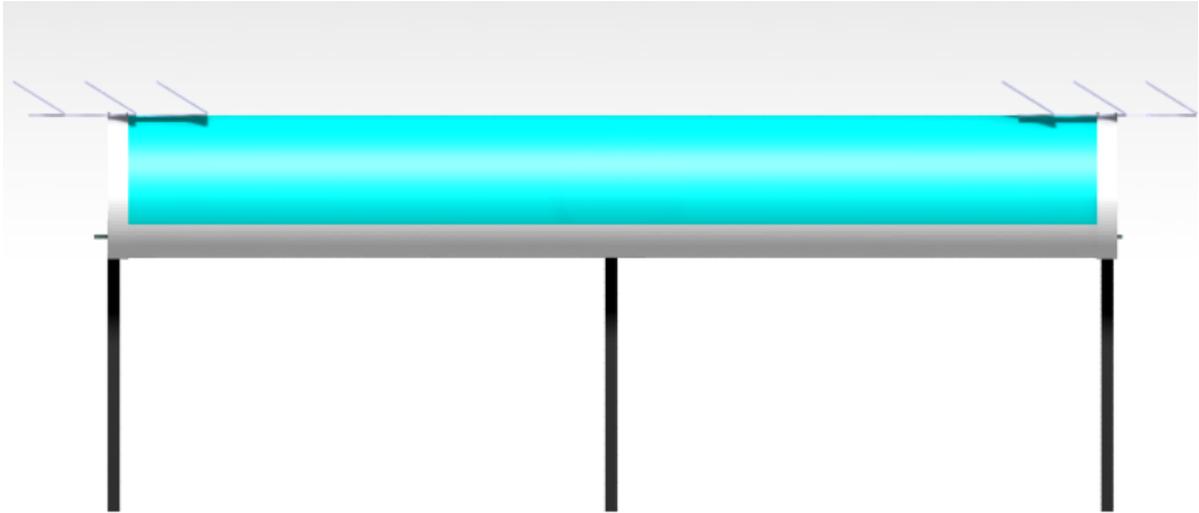


Figura 6.11 Módulo horizontal

En la figura 6.12 se ve la vista frontal del módulo, en ella se puede ver la T, el aro y las vías del vehículo. El trineo inferior diseñado en metal, dispone de 3 ruedas de teflón ajustables con muelle, que permiten minimizar la holgura y sujetan al vehículo en todas las direcciones que no sea la longitudinal, eliminando el riesgo de descarrilamiento. El trineo, además de un sistema de amortiguamiento, debe tener un sistema de regulación de la anchura del mismo, para permitir la extracción del vehículo de las vías.

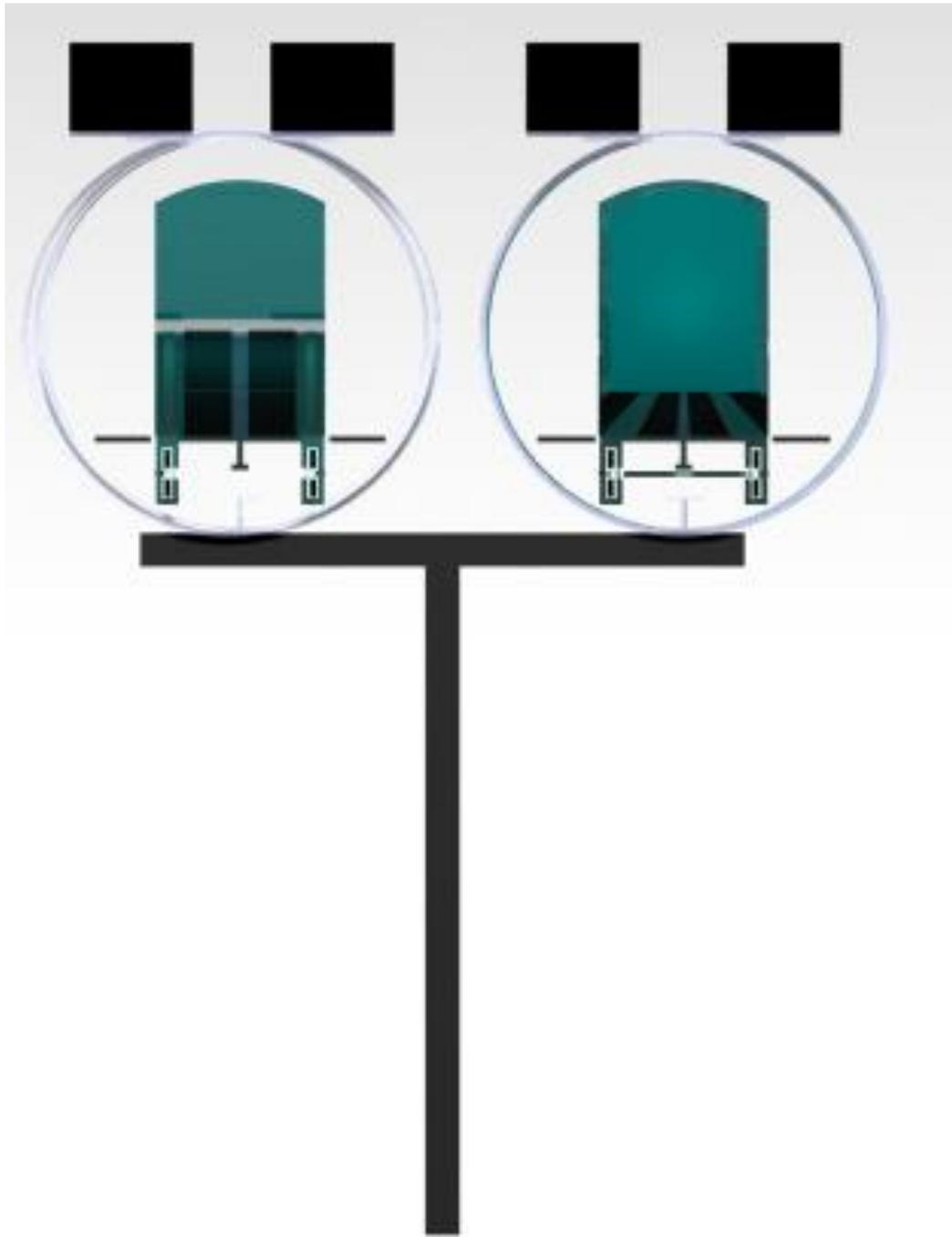


Figura 6.12 Módulo horizontal vista frontal

En el plano de la figura 6.13 pueden verse algunas de las dimensiones que no se han explicado.

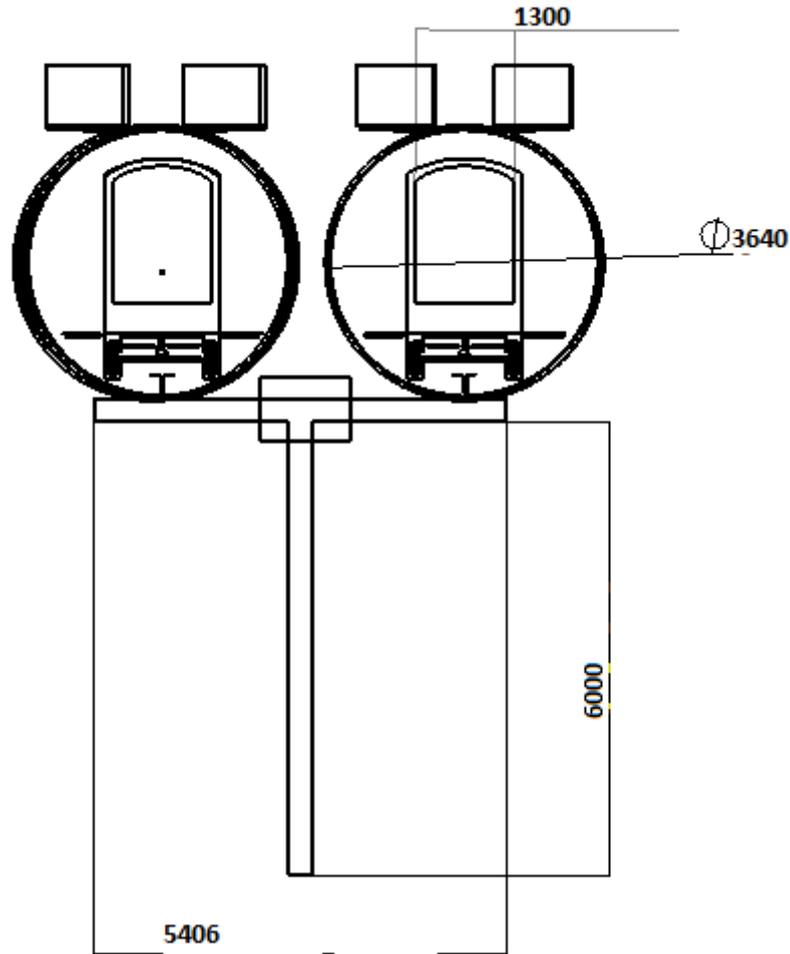


Figura 6.13 Vista acotada (Unidades en mm)

6.5 Tubo acelerador y decelerador

Los tubos de aceleración y deceleración son como los módulos normales sólo que inclinados. Como en el diseño 3D no se apreciaba con claridad, se ha dibujado a modo de ejemplo, donde podrían ir los sistemas de aceleración y las zapatas de fricción, seleccionado como un rectángulo en rojo, figura 6.14.

