

Trabajo de final de Grado

Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Viabilidad Económica, Social y Ambiental del
Hyperloop, El Tren del futuro**

Autor: Pablo Mercadé Lucaya

Director: Lázaro Cremades

Convocatoria: Abril de 2023



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUMEN

En este documento se analiza la viabilidad económica, social y ambiental de la implementación del Hyperloop (medio de transporte capaz de alcanzar altas velocidades debido a su innovador funcionamiento con aire presurizado en el interior de un tubo), poniendo foco en una hipotética ruta entre las ciudades de Barcelona y Mataró.

Este medio de transporte se encuentra en desarrollo actualmente; está siendo diseñado por varias empresas y se están llevando a cabo numerosas pruebas, no obstante, por el momento no se han obtenido los resultados deseados, por lo que nada es definitivo.

Primeramente, una vez establecidos los objetivos y alcance de este trabajo, se ha explicado el funcionamiento del Hyperloop, detallando las principales partes que lo forman. Una vez descrito el ámbito más funcional y técnico, se ha procedido a analizar minuciosamente la ruta de estudio, siendo esta como se ha indicado la que une las ciudades de Barcelona a Mataró, estudiando la historia, longitud, elevación, y trayecto, entre otras características.

Por otra parte, se ha hecho un estudio de la viabilidad económica de esta ruta de Hyperloop, detallando principalmente la inversión inicial necesaria para su infraestructura y el resultado del ejercicio financiero, tomando como referencia los datos proporcionados en *Hyperloop Alpha*.

También se ha analizado el impacto ambiental que supondría esta implantación, teniendo en cuenta tanto la energía producida como la generada en esta hipotética ruta, llevando a cabo una comparación con los medios de transporte existentes.

Por último, se ha elaborado un análisis social y de igualdad de género, focalizándose en el impacto generado en los diferentes medios de transporte tras la inserción del Hyperloop, y el posible efecto inmobiliario generado, cuyo resultado depende principalmente de la localización de la estación.

Con todo, se ha concluido que la ruta entre Barcelona y Mataró es viable, sin embargo, se estima que rutas con distancias más largas ofrecerán mejores resultados, principalmente en el sector económico, donde habrá un mayor margen y un tiempo menor para la recuperación de la inversión inicial.

RESUM

En aquest document s'analitza la viabilitat econòmica, social i ambiental de la implementació del Hyperloop (mitjà de transport capaç d'assolir altes velocitats a causa del seu innovador funcionament amb aire pressuritzat a l'interior d'un tub), posant focus en una ruta hipotètica entre les ciutats de Barcelona i Mataró.

Aquest mitjà de transport es troba en desenvolupament actualment; està sent dissenyat per diverses empreses i s'estan duent a terme nombroses proves, però de moment no s'han obtingut els resultats desitjats, per la qual cosa res no és definitiu.

Primerament, un cop establerts els objectius i l'abast d'aquest treball, s'ha explicat el funcionament de l'Hyperloop, detallant les parts principals que el formen. Un cop descrit l'àmbit més funcional i tècnic, s'ha analitzat minuciosament la ruta d'estudi, essent aquesta com s'ha indicat la que uneix les ciutats de Barcelona a Mataró, estudiant la història, longitud, elevació i trajecte, entre d'altres característiques.

D'altra banda, s'ha fet un estudi de la viabilitat econòmica d'aquesta ruta d'Hyperloop, detallant principalment la inversió inicial necessària per a la infraestructura i el resultat de l'exercici financer, prenent com a referència les dades proporcionades a Hyperloop Alpha.

També s'ha analitzat l'impacte ambiental que suposaria aquesta implantació, tenint en compte tant l'energia produïda com la generada en aquesta hipotètica ruta, duent a terme una comparació amb els mitjans de transport existents.

Finalment, s'ha elaborat una anàlisi social i d'igualtat de gènere, focalitzant-se en l'impacte generat als diferents mitjans de transport després de la inserció de l'Hyperloop, i el possible efecte immobiliari generat, el resultat del qual depèn principalment de la localització de l'estació.