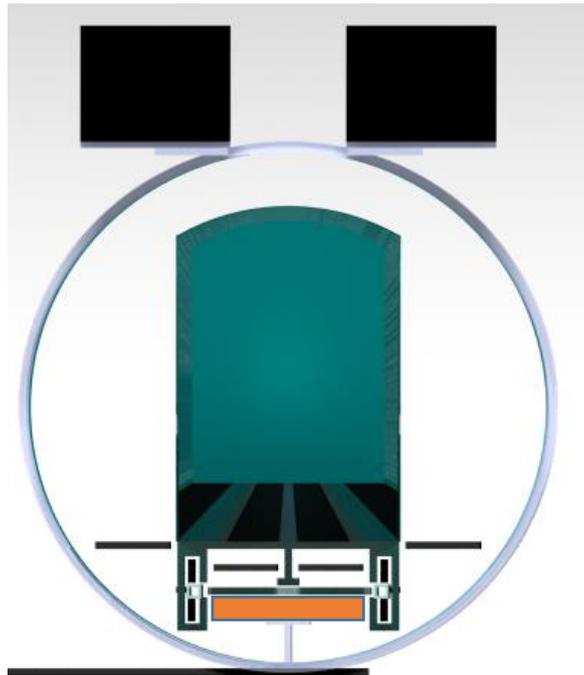


Figura 6.14 Túnel aceleración

6.6 Vehículo

El vehículo como ya se ha explicado anteriormente está compuesto de aluminio mayoritariamente, aunque el trineo es metálico y los cristales de plástico. Tiene unas dimensiones que no llegan a los 2,5 m de alto x 1,5 m ancho x 2,5 m largo (Útiles sólo 2 m)

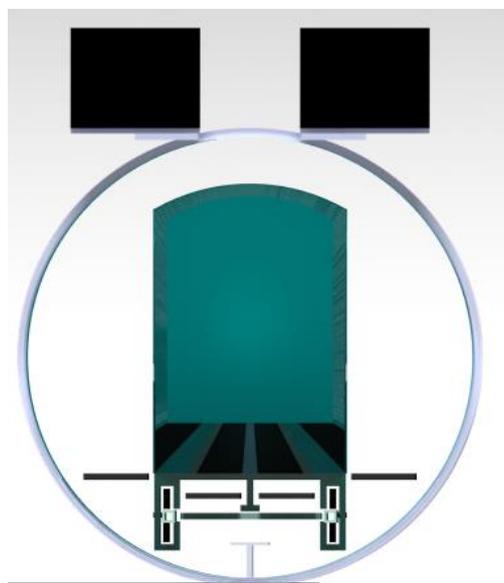


Figura 6.15 Vehículo en túnel

Se elige una forma futurista para la cápsula, figura 6.15, que permita un comportamiento aerodinámico aceptable. La eliminación de las aristas, y disminuir los ángulos tan bruscos que tiene el vehículo mejorarían notablemente su comportamiento aerodinámico, sobre todo en la parte de atrás.

En la figura 6.16 pueden verse los asientos de los pasajeros y el vehículo en la parte de atrás.

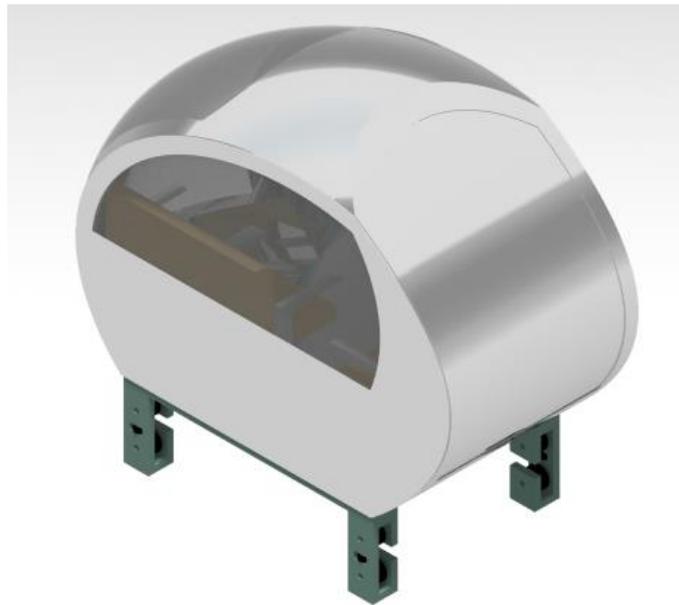


Figura 6.16 Vehículo parte de atrás

En la figura 6.17 puede verse el vehículo con los asientos, se ha ocultado la puerta para facilitar la visualización.

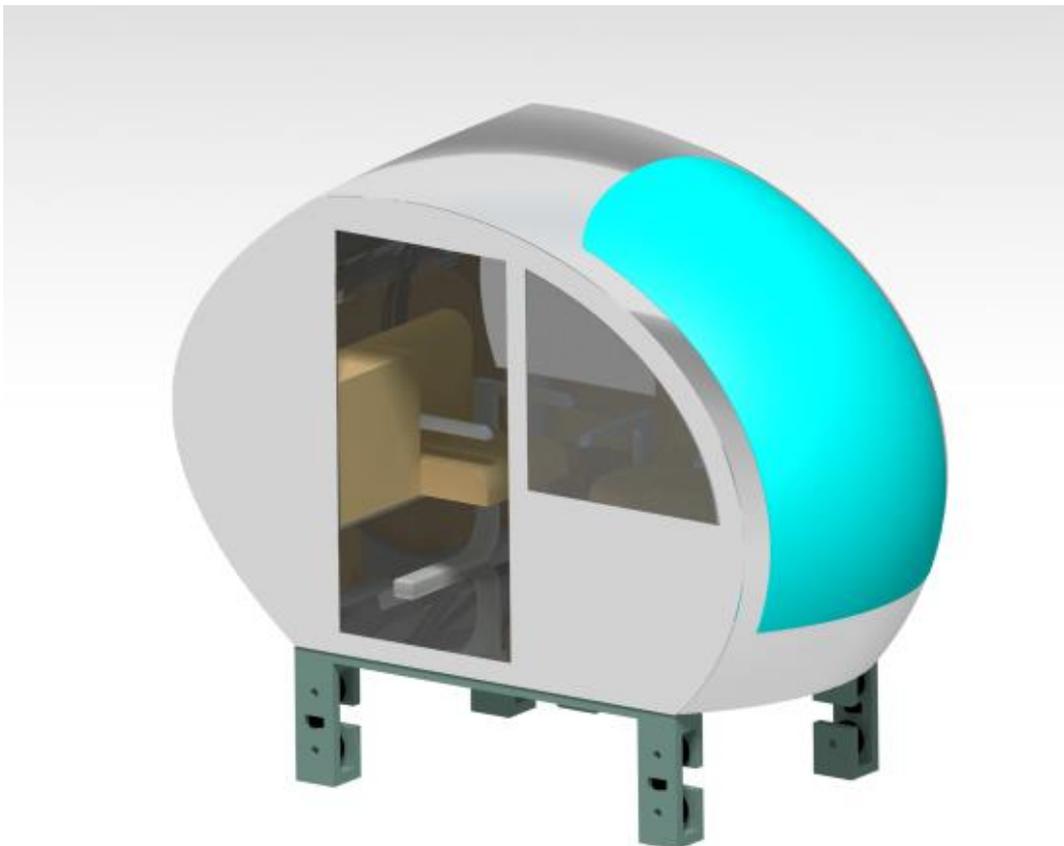


Figura 6.17 Vehículo parte delantera

Y la colocación de los módulos para conseguir unas fuerzas transversales limitadas vendría definida en la figura 6.18.

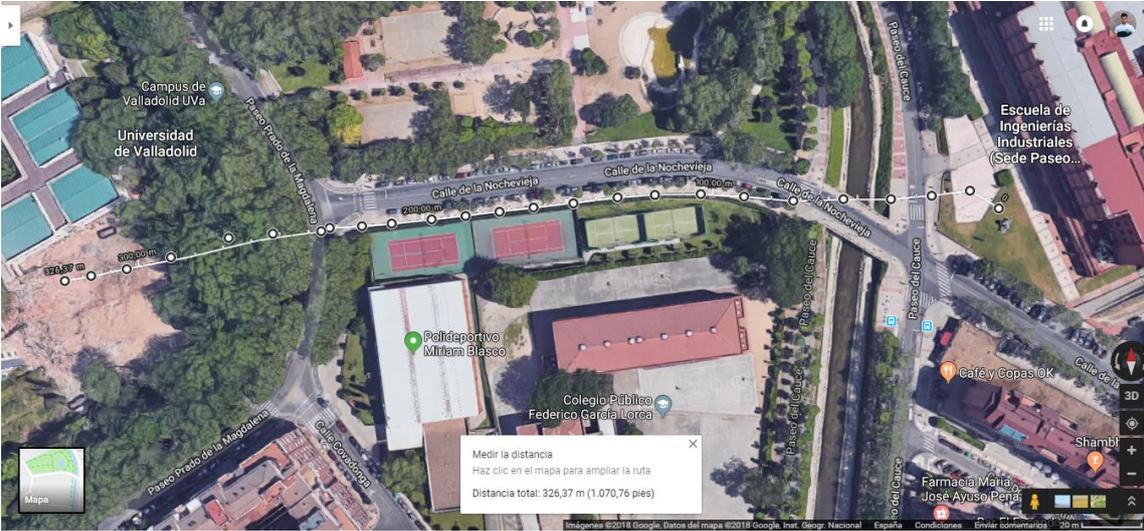


Figura 6.18 Recorrido final

Capítulo 7 CONCLUSIONES

En este TFM se ha desarrollado un anteproyecto de la concepción de un posible sistema de transporte entre sedes innovador para el transporte de alumnos y profesores. Se han realizado diferentes cálculos para poder realizar un pre dimensionamiento lo suficientemente exacto como para que no haya grandes interferencias en fases posteriores, gestionando desde el primer momento la integración.

Se ha cumplido con los objetivos y el alcance del trabajo descritos en el apartado de Introducción, innovando en nuevas formas de utilizar un tubo para el transporte de personas, realizándolo de manera aérea, y diseñando las dos estaciones del sistema de transportes. Para ello, se han analizado las diferentes tecnologías existentes y se ha llegado a una solución híbrida que mejor se adapta al transporte entre las sedes: un transporte birraíl, en tubo y traccionado por cable desembragable, que permite eliminar los sistemas de impulsión de las cabinas, por lo que los criterios de éxito podrían considerarse cumplidos.

Este anteproyecto puede servir de inspiración para diversas ampliaciones mediante TFG o TFM hasta convertirlo en un proyecto cercano a ser 100% funcional y visible. Algunas de las ampliaciones que se podrían realizar:

- Optimización estructural y aerodinámica de la cabina.
- Proyecto de obra civil de las estaciones.
- Diseño del sistema de frenado, desembrague y polea motora.
- Cálculo estructural atendiendo a la normativa.
- Cálculo eléctrico avanzado y selección de componentes.

Respecto a los objetivos que deben cubrirse en un TFM, el trabajo es altamente transversal, en él se han aplicado numerosos conocimientos adquiridos durante la Grado y el Master:

- Realización del Acta de constitución y partes interesadas, basado en la metodología del PMBOOK, vista en Dirección de Proyectos.
- Cálculo y análisis estructural aplicando los conocimientos de la asignatura vista en el Master y el Grado
- Cálculo de potencia y conocimiento de sistemas de generación de potencia, analizando diferentes opciones de la instalación. Este conocimiento parte de lo aprendido en la asignatura de Energética del Master.
- Diseño Asistido por Ordenador avanzado, con diseño de superficies, mediante CATIA.
- Aplicación de lo visto en la asignatura de Tecnologías del Transporte del Master.
- Otros: Cálculo de Dinámica de Fuerzas, Aerodinámica, conocimiento de diferentes tecnologías electrónicas como son sensores, procesadores y actuadores.