Amb tot, s'ha conclòs que la ruta entre Barcelona i Mataró és viable, però, s'estima que rutes amb distàncies més llargues oferiran millors resultats, principalment al sector econòmic, on hi haurà un marge més gran i un temps menor per a la recuperació de la inversió inicial.

SUMMARY

This document analyzes the economic, social and environmental viability of the implementation of the Hyperloop (a means of transport capable of reaching high speeds due to its innovative operation with pressurized air inside a tube), focusing on a hypothetical route between the cities of Barcelona and Mataró.

This means of transport is currently under development; it is being designed by several companies and numerous tests are being carried out, however, for the moment the desired results have not been obtained, so nothing is definitive.

Firstly, once the objectives and scope of this work have been established, a functional explanation of the Hyperloop has been carried out, detailing the main parts that make it up. Once the most functional and technical area has been described, the study route has been carefully analyzed, being this, as indicated, the one that connects the cities of Barcelona to Mataró, studying the history, length, elevation, and route, among others. characteristics.

On the other hand, a study of the economic viability of this Hyperloop route has been carried out, mainly detailing the initial investment required for its infrastructure and the result of the financial year, taking as reference the data provided in Hyperloop Alpha.

The environmental impact that this implementation has also been analyzed, taking into account both the energy produced and that generated on this hypothetical route, carrying out a comparison with existing means of transport.

Finally, a social and gender equality analysis has been executed, focusing on the impact generated in the different means of transport after the insertion of the Hyperloop, and the possible real estate effect generated, the result of which depends mainly on the location of the station.

All in all, it has been concluded that the route between Barcelona and Mataró is viable, however, it is estimated that routes with longer distances will offer better results, mainly in the economic sector, where there will be a greater margin and a shorter time for the recovery of the initial investment.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	10
1.1. Problemática	10
1.2. Antecedentes	11
2. Objetivos del Proyecto	16
2.1. Finalidad y Propósito	16
2.2. Alcance	16
3. Funcionamiento del Hyperloop	18
3.1. La Cápsula	20
3.2. El Tubo	21
3.3. La Propulsión	25
3.4. La Ruta	25
3.5. La Estación	26
4. La línea Barcelona-Mataró	29
5. Análisis Económico	35
5.1. Coste del estudio	35
5.2. Inversión inicial	35
5.3. Coste anual de explotación	43
5.4. Financiación	45
5.5. Rentabilidad	45
6. Impacto Ambiental	49
6.1. Comparación con los medios de transporte actuales	51
7. Impacto Social y de Igualdad de Género	54
7.1. Proyección e integración de los medios de transporte ya existentes	54
7.2. Impacto causado por rutas a nivel regional	58
7.3. Efecto inmobiliario y la importancia de la ubicación de la estación	60
7.4. Tiempos estimados de ruta	63
7.5. Seguridad y Fiabilidad	65
7.6. Impacto de igualdad de género	66
7.7. Entrevista	66
8. Programación del Proyecto	67
9. Conclusiones	68
10. Referencias bibliográficas	69
11. Anexos	72

Listado de Figuras

Fig. 1.1 Evolución del número total de pasajeros de transporte aéreo en España entre 2012 y 2022 (en millones)	12
Fig. 3.1 Posible diseño de una cápsula de Hyperloop	20
Fig. 3.2 Diseño del interior de la cápsula de pasajeros del Hyperloop	21
Fig. 3.3 Representación de la Cápsula.	22
Fig. 3.4 Infraestructura del Hyperloop, mostrando el tubo, los pilares y los paneles solares	23
Fig. 3.5 Estación de Hyperloop diseñada por Astin John.....	28
Fig. 3.3 Prototipo de Estación Hyperloop en Holanda.....	28
Fig. 4.1 Línea R1: Molins de Rei – Maçanet-Massanes (por Mataró).....	29
Fig. 4.2 Línea propuesta Hyperloop Barcelona-Mataró	30
Fig. 4.3 Perfil de elevación ruta Hyperloop Barcelona-Mataró	31
Fig. 4.4 Perfil de elevación ruta Hyperloop Barcelona-Mataró	31
Fig. 4.5 Perfil de elevación ruta Hyperloop Barcelona-Mataró	31
Fig. 4.6 Ilustración visual del pico del perfil de elevación de la ruta Hyperloop Barcelona-Mataró	32
Fig. 4.7 Perfil de elevación final ruta Hyperloop Barcelona-Mataró	32
Fig. 5.1 Estado inicial y final del tubo en el proceso de evacuación para conseguir el vacío	40
Fig. 8.1 Diagrama de Gantt del proyecto.	17

Listado de Tablas

Tabla 5.1 Coste del estudio	35
Tabla 5.2 Coste de los componentes que forman la cápsula.....	36
Tabla 5.3 Trabajo obtenido suponiendo que el tubo tiene una longitud de 1km.....	41
Tabla 5.4 Costes totales de la infraestructura necesaria del tramo Barcelona – Mataró	42
Tabla 5.5 Vida útil considerada para los diferentes componentes del Hyperloop	43
Tabla 5.6 Amortización anual calculada de los diferentes componentes del Hyperloop	44
Tabla 5.7 Costes totales de construcción por trabajadores	44
Tabla 5.8 Estado de resultados estimado ruta Hyperloop de Barcelona - Mataró....	47
Tabla 6.1 Consumo energético aproximado de diferentes medios de transporte	52
Tabla 7.1 Análisis/Comparación de las tres áreas de desarrollo definidas	62
Tabla 7.2 Tiempos estimados del Hyperloop en diferentes rutas.....	63
Tabla 5.7 Tiempos estimados de diferentes medios de transporte.....	64

1. Introducción

1.1. Problemática

Durante la mayor parte de los siglos XIX y XX, los ferrocarriles formaron la geografía de la ciudad, teniendo gran importancia en el desarrollo la ubicación de las estaciones. A fines del siglo XX, con la aparición de automóviles y aviones, la influencia de los ferrocarriles en la forma urbana en muchas partes del mundo disminuyó considerablemente. En consecuencia, las empresas han intentado modificar los sistemas de transporte público terrestre existentes para maximizar los beneficios del transporte público. A principios de la década de 2000, hubo una segunda revolución ferroviaria llamada tren de alta velocidad (HSR¹), que operaba en muchas partes del mundo, incluidos Japón, Europa occidental y del norte, Corea del Sur y China. Las empresas de todo el mundo están intentando modificar los sistemas de transporte existentes para maximizar los beneficios del transporte público, especialmente en el espacio de superficie de alta velocidad (HS). Para 2013, el CEO de SpaceX, Elon Musk, propuso y abrió un concepto de tren de ultra velocidad (UHSR²) llamado Hyperloop.

El Hyperloop surge como una alternativa innovadora a los medios de transporte actuales, como el coche, el tren y el avión, con el objetivo de resolver los problemas de la congestión del tráfico, la contaminación, los retrasos y la falta de eficiencia en el transporte de pasajeros y mercancías.

El creciente aumento de la población y la urbanización ha provocado que las ciudades se vuelvan más congestionadas, lo que dificulta la movilidad de las personas principalmente y la entrega de mercancías. Además, el uso masivo de combustibles fósiles en los medios de transporte convencionales ha contribuido significativamente a la contaminación atmosférica y el cambio climático.

El Hyperloop, con su alta velocidad, capacidad para transportar grandes volúmenes de pasajeros y mercancías, y su bajo impacto ambiental, se presenta como una solución potencial para estos problemas del transporte.

El ambicioso objetivo de la tecnología es provocar la contracción del espacio-tiempo, aumentando la accesibilidad urbana a través de tiempos de viaje muy cortos y distancias muy largas. El principal punto de venta que utiliza Musk en su propuesta es la reducción de las emisiones de carbono a través de una muy alta eficiencia energética y una gestión eficaz del desarrollo urbano.

Desde 2013, varias empresas han impulsado vigorosamente el desarrollo de Hyperloop en todo el mundo, compitiendo para crear el primer Hyperloop operativo y comercialmente viable del mundo.