Este tipo de conocimiento generalista es propio del Grado cursado: Ingeniería en Tecnologías Industriales y del Máster en Ingeniería Industrial, y cumple con una de las premisas del Master: ser capaz de enfrentarse a un problema completamente desconocido utilizando lo aprendido en el Grado, el Máster y las herramientas al alcance: desde el SAP2000 hasta la utilización de la herramienta de distancias de Google Maps para realizar estudios del recorrido.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. López Paredes, J. Pajares Gutiérrez, and I. Sanzo, *Certificación IPMA-4LC Manual de Preparación*. Valladolid.
- [2] Project Management Institute, *A Project Management Body of Knowledge Guide: PMBOK Guide*, 4 Original. .
- [3] UVa, “La Uva en cifras,” 2016.
- [4] Google, “Google Maps.” [Online]. Available: <https://www.google.es/maps>.
- [5] J. M. IRAZU AMELIBIA, “PFC:Cálculo de teleférico,” *Univ. la Rioja*, p. 503, 2014.
- [6] N. Lopez Peña, “Estudio de la seguridad del telesilla Dílar,” *Univ. Carlos III*, pp. 91–95, 2006.
- [7] T. Hisgett, “Cliff Railway Hastings,” 2010. [Online]. Available: <https://www.flickr.com/photos/hisgett/4906029502/>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [8] J. Gomes, “Teleférico de Vaivén de Mérida.” [Online]. Available: <https://www.flickr.com/photos/jsg2/40965021605/in/photolist-25pWrHX-H8u8Me-25pWr4k-H8u94M-H8u8G4-25pWrEa-H8u8wz-5ACpsM-H8u8VF-H8u8ZD-25pWrpv-25pWrBp-qPZNZA-25pWqF6-25FYgH5-25FYcqY-26MkX1R-JDNWwd-25FYgCf-25FYcJy-26HydM1>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [9] R. Colina, “Telecabina de la Expo de Zaragoza,” 2008. [Online]. Available: <https://www.flickr.com/photos/miuet/2664105892/in/photolist-54qeSd-5pxkjh-6YYtbg-9bq2i6-8vAk3R-9mSDNF-aiU9S2-5mgHXT-5yGok8-VNqsgd-G2Lzvw-7Eiboa-dzHhXZ-axksWy-LeRgL-fQ2hXU-dpGd8s-8i2xh8-pG17MW-qmqnmF-9iNhQ-543dBb-4VPBdp-BNEFvm-nAFuqc-z7nWSP-jXDR9s-21scwmo->. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [10] I. Garcia Gonzalez, “Diseño de una montaña rusa,” *Univ. Politécnica Barcelona*, 2017.
- [11] R. Rodr and J. A. Mesa, “Planificación Línea de metro de Granada,” *Univ. Sevilla*, 2017.
- [12] E. Musk, “Hyperloop Alpha,” *SpaceX/Tesla Mot.*, pp. 1–58, 2013.
- [13] D. Systèmes, “CATIA.” .
- [14] R. Hurani, F. Imaz, and J. Jaurena, “Estudio del índice de confort del servicio del transporte público de pasajeros a través de la medición de aceleraciones,” pp. 1–10, 2015.
- [15] F. M. de Diego, “Estudio del confort ferroviario mediante dispositivos de comunicaciones móviles inteligentes (Smartphones),” 2016.
- [16] J. Carrasco Reyes, “El ferrocarril de Alta Velocidad,” *Posibilidades los Serv. Ferrov. Noct. en la Futur. red Eur. Alta Velocidad*, pp. 139–146.
- [17] Y. Hugh and R. Freedman, “Física Universitaria Vol.1,” *Pearson Educ.*, p. 760, 2009.
- [18] A. Crespo, *Mecánica de fluidos*. S.A. EDICIONES PARANINFO, 2006.
- [19] Autodesk, “Flow Design.” 2017.
- [20] I. Redondo Martín, “Diseño y construcción de un vehículo aéreo no tripulado para teledetección agroforestal,” 2016, 2016.
- [21] Lorentz Meier, “pixhawk.” [Online]. Available: <http://pixhawk.org/#autopilots>.
- [22] J. Vicente Busquets, “Ardupilot: piloto automático para aeromodelo con Arduino,” Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [23] Unknown, “ardupilot.or/.” [Online]. Available: <http://ardupilot.org/>.
- [24] Automation24, “Automation24.” [Online]. Available: <https://www.automation24.es/sensor-inductivo-automation24-ii7111-basicline>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [25] C. Velasco, L. Ib, C. Arquitect, and M. Continuos, “Estudio de utilización del programa de cálculo de estructuras SAP2000,” 2017.
- [26] R. De Materiales, “Introducción al estudio de la resistencia de materiales 1.1.,” pp. 1–31.
- [27] calculation solar, “CALCULATION SOLAR.” [Online]. Available: <http://calculationsolar.com/es/>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [28] CSI, “SAP2000.” .

ANEXO 1: CÁLCULO GENERACIÓN POTENCIA

Para el cálculo de los elementos de la instalación eléctrica se usará el programa 'CalculationSolar', pues para un anteproyecto sólo se necesita una estimación. Todas las tablas e imágenes están sacadas del informe generado por Calculation Solar [27].

Caso 1: Generación Completa

En este primer caso, se analizará la posibilidad de alimentar el sistema al 100% con energía solar.

En la tabla 87.1 pueden verse las necesidades de energía diarias.

Tabla 8.1 Generación 100%

Horas	Energía	Total
2	240000 W	480000 Wh
TOTAL		480000 Wh/d

Para calcular las necesidades de la instalación solar, primero hay que seleccionar el emplazamiento del proyecto. En nuestro caso, la sede Paseo del Cauce.

- Situación: Paseo del Cauce, 59, 47011 Valladolid, España.
- Coordenadas: 41,656962 -4,710538

Por lo tanto, la inclinación óptima será de 32 grados y la desorientación con respecto al Sur, se supondrá 0 grados (pues podemos dirigir los paneles hacia esa dirección)

Se utilizará una tensión normalizada de 230 V.

Para el cálculo del rendimiento, el sistema utiliza los siguientes parámetros recogidos en la tabla 8.2:

Tabla 8.2 Parámetros

Coefficiente perdidas en batería	5 %
Coefficiente autodescarga batería	0.5 %
Profundidad de descarga batería	60 %
Coefficiente perdidas conversión DC/AC	1 %
Coefficiente perdidas cableado	5 %
Autonomía del sistema	3 d
Rendimiento General	86,78 %

Lo cual proporciona unas necesidades de energía reales de **553122.84 kW**

Y se consideran unos consumos del 100% para todos los meses del año, se tiene una distribución de consumos anuales recogidos en la tabla 8.3.

Tabla 8.3 Consumos

	Ene	Feb	Mar	Abl	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
% mes	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Consumos (W)	553123	553123	553123	553123	553123	553123	553123	553123	553123	553123	553123	553123

El programa utiliza la base de datos NREL-NASA para el cálculo de horas pico. Para el cálculo de la declinación solar usa la fórmula:

$$(7) \quad \delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{284 + \delta_n}{365} \right)$$

δ : declinación (grados)
 δ_n : día del año (1...365, tomado 1 para el día de enero)

Para el cálculo de la elevación solar utiliza los valores:

- $(90^\circ - \varphi - \delta)$ en el solsticio de invierno
 - $(90^\circ - \varphi + \delta)$ en el solsticio de verano
- siendo φ la latitud del lugar y δ la declinación.

Y para determinar la inclinación óptima utiliza las siguientes premisas:

- $\beta = \varphi - \delta$ en el solsticio de verano
 - $\beta = \varphi + \delta$ en el solsticio de invierno
- pasando por el valor $\beta = \varphi$ en los equinoccios
 siendo φ la latitud del lugar y δ la declinación.

Para el cálculo del valor medio anual de la irradiación global sobre la superficie con inclinación óptima ($Kw \times h/m^2$) utiliza la fórmula:

$$(8) \quad G_a(\beta_{opt}) = \frac{G_a(0)}{1 - 4,46 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt} - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt}^2}$$

Donde $G_a(0)$ es la media anual de la irradiación global horizontal ($KW \times h /m^2$) y β_{opt} la inclinación óptima de la superficie.

El factor de irradiancia (FI) lo calcula utilizando las fórmulas:

$$(9, 10) \quad \begin{aligned} FI &= 1 - [1,2 \times 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \alpha^2] && \text{para } 15^\circ < \beta < 90^\circ \\ FI &= 1 - [1,2 \times 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2] && \text{para } \beta \leq 15^\circ \end{aligned}$$

FI: Factor de radiación (sin unidades)
 β : Inclinación real de la superficie ($^\circ$)
 β_{opt} : inclinación óptima de la superficie
 α : acimut de la superficie ($^\circ$)

Y las horas pico (HSP) es el resultado de multiplicar la radiación global óptima por el factor de irradiación.

Los resultados obtenidos se recogen en la tabla 8.4.

La forma de trabajo de este programa es idéntica a la vista en el Master y en el Grado, por eso se ha elegido este programa.

Tabla 8.4 Resultados

	Ene	Feb	Mar	Abi	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Días mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Declinación	-21,27°	-13,62°	-2,02°	9,78°	19,26°	23,39°	21,18°	13,12°	1,81°	-10,33°	-19,6°	-23,4°
Nº día/año	15	45	76	106	137	168	198	229	259	290	321	351
Elevación solar	27,07°	34,72°	46,33°	58,13°	67,61°	71,73°	69,53°	61,47°	50,16°	38,01°	28,74°	24,94°
Inclinación óptima	62,93°	55,28°	43,67°	31,87°	22,39°	18,27°	20,47°	28,53°	39,84°	51,99°	61,26°	65,06°
rad_glo_hor	1,68	2,64	3,87	4,8	5,68	6,66	6,76	5,95	4,58	2,81	1,88	1,43
rad_glo_op	3,36	4,32	5,14	5,55	6,11	6,99	7,18	6,68	5,77	4,29	3,57	3,06
FI	0,89	0,93	0,98	1	0,99	0,98	0,98	1	0,99	0,95	0,9	0,87
HSP/día	2,99	4,01	5,03	5,55	6,04	6,85	7,04	6,68	5,72	4,07	3,22	2,66
HSP/mes	92,69	112,28	155,93	166,5	187,24	205,5	218,24	207,08	171,6	126,17	96,6	82,46
Temp día max	6,53°	8,56°	12,54°	14,27°	18,73°	23,4°	25,86°	25,82°	22,26°	16,84°	10,85°	7,56°
Consu/HSPdía	184991	137936	109965	99662	91577	80748	78569	82803	96700	135902	171777	207941

Estos cálculos nos permitirían también calcular una instalación solar térmica y es el mismo método que se utilizaría para calcular las necesidades en una vivienda.