¹ Se refiere a High Speed Rail, es decir, trenes de alta velocidad

² Se refiere a Ultra High Speed Rail, es decir, trenes de enorme velocidad. Este concepto es utilizado para referirse a aquellos medios de transporte capaces de alcanzar velocidades superiores a 400 km/h.

En conclusión, con el alto crecimiento y desarrollo que está sufriendo la población, con el paso del tiempo los medios de transporte actuales van perdiendo eficiencia, ofreciendo resultados muy diferentes a los que había originalmente en un inicio. Estos factores principalmente, como comentado anteriormente, son la creciente demanda tanto de transporte de personas como de mercancías y la pérdida de tiempo. Por otro lado, otro de los grandes problemas que necesitan una solución urgente es la contaminación, otro factor más que demuestra la necesidad actual de cambiar el funcionamiento de los medios de transporte.

Una de las principales alternativas para solucionar este problema es el Hyperloop, una solución que mejora drásticamente los factores indicados.

1.2. Antecedentes

La necesidad de transportar personas u objetos ha existido desde hace tiempo, no obstante, con el paso de este mismo dicha necesidad es cada vez más urgente, así como la evolución de estos medios de transporte.

Los avances tecnológicos han permitido el aumento del transporte interurbano de carga y pasajeros, como se puede observar en la demanda creciente del tren de alta velocidad y la aviación comercial. En el siglo XIX surgió el tren atmosférico, que utilizaba la presión del aire y el vacío para moverse, pero nunca se usó para pasajeros. Por otro lado, el tren de alta velocidad, que transporta pasajeros por ferrocarril a velocidades superiores a los 250 km/h, se implementó por primera vez en Japón en 1940 y ahora se utiliza en varios países. A partir de los trenes de alta velocidad, surgió la idea de la levitación magnética en 1970, que fue implementado más adelante en China, concretamente el 2002. Este método, que se sigue utilizando en varios países, como por ejemplo en Japón, con el innovador medio de transporte llamado Maglev. Este, utiliza la tecnología de levitación magnética para levitar y desplazarse sin fricción sobre una guía de rieles. El sistema funciona a través de una serie de electroimanes que se encuentran en la parte inferior del tren y en la guía de rieles, generando un campo magnético que impulsa al tren hacia adelante. Puede alcanzar velocidades de hasta 603 km/h, lo que lo convierte en uno de los trenes más rápidos del mundo.

Sin embargo, el sector aeronáutico es actualmente el medio de transporte más utilizado para distancias largas y en España concretamente ha tenido un crecimiento constante durante años hasta el 2019, que, por causa del COVID, tuvo una disminución significativa. No obstante, como se puede observar en la Figura 1.1, obtenida de los datos publicados mensualmente por AENA³, se ve como los números obtenidos en el año 2022 vuelven a ser muy parecidos a los anteriores a la pandemia.

³ Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea. Empresa pública española que se encarga de la gestión y operación de los aeropuertos en España

En 2022, el tráfico aéreo de pasajeros en España aumentó en más de un 60% con respecto a 2021, registrando finalmente cifras próximas a las registradas antes de la pandemia de COVID-19. De esta forma, se situó en torno a los 243,7 millones de pasajeros a cierre de año.