Para los cálculos de los módulos se tienen en cuenta:

- Mes más desfavorable: diciembre.
- Inclinación óptima anual: 32,44 grados (los 32 grados iniciales supuestos se acercan mucho).
- Inclinación óptima por consumos: 41,8 grados
- Temperatura media mensual máxima diaria (3 meses): 8,31 grados

En la figura 8.5 pueden verse las características del módulo seleccionado.

Tabla 8.5 Placa solar

LUXOR Eco line 60/230 W Policristalino			
Voltaje a circuito abierto (voc):	37 V	Voltaje a potencia máxima (vmp):	29.8 V
Corriente de cortocircuito (isc):	8,22 A	Corriente a potencia máxima (imp):	7,73 A
Potencia máxima:	230 W	Coefficiente de temperatura de Pmax:	-0,45 %/°C
Potencia real a Temperatura media max :	237.5105 Wp	Nº de módulos serie:	2
Potencia pico módulos total :	235520 Wp	Nº de series paralelo:	512
Optimización instalación/necesidades mes mas desfavorable :	1,01	Total modulos :	1024
El grado de optimización elección equipo/necesidades reales es de			101 %

Para el cálculo de los reguladores se tiene en cuenta el módulo elegido y la tensión necesaria. En la tabla 8.6 se tienen las características del regulador y los cálculos realizados.

Tabla 8.6 Regulador

STECA TAROM 440-48 PWM			
Tensión:	48 V	Voltaje máximo:	90 V
Potencia nominal:	0 Wp	Consumo propio:	14 mA
Capacidad de carga:	40 A	Ratio aprovechamiento :	0,9
El grado de optimización elección equipo/necesidades reales es de		95 % N° Reguladores :	100

Para el cálculo de las baterías se tiene en cuenta la energía, tensión, profundidad de descarga y la autonomía. En la tabla 8.7 se recogen las características de la batería y los cálculos realizados.

Tabla 8.7 Baterías

ABSOLYTE GP 1-100G99 FLAT PLATE					
Capacidades de carga en función a sus horas de descarga:					
C 10:	4320 Ah	C 20:	4800 Ah	C 40:	5148 Ah
		C 100:	5610 Ah	C 120:	5724 Ah
Tensión:		2 V	N° de elementos serie :		24
Capacidad nominal acumulador :		5610 Ah	N° de series paralelo :		1
Tensión nominal acumulador :		48 V	Total elementos :		24
El grado de optimización elección equipo/necesidades reales es de					10 %

Los cálculos y características del inversor-cargador se recogen en la tabla 8.8:

Tabla 8.8 Inversor-Cargador

HUAWEI SUN2000 36KTL			
Tensión:	48 V	Potencia nominal:	36000 W
Potencia continua:	36000 W	Potencia instantanea:	36000 W
Consumo en vacío :	0 W	Eficiencia :	99 %
Ratio aprovechamiento :	583 %	N° inversores :	6
El grado de optimización elección equipo/necesidades reales es de			103 %

El resumen de los elementos resultantes calculados es, tabla 8.9:

Tabla 8.9 Elementos caso1

Unidades	Elementos
1024	Modulo tipo -LUXOR Eco line 60/230 W Policristalino
100	Regulador tipo - STECA TAROM 440-48 PWM
24	Bateria tipo - ABSOLYTE GP 1-100G99 FLAT PLATE
6	Inversor tipo -HUAWEI SUN2000 36KTL

Y los consumos y la producción mensual, figura 8.1:

	Ene	Feb	Mar	Abl	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Consumo	17147	15487	17147	16594	17147	16594	17147	17147	16594	17147	16594	17147
Producción	19559	23693	32904	35135	39511	43365	46053	43698	36211	26624	20384	17401

Consumo total al año: 201892 Kw

Producción total al año: 384538 Kw

Total kg/año CO2 evitados: 208420

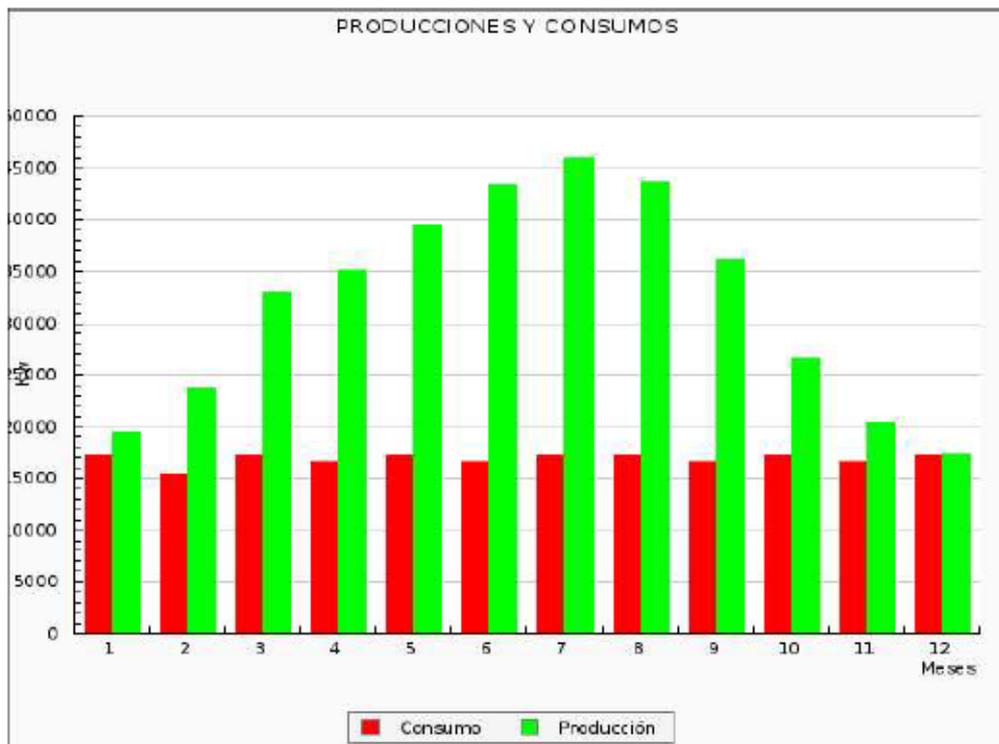


Figura 8.1 Resultados caso 1

Caso 2: Producción 75%

Para evitar la sobrecapacidad de los meses de invierno, se puede optar por sólo generar el 75% de la energía necesaria en invierno y el otro 25% aportarlo con un sistema complementario como un motor alternativo de biogás. En verano, la sobre producción cubrirá la infra capacidad y no será necesario usar el sistema auxiliar.

Para este caso, y siguiendo el método anteriormente explicado, para producir el 75% hacen falta, tabla 8.10:

Tabla 8.10 Elementos caso 2

Unidades	Elementos
768	Modulo tipo -LUXOR Eco line 60/230 W Policristalino
75	Regulador tipo - STECA TAROM 440-48 PWM
24	Bateria tipo - ABSOLYTE GP 1-100G99 FLAT PLATE
5	Inversor tipo -HUAWEI SUN2000 36KTL

Y la potencia producida por mes será, figura 8.2:

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Consumo	12860	11616	12860	12445	12860	12445	12860	12860	12445	12860	12445	12860
Producción	14670	17770	24678	26351	29633	32523	34640	32773	27158	19968	15288	13051

Consumo total al año: 151416 Kw

Producción total al año: 288403 Kw

Total kg/año CO2 evitados: 156314

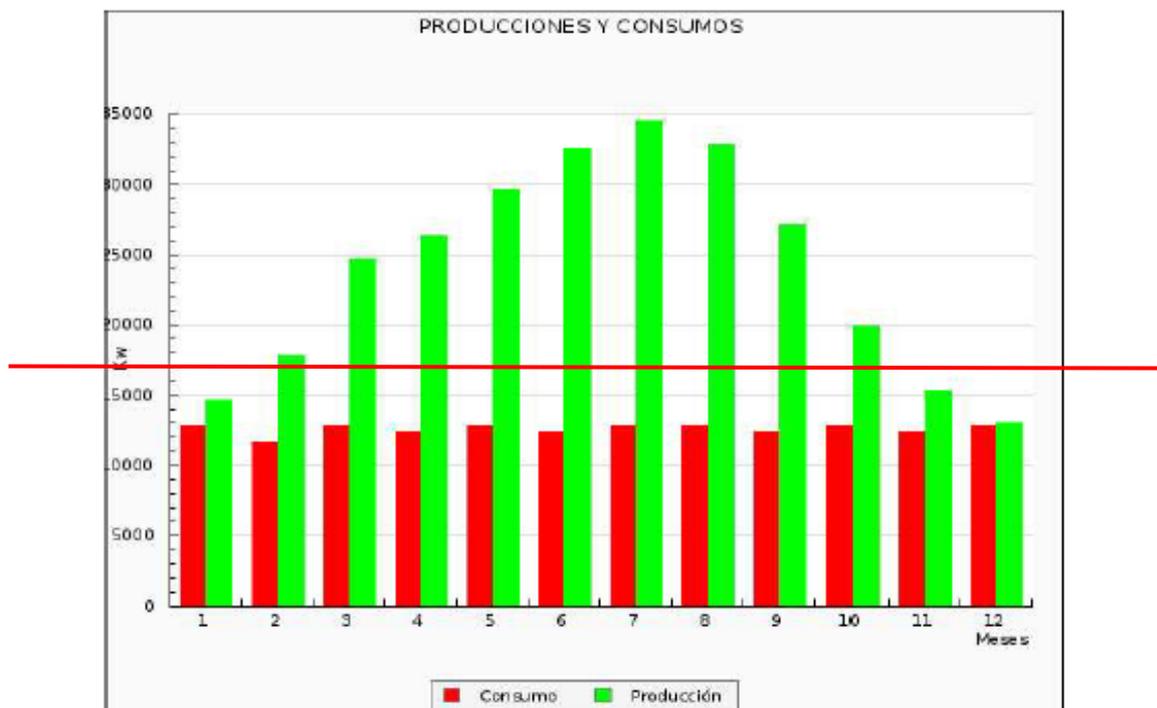


Figura 8.2 Resultados Caso 2

La línea roja indica los consumos reales del 100% que se calcularon en el primer caso, los consumos representados en la gráfica representan el consumo al 75%.

Puede verse, por tanto, que la potencia producida por el sistema desde febrero a octubre (ambos incluidos) es suficiente para aportar el 100% de la energía necesaria calculada en el apartado anterior. Por lo que sólo durante 3 meses al año haría falta usar el sistema externo.

Caso 3: Cambiar el ángulo de inclinación

La tercera opción que se analizará es cambiar el ángulo de inclinación del panel. Para ello, en vez de utilizar el ángulo de inclinación óptimo anual de 32 grados, se utilizará el óptimo para los meses de invierno, es decir, 42 grados (41,8). De esta forma, se conseguirá disminuir el número de módulos necesarios a costa de una menor producción y eficiencia del sistema.

El resumen de los cálculos puede verse a continuación, tabla 8.11:

Tabla 8.11 Elementos Caso 3 I

Unidades	Elementos
944	Modulo tipo -LUXOR Eco line 60/230 W Policristalino
82	Regulador tipo - MORNINGSTAR TRISTAR 45A PWM
24	Bateria tipo - ABSOLYTE GP 1-100G99 FLAT PLATE
6	Inversor tipo -HUAWEI SUN2000 36KTL

Con esta medida se consigue disminuir el número de módulos de 1024 a 944. Sin embargo, la energía producida al año es menor, figura 8.3

	Ene	Feb	Mar	Abl	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Consumo	17147	15487	17147	16594	17147	16594	17147	17147	16594	17147	16594	17147
Producción	19237	23041	30997	32040	34977	37992	40706	39500	33674	25630	20018	17368

Consumo total al año: 201892 Kw

Producción total al año: 355180 Kw

Total kg/año CO2 evitados: 192508

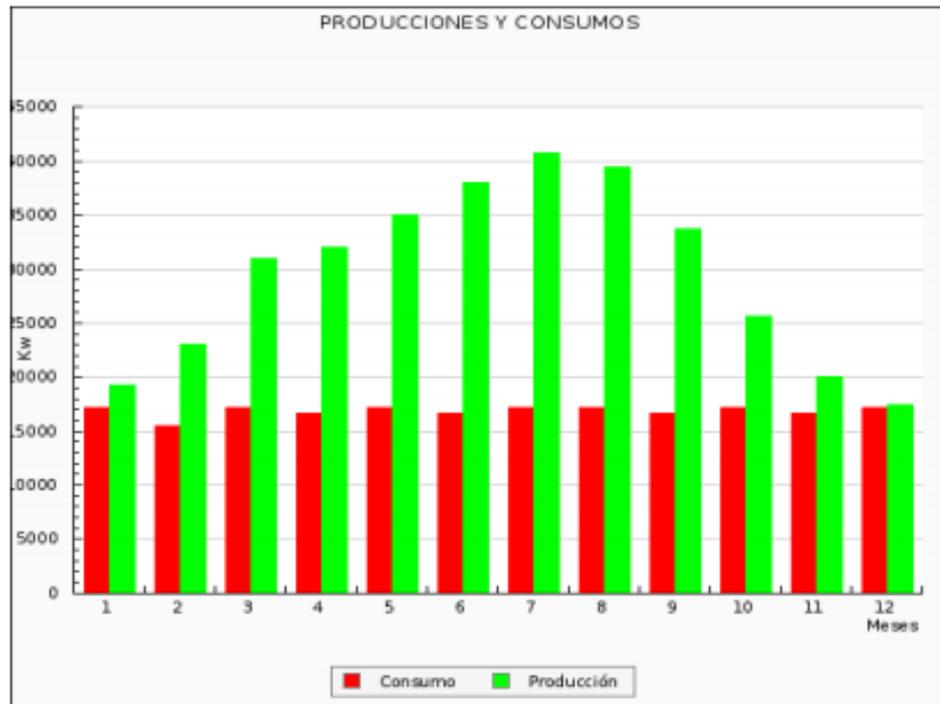


Figura 8.3 Resultados Caso 3 I

Esta optimización se puede llevar al máximo igualando el ángulo de inclinación con el óptimo para el mes más restrictivo, que es diciembre. En diciembre el ángulo óptimo es de 65 grados. Con todo esto, los elementos resultantes serían, tabla 8.12:

Tabla 8.12 Elementos Caso 3 II

Unidades	Elementos
890	Modulo tipo -LUXOR Eco line 60/230 W Policristalino
78	Regulador tipo - MORNINGSTAR TRISTAR 45A PWM
24	Bateria tipo - ABSOLUTE GP 1-100G99 FLAT PLATE
6	Inversor tipo -HUAWEI SUN2000 36KTL

Consiguiendo una producción mensual del 100% con sólo 890 módulos (134 menos que el cálculo inicial).

La producción mensual y el consumo a lo largo del año serán, figura 8.4:

	Ene	Feb	Mar	Abl	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Consumo	17147	15487	17147	16594	17147	16594	17147	17147	16594	17147	16594	17147
Producción	19104	21928	27746	26575	27063	28501	31043	31896	29217	23879	19643	17398

Consumo total al año: 201892 Kw

Producción total al año: 303993 Kw

Total kg/año CO2 evitados: 164764

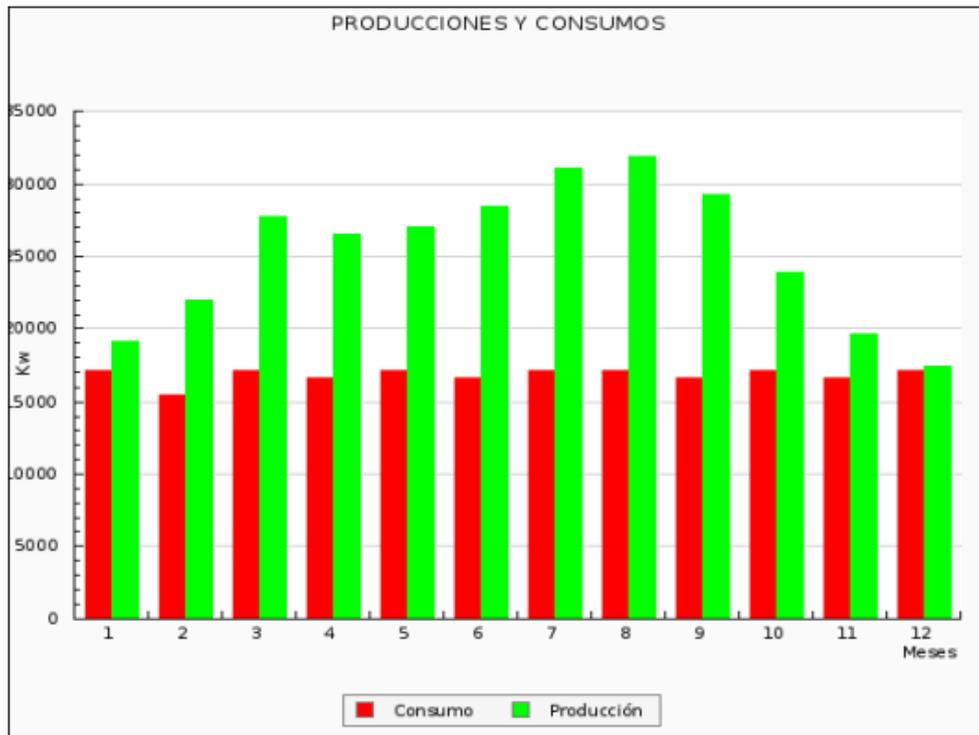


Figura 8.4 Resultados Caso 3 II

Capítulo 8 ANEXO 2: CÁLCULO ESTRUCTURAL

Para el cálculo estructural se utilizará el software SAP2000 v19[28]. SAP es un programa de cálculo de elementos finitos aplicado al cálculo estructural. Debido a que se trata de un anteproyecto, se realizarán una serie de simplificaciones:

- El tubo y el anillo no son elementos resistentes y sólo actúan sobre la estructura como cargas. Las vías y el suelo se incorporan mayorando las cargas distribuidas.
- El tubo está empotrado a sus contiguos, por lo que se desprecia el efecto de las deceleraciones.
- No se considerará carga de viento ni de nieve.

Esto permitirá un cálculo aproximado de la estructura portante necesaria para el proyecto.

La estructura alámbrica simplificada será, figura 9.1:

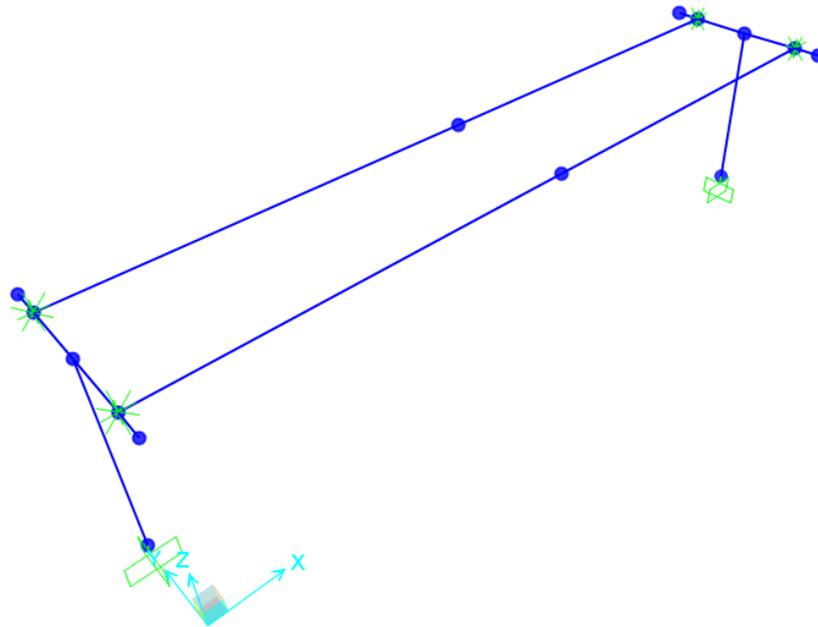


Figura 9.1 Estructura alámbrica

A la estructura alámbrica se le incorporan las fuerzas que actúan sobre el sistema (aparte del peso propio denominado *DEAD* en el programa). En la figura 9.2 pueden verse las fuerzas distribuidas aplicadas.