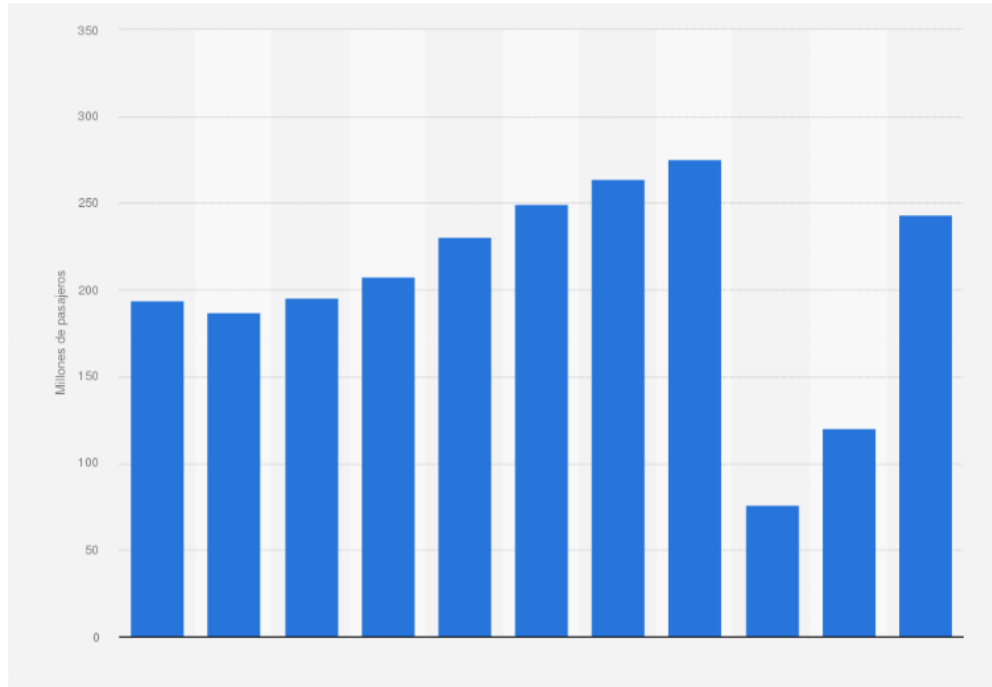


Fig 1.1 Evolución del número total de pasajeros del transporte aéreo en España entre 2012 y 2022 (en millones) [1]

Con el constante crecimiento en este sector, el tiempo de espera, la demanda y por lo tanto el precio aumenta y se ha visto la necesidad de pensar en una nueva solución más efectiva que proporcione el mismo servicio.

Es por eso que en 2013, anticipándose a este posible problema, Elon Musk presentó su nuevo proyecto llamado Hyperloop.

Antes de entrar al detalle con esta innovadora solución, explicamos brevemente el historial de Musk.

Elon Reeve Musk es un inventor, inversor y empresario sudafricano que nació el 28 de junio de 1971 en Pretoria, Sudáfrica.

Tras obtener sus licenciaturas, Musk decidió concentrarse en tres áreas los que consideraba problemas importantes: internet, la energía renovable y el espacio. Empezó su carrera como emprendedor en 1995, cuando decidió abandonar después de dos días el programa de doctorado en Física Aplicada y Ciencia de Materiales en la Universidad de Standford, para fundar Zip2⁴ junto a su hermano y un amigo. Con el capital obtenido podía seguir innovando en nuevos proyectos,

⁴ Zip2 era una compañía que proporcionaba software de guías locales para periódicos en internet

por ejemplo, Cash-X que después se fusionó con PayPal que fue fundada en 1998 y revolucionó el sistema de pagos por internet.

Después, en 2002 se fundó SpaceX, un grupo dedicado a los viajes espaciales que firmó un contrato con la Nasa por 1.600 millones de dólares. 2 años más tarde tuvo origen su siguiente empresa Tesla, que es el primer fabricante de coches exclusivamente eléctricos. Por otra parte, otro de sus grandes lemas que tienen una gran importancia en sus siguientes proyectos es el tiempo. Su fin es reducir significativamente el tiempo en los medios de transporte, para que sean más efectivos y rápidos además de no afectar al medio ambiente. El primer proyecto que propone Elon Musk fue en 2013 y es el Hyperloop, un modo de transporte nuevo que busca cambiar el paradigma actual al ser rápido y barato para personas y mercancías.

Es evidente que a Musk no le gusta perder el tiempo y tiene una gran motivación en cambiar el mundo lo antes posible, concretamente el transporte. Es por eso que vuelve a fundar una nueva compañía llamada The Boring Company, una compañía de excavación e infraestructura fundada por Elon Musk a finales de 2016 cuyo objetivo es mejorar la velocidad de excavación lo suficiente para establecer una red subterránea de túneles que sea económicamente factible. Y de ahí surge su proyecto “3D tunneling” que consiste en túneles subterráneos donde los coches podrán viajar sobre una plataforma a una velocidad aproximada de 200km/h. Apenas dos meses después de tener la iniciativa de este proyecto, Musk ya empezaba a construir un túnel desde las oficinas de SpaceX.