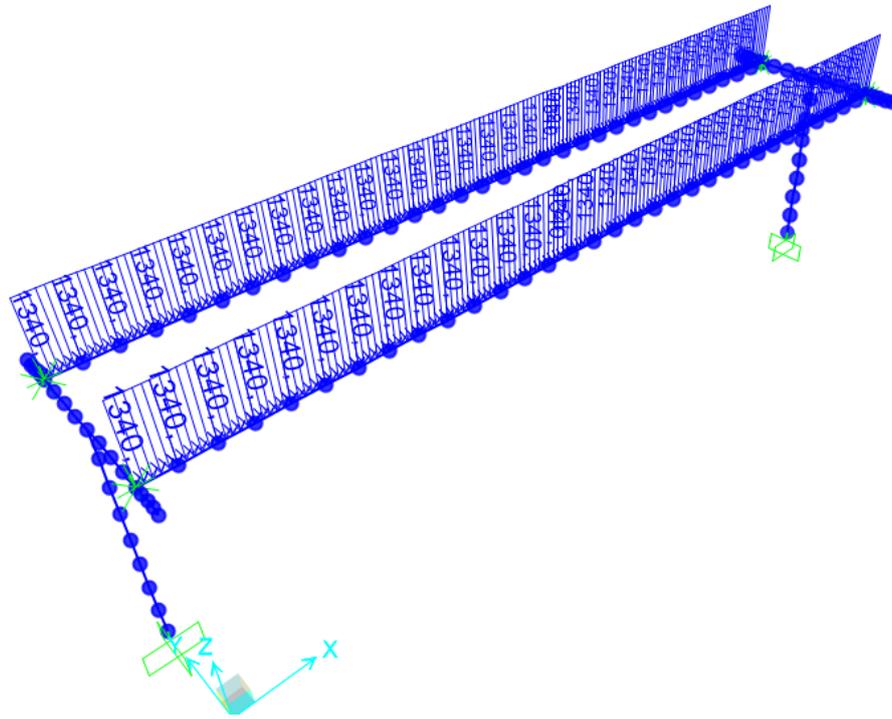


Figura 9.2 Cargas distribuidas

Y se añaden las cargas puntuales en los nodos, figura 9.3. La carga del vehículo se añadirá después.

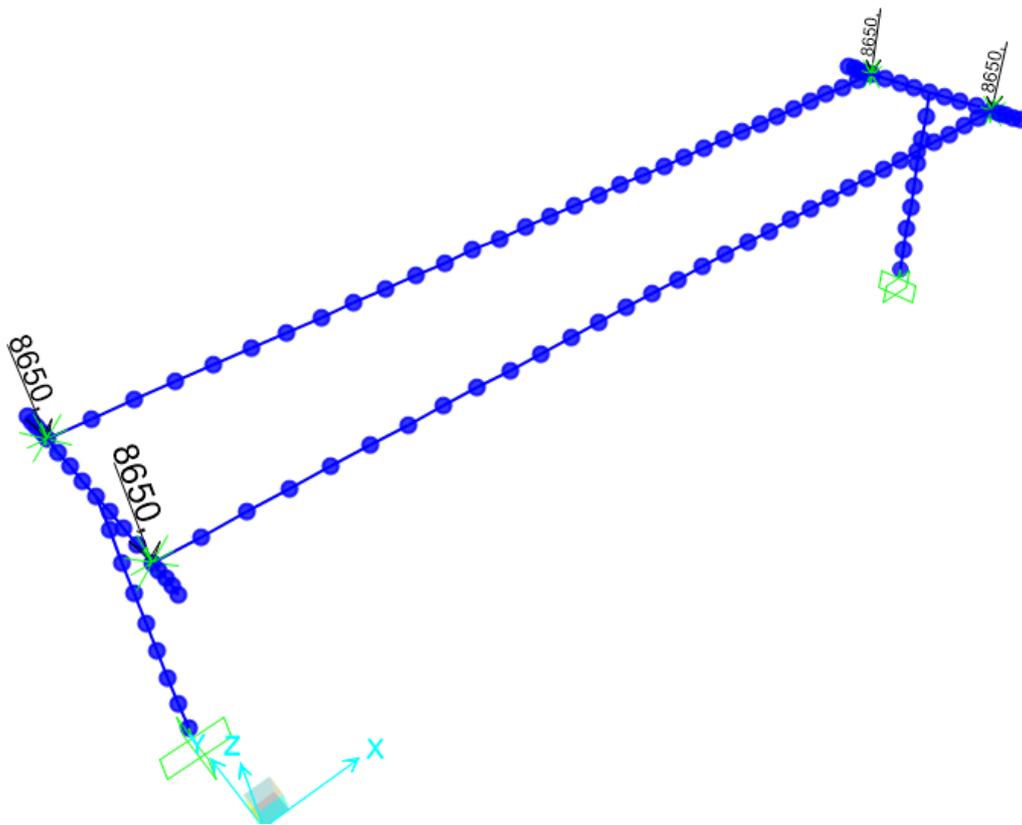


Figura 9.3 Cargas puntuales

Los perfiles que se han elegido son los HE320B para las vigas y perfiles tubulares 323,9 mm x 5 mm para los pilares, ambos fabricados de S275.

Se analiza la estructura primeramente para la opción más restrictiva para las vigas, que es cuando 2 vehículos se encuentran en la mitad del vano, cada uno en sentido opuesto. En la figura 9.4 pueden verse las fuerzas del vehículo aplicadas.

Las fuerzas no estructurales se multiplican por un factor de seguridad del 35%.

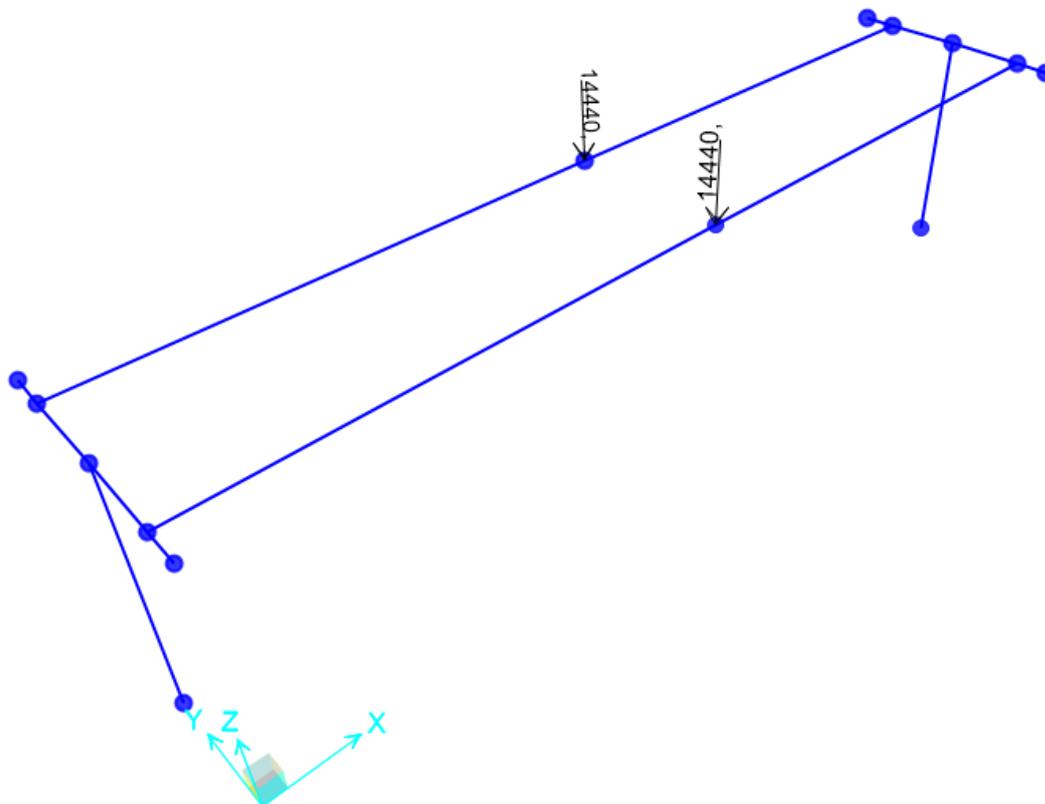


Figura 9.4 Carga del vehículo

Con el perfil inicial la flecha se encuentra cercana a los 200 mm, algo intolerable. A la hora de elegir el límite último de servicio se tendrán en cuenta que según la norma UNE 76-201-88 los puentes grúa, en las vigas carril, tienen una flecha máxima permitida de $L/750$.

Por lo tanto, se considera un criterio lo suficientemente restrictivo para una primera aproximación de un anteproyecto.

Para una longitud de 24 m se tienen 32 mm de flecha máxima.

Con un HEB600 los resultados del análisis son, figura 9.5:

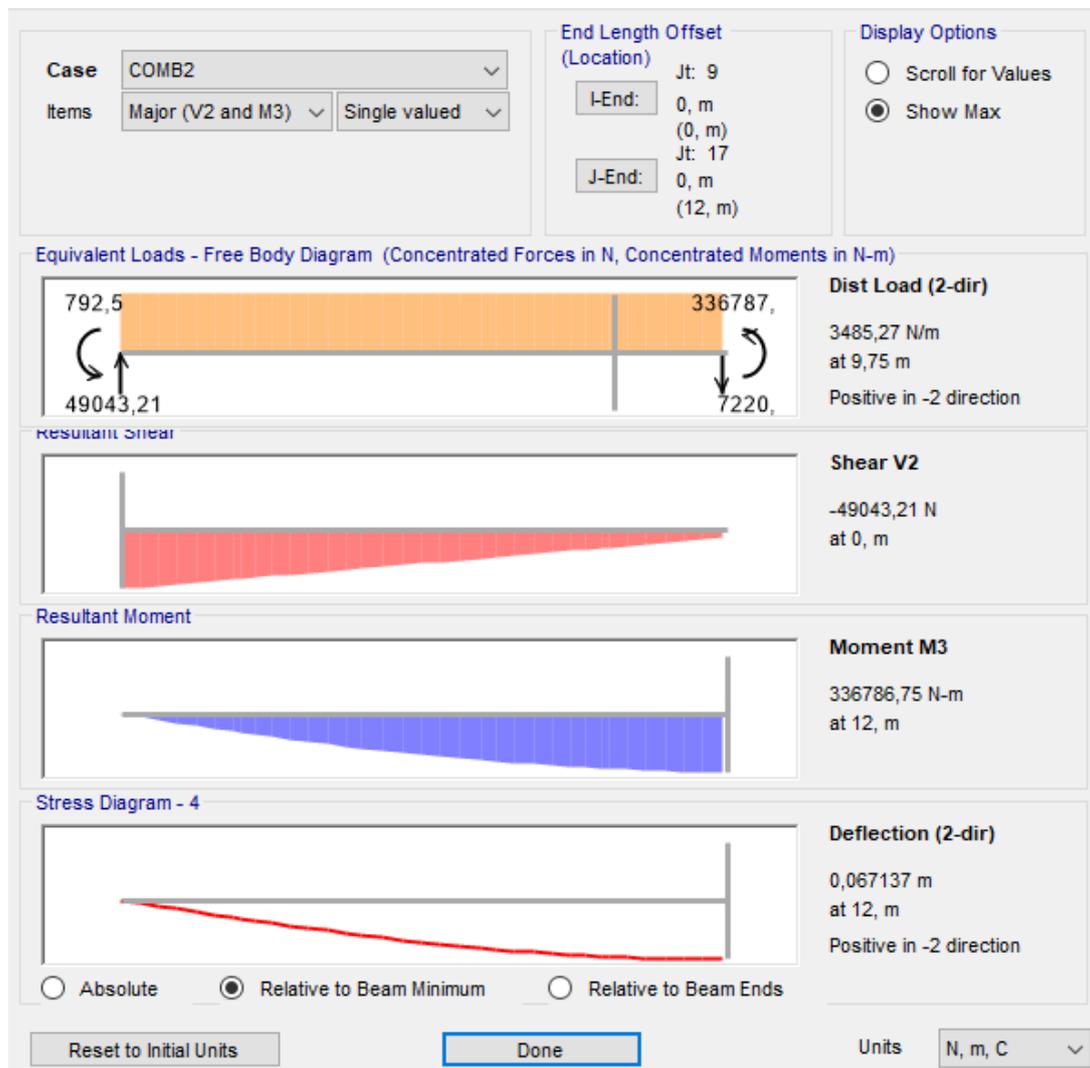


Figura 9.5 Resultados HEB600

Se duplica la flecha máxima de diseño, 67 mm. Sin embargo, en la figura 9.6 puede verse que la tensión máxima de Von Misses es 59127831 N/m², lo cual es inferior al límite elástico del material F_y , que es 275 MPa.

Es más, el límite elástico es 4,65 veces superior a la tensión máxima.

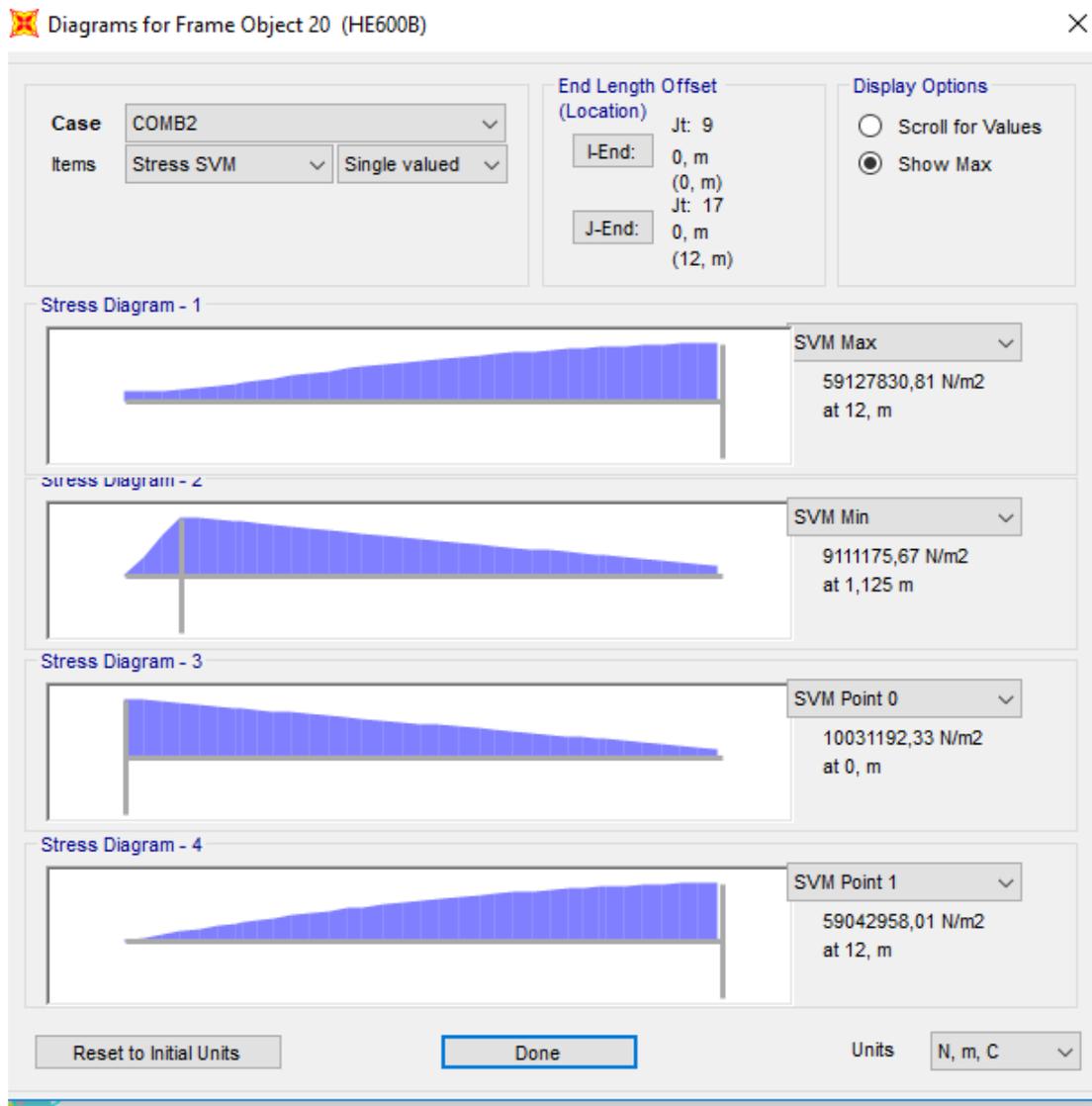


Figura 9.6 Tensión HEB600

Para saber cuál es la mejor forma de abordar el problema de la flecha, ya sea reduciendo la luz o colocando dos perfiles que permitan repartir las cargas, se analiza la viga con el peso propio del perfil HEB600.

En la figura 9.7 se puede ver que la flecha es de 31 mm sólo con la estructura, por lo que la mejor opción es reducir la luz.

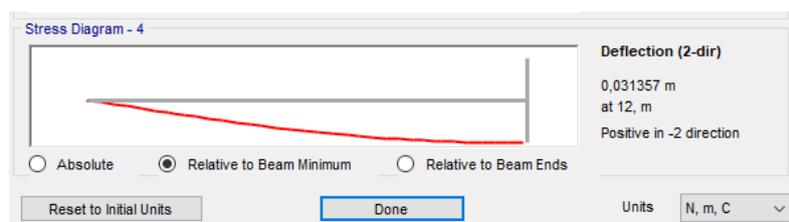


Figura 9.7 Flecha peso muerto

Se opta, por lo tanto, por añadir un pilar intermedio a los 12 metros tal como puede verse en la figura 9.8.

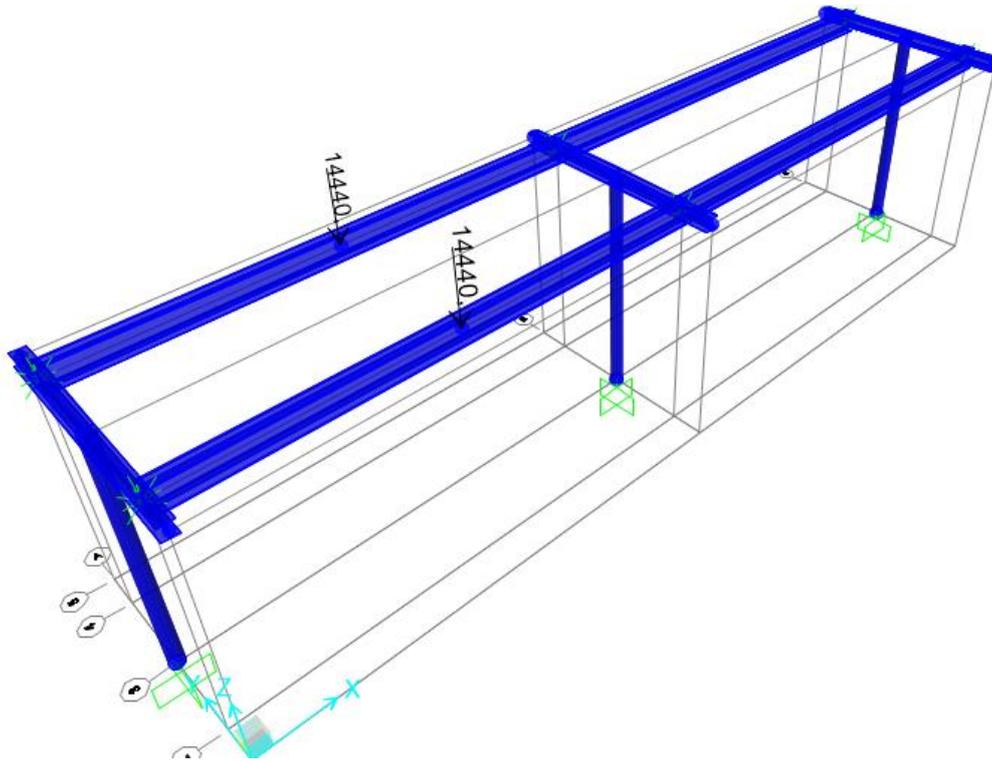


Figura 9.8 Estructura modificada

Para el perfil HEB320 inicial se tiene una flecha de 1,372 cumpliendo nuestra flecha máxima que es ahora 16 mm, figura 9.9.



Figura 9.9 Flecha y esfuerzos HEB320

La tensión máxima del perfil es 32553376 N/m², como se puede ver en la figura 9.10 (lo cual es 8,45 veces menos la tensión máxima admisible de la estructura).



Figura 9.10 Esfuerzos Von Mises

Se analiza la viga que conforma la T estructural, obteniendo 1.7 mm de flecha como puede verse en la figura 9.11, lo cual es inferior a los 2.6 mm de flecha máxima admitidos. Y una tensión máxima de 32 MPa.