Además, en 2006 fundó otra empresa llamada SolarCity. SolarCity Corporation es una empresa estadounidense subsidiaria de Tesla, Inc., especializada en energía solar. Provee servicios de energía a los propietarios de viviendas, empresas y organizaciones gubernamentales/sin ánimo de lucro, y tiene su sede en San Mateo, California. Esta empresa comercializa, fabrica e instala paneles solares residenciales y comerciales en los EE. UU.

En 2015, junto a Sam Altman, Greg Brockman, Ilya Sutskever, Wojciech Zaremba y John Schulman fundó Open AI, una organización de investigación en inteligencia artificial (IA) con sede en San Francisco, California. La organización se centra en investigar en diferentes áreas de IA⁵, como el aprendizaje profundo, el procesamiento del lenguaje natural y el aprendizaje automático para desarrollar tecnologías que puedan mejorar la vida humana y ayudar a resolver problemas importantes del mundo. OpenAI también promueve la colaboración entre la comunidad científica y la industria para desarrollar tecnologías de IA de manera responsable y ética.

Un año después, en 2016 fundó Neuralink, una empresa dedicada a investigar y desarrollar tecnología de neurociencia para mejorar la comunicación entre el cerebro humano y las computadoras. La compañía está desarrollando

⁵ Inteligencia Artificial: La Inteligencia Artificial (IA) es la combinación de algoritmos planteados con el propósito de crear máquinas que presenten las mismas capacidades que el ser humano.

tecnologías de implantes cerebrales que permitirían a las personas con discapacidades controlar dispositivos externos con su cerebro y también está investigando en el campo de la inteligencia artificial y como mejorar las capacidades cognitivas de los humanos.

¿De dónde surge la idea?

La principal causa fue el sistema de raíl de alta velocidad que se propuso para California y que actualmente está en desarrollo, el cual criticó directamente en la propuesta. Él, se mostraba en desacuerdo diciendo que la única opción de que haya un transporte altamente rápido es construir un tubo sobre o bajo el suelo que contenga un ambiente “especial”, es decir, que no sea el mismo ambiente en el que todos vivimos y en el que funcionan todos los trenes existentes hoy en día. Además, Musk consideraba que los precios del sistema de alta velocidad que se está desarrollando en California tiene un precio desorbitado.

Según Musk, la motivación detrás del proyecto era ofrecer una alternativa de transporte que fuera más rápida que el tren y más sostenible que el avión, reduciendo así la congestión del tráfico y la contaminación ambiental. Además, Musk vio en el Hyperloop una oportunidad de promover la innovación tecnológica y fomentar la colaboración entre empresas y universidades en torno a un proyecto ambicioso. Su objetivo es traer el vuelo al suelo y eliminar todas las complicaciones al volar. Y por eso piensa en el nuevo e innovador proyecto Hyperloop. No hay torres para controlar el tráfico, no hay grandes aviones que consumen una gran cantidad de energía, y no hay necesidad de presentarse en la estación 1 hora o más antes de la salida. Se podría decir, más o menos, que es más o menos un avión dentro de un tubo.

El desarrollo de dicho proyecto lo están llevando a cabo tres empresas: Hyperloop One, Hyperloop Transportation Technology y Transpod:

- **Hyperloop One:** Hyperloop One es una empresa estadounidense de tecnología de transporte de alta velocidad que se dedica al desarrollo y construcción de sistemas de transporte Hyperloop. La empresa fue fundada en 2014 bajo el nombre de Hyperloop Technologies y cambió a su nombre actual en 2016. La compañía ha realizado varias pruebas con éxito en su sistema de propulsión. La empresa está liderada por un equipo de líderes en transporte, ingeniería y negocios, y ha establecido acuerdos con varios gobiernos y organizaciones para desarrollar proyectos piloto y pruebas de campo en diferentes partes del mundo. Hyperloop One se centra en desarrollar una infraestructura de transporte sostenible y en la promoción de un enfoque de negocios colaborativo y abierto para el desarrollo de Hyperloop.