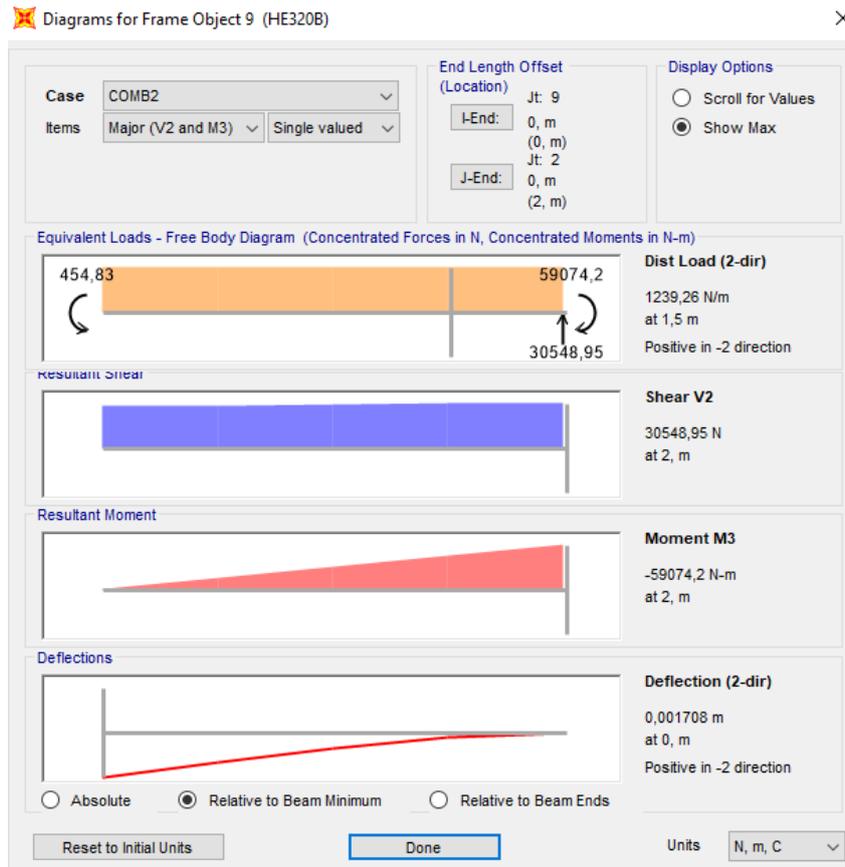


Figura 9.11 Flecha T

Se analiza el pilar y se tiene un axil máximo de compresión de -63411 N, como puede verse en la figura 9.12. La presión es de 12 MPa y la flecha prácticamente inexistente.

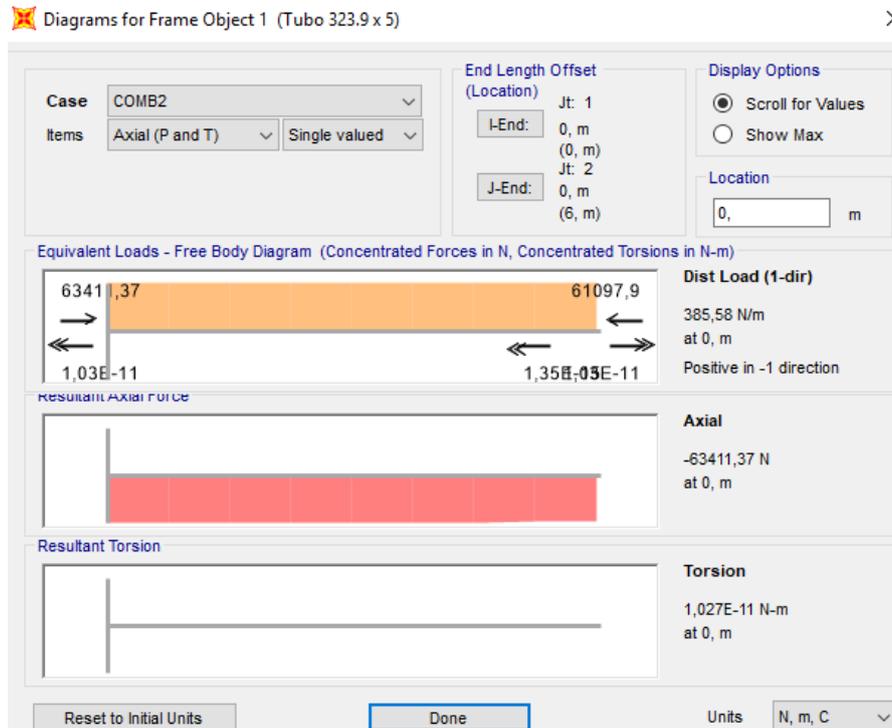


Figura 9.12 Axil

$$(11) \quad F_{\text{crit}} = \pi^2 \frac{EI_{\text{min}}}{(\alpha L)^2} \quad \begin{cases} \alpha = 0,5 & \text{empotrado-empotrado} \\ \alpha \approx 0,70 & \text{articulado-empotrado} \\ \alpha = 2 & \text{libre-empotrado} \end{cases}$$

Aplicando la ecuación de Euler, se tiene una carga crítica de pandeo de -758214 N, suponiendo un pilar articulado-empotrado, o -92881.25 N para uno libre-empotrado. Por lo que no hay riesgo de pandeo.

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Cronograma	5
Figura 3.1 Recorrido Inicial	10
Figura 4.1 Tecnologías del transporte	12
Figura 4.2 Funicular [7]	13
Figura 4.3 Teleférico de Vaivén [8]	14
Figura 4.4 Telecabina Expo Zaragoza [9]	15
Figura 4.5 Rueda y tubo[10]	17
Figura 4.6 Distribución de energía[10]	17
Figura 4.7 Eslabón de subida[10].....	18
Figura 4.8 Sistema <i>anti-rollback</i> [10]	18
Figura 4.9 Ejemplo de Tren Ligero ‘ <i>Beechurst Station</i> ’ de Morgantown Autor: Brian M. Powell	20
Figura 4.10 Tranvía de Vitoria foto tomada por Zarateman	20
Figura 4.11 Boceto cabina Hyperloop [12]	21
Figura 4.12 Boceto estructura Hyperloop[12].....	22
Figura 5.1 Aceleraciones y confort [14].....	26
Figura 5.2 Recorrido y trazado final	27
Figura 5.3 Vehículo 3D.....	28
Figura 5.4 Trineo	29
Figura 5.5 Estructura vehículo	29
Figura 5.6 Fuerzas situación horizontal	30
Figura 5.7 Fuerzas horizontal aceleración.....	31
Figura 5.8 Fuerzas inclinadas.....	31
Figura 5.9 Fuerzas deceleración.....	31
Figura 5.10 Fuerzas declinado	32
Figura 5.11 Contacto Ruedas-Carril.....	32
Figura 5.12 Análisis CFD	34
Figura 5.13 Fuerza horizontal	35
Figura 5.14 Fuerzas situación inclinada.....	36
Figura 5.15 Fuerzas declinada.....	36
Figura 5.16 Controlador [20]	38
Figura 5.17 GPS[20]	40
Figura 5.18 Telemetría a 433Mhz[20]	40
Figura 5.19 Lightware SF11C[20]	41
Figura 5.20 Conexión LiDAR[20]	42
Figura 5.21 Sensor inductivo Automation24 II7111 – BasicLine [24]	43
Figura 5.22 Encoder incremental ifm electronic RV3100[24]	44
Figura 5.23 Sede Paseo del Cauce 1	45
Figura 5.24 Sede Mergelina	45
Figura 5.25 Consumos y Producción	49
Figura 5.26 Ficha técnica panel Luxor.....	50
Figura 5.27 Estructura portante.....	52
Figura 5.28 Colocación de pilares.....	52
Figura 6.1 Diseño final general	53
Figura 6.2 Diseño final general II	53
Figura 6.3 Diseño general sin tubo	54
Figura 6.4 Estación Paseo del Cauce	55
Figura 6.5 Estación Paseo del Cauce II.....	55
Figura 6.6 Foso y zona de entrada	56
Figura 6.7 Estación Sede Mergelina	56
Figura 6.8 Estación Sede Mergelina II.....	57
Figura 6.9 Módulo horizontal desnudo	58
Figura 6.10 Módulo horizontal vista lateral	58
Figura 6.11 Módulo horizontal	59
Figura 6.12 Módulo horizontal vista frontal	60
Figura 6.13 Vista acotada (Unidades en mm)	61

Figura 6.14 Túnel aceleración.....	62
Figura 6.15 Vehículo en túnel.....	62
Figura 6.16 Vehículo parte de atrás	63
Figura 6.17 Vehículo parte delantera	63
Figura 6.18 Recorrido final	64
Figura 8.1 Resultados caso 1	73
Figura 8.2 Resultados Caso 2.....	74
Figura 8.3 Resultados Caso 3 I	76
Figura 8.4 Resultados Caso 3 II	77
Figura 9.1 Estructura alámbrica	79
Figura 9.2 Cargas distribuidas.....	80
Figura 9.3 Cargas puntuales	80
Figura 9.4 Carga del vehículo	81
Figura 9.5 Resultados HEB600.....	82
Figura 9.6 Tensión HEB600	83
Figura 9.7 Flecha peso muerto	83
Figura 9.8 Estructura modificada	84
Figura 9.9 Flecha y esfuerzos HEB320.....	84
Figura 9.10 Esfuerzos Von Misses.....	85
Figura 9.11 Flecha T	86
Figura 9.12 Axil	86

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Presupuesto	5
Tabla 3.1 Requisitos.....	7
Tabla 3.2 Estudiantes UVa.....	8
Tabla 3.3 Alumnos ponderados.....	8
Tabla 3.4 Distribución de alumnos	9
Tabla 5.1 Pesos vehículo.....	30
Tabla 5.2 Coeficientes de fricción [17].....	33
Tabla 5.3 Fuerzas situación horizontal.....	35
Tabla 5.4 Fuerzas situación acelerada.....	35
Tabla 5.5 Fuerzas situación decelerada.....	35
Tabla 5.6 Fuerzas situación inclinada	36
Tabla 5.7 Fuerzas declinadas	36
Tabla 5.8 Sensores vehículo.....	37
Tabla 5.9 Potencia neta motores	46
Tabla 5.10 Potencia externa motores	46
Tabla 5.11 Potencia Sensores.....	47
Tabla 5.12 Potencia LEDs.....	48
Tabla 5.13 Elementos generación	49
Tabla 5.14 Características panel	50
Tabla 5.15 Tipos de cargas.....	51
Tabla 8.1 Generación 100%	69
Tabla 8.2 Parámetros.....	69
Tabla 8.3 Consumos.....	70
Tabla 8.4 Resultados	71
Tabla 8.5 Placa solar	71
Tabla 8.6 Regulador.....	72
Tabla 8.7 Baterías	72
Tabla 8.8 Inversor-Cargador	72
Tabla 8.9 Elementos caso1.....	72
Tabla 8.10 Elementos caso 2.....	74
Tabla 8.11 Elementos Caso 3 I	75
Tabla 8.12 Elementos Caso 3 II	76