En los últimos meses han ido más allá realizando como demostración el desplazamiento de una cápsula completa. Hasta ahora tan sólo se había desplazado parte de la misma. La cápsula llamada XP-1 alcanzó, según

aseguran, una velocidad de 310 kilómetros por hora y recorrió una distancia de 437 metros. Se siguen haciendo numerosas pruebas y construyendo diferentes prototipos.

- **Hyperloop Transportation Technologies (HTT):** Empresa estadounidense que se dedica al desarrollo y construcción de sistemas de transporte Hyperloop. La empresa fue fundada en 2013 por Dirk Ahlborn y se centra en desarrollar tecnologías de transporte de alta velocidad que puedan viajar a velocidades superiores a 1,000 kilómetros por hora. HTT ha desarrollado un enfoque único en el diseño de Hyperloop, basado en la colaboración con investigadores, universidades y empresas de todo el mundo. La empresa ha establecido acuerdos con varios gobiernos y organizaciones para desarrollar proyectos piloto y pruebas de campo en diferentes partes del mundo. HTT también se enfoca en el desarrollo de una infraestructura de transporte sostenible y en la promoción de un enfoque de negocios colaborativo y abierto para el desarrollo de Hyperloop
- **TransPod:** TransPod es una empresa canadiense de tecnología de transporte de alta velocidad que se dedica al desarrollo y construcción de sistemas de transporte Hyperloop. La empresa fue fundada en 2015 por Sebastien Gendron y se centra en desarrollar un sistema de Hyperloop que pueda viajar a velocidades superiores a 1,000 kilómetros por hora. TransPod se enfoca en el desarrollo de una infraestructura de transporte sostenible y en la promoción de un enfoque de negocios colaborativo y abierto para el desarrollo de Hyperloop.
La empresa ha realizado varias pruebas con éxito en su sistema de propulsión y ha establecido acuerdos con varios gobiernos y organizaciones para desarrollar proyectos piloto y pruebas de campo en diferentes partes del mundo. TransPod se enfoca en el desarrollo de un Hyperloop que sea seguro, confiable y eficiente desde el punto de vista energético. Es una de las principales compañías que se está esforzando en desarrollar la tecnología Hyperloop en el mundo.

2. Objetivos del Proyecto

2.1. Finalidad y Propósito

Este proyecto tiene como finalidad hacer un estudio exhaustivo del nuevo e innovador medio de transporte Hyperloop, con foco especial en la ruta de estudio.

Se pretende entender bien su funcionamiento técnico, la viabilidad económica y su impacto tanto social como ambiental. Para ello se tomará como referencia el documento publicado por Elon Musk en 2013 llamado Hyperloop Alpha⁶ [2]. Dicha propuesta expone únicamente la alternativa con aire presurizado como solución para sustentar las cápsulas, que es la que se tendrá en cuenta a lo largo del trabajo. El objetivo es no solo analizar estos factores, sino también hacer una comparativa con los medios de transporte ya existentes, principalmente con sus impactos sociales y ambientales. La inserción de un medio de transporte de este calibre supondrá un significativo cambio en el ecosistema de los alrededores, causando cambios importantes no solo en la fisionomía de la población y en sus costumbres, sino que también tendrá un notable efecto en el sector inmobiliario, teniendo esto grandes impactos en muchos negocios.

Por otro lado, se estudiará el costo total, teniendo en cuenta los costes fijos, variables y el mantenimiento de dicho transporte, estudiando si es viable o no, y qué supondrá semejante gasto.

Por último, otro de los motivos será analizar el impacto ambiental que tendrá el Hyperloop. En el caso de que este medio de transporte sea autosuficiente puede ser muy positivo y a la vez tener un impacto muy positivo. Además, la posibilidad de que también genere energía propia mediante paneles solares puede ser vital para tener un entorno mucho más sostenible del que tenemos hoy en día.

2.2. Alcance

Para poder llevar a cabo todos los cálculos y analizar los impactos sociales y ambientales, se ha fijado una ruta de estudio para todo el proyecto.

Esto ha sido necesario ya que hacerlo en genérico, o más bien, por kilómetro, ofrece información considerablemente imprecisa. Dependiendo de la ruta en cuestión, los costes tanto de construcción como de mantenimiento no serán los mismos. También juega un papel muy importante el terreno y la superficie de la ruta, principalmente en la construcción de toda la infraestructura. Por otro lado,

⁶ Hyperloop Alpha es un documento elaborado por SpaceX y Tesla donde se detalla, principalmente a nivel técnico, el Hyperloop. Se le pone principal foco a la ruta entre San Francisco y Los Ángeles. Se utilizará a lo largo de este trabajo para especificaciones principalmente económicas y también técnicas.

para estudiar tanto los impactos sociales como ambientales, fijar una localización es vital para analizar las poblaciones cercanas y los cambios generados, además del tiempo de dicha localización para poder calcular la energía media generada durante un cierto periodo.

Dicho esto, se ha decidido que la ruta de estudio será **Barcelona – Mataró**. Se ha optado por una ruta más a nivel regional ya que los impactos, principalmente sociales serán más visibles de este modo.

Así pues, el trabajo estará enfocado para esta ruta exclusivamente.

Se ha escogido esta ruta ya que, pese a que la idea principal de este medio de transporte es para rutas de longitudes considerables (como Barcelona-París o Barcelona-Madrid), se quiere analizar la viabilidad en una ruta con una longitud más reducida.

3. Funcionamiento del Hyperloop

Un cruce entre un tren bala, un Concorde y una mesa de hockey de aire. Elon Musk definió su creación con estas palabras. El Hyperloop es un sistema de transporte por tubería capaz de alcanzar velocidades cercanas a los 1.200 kilómetros por hora. Es una nueva forma de transporte que pretende transformar los medios de transporte actuales al ser rápido y barato para personas y mercancías. Además, es un sistema casi instantáneo que es ambientalmente sostenible. Un Hyperloop consiste en un tubo con cápsulas ("trenes") transportadas a velocidades bajas y altas a lo largo del tubo. Las cápsulas del Hyperloop se suspenden en el interior del tubo mediante el uso de aire presurizado. La cápsula cuenta con un sistema de compresores de aire en la parte delantera que aspira aire a través de la parte inferior de la cápsula y lo expulsa hacia abajo, lo que crea una especie de colchón de aire presurizado que levanta la cápsula y la mantiene flotando en el centro del tubo. Este sistema de levitación sin contacto minimiza la fricción y permite que la cápsula se mueva a altas velocidades con un consumo de energía mucho menor que otros medios de transporte.

Son accionados por motores de inducción lineal y compresores de aire. Según el diseño de Musk, la cápsula puede acomodar hasta 28 pasajeros. El secreto está en el sistema de suspensión sobre el que circula el tren, que no requiere la instalación de costosos kilómetros de vía, reduce por completo la fricción y es más eficiente desde el punto de vista energético. Además, no afecta al medio ambiente. Ahora bien, lo que lo hace conveniente es la velocidad extrema que puede alcanzar una de estas cápsulas, reduciendo mucho el tiempo de llegada de un punto a otro, de horas a minutos.

Además, una de las grandes ventajas es que, a diferencia de otros transportes, Hyperloop no se ve afectado ni por el viento, el tiempo o la lluvia, lo que lo vuelve más fiable, y a la vez más seguro.

Según el modelo propuesto por Space X y Tesla Motors en *Hyperloop Alpha* el sistema está formado principalmente por las cápsulas, los tubos y el sistema de propulsión.

La cápsula

- Cápsulas selladas que transportan 28 pasajeros cada una y viajan a lo largo del interior del tubo. Una única cápsula está estimada que tendrá capacidad de hasta 28 pasajeros, pudiendo abastecer una demanda de 840 pasajeros en horas bajas y 3.360 pasajeros en horas pico. También se ha dimensionado un sistema más grande que permite el transporte de 3 automóviles de tamaño completo con pasajeros para viajar en la cápsula. No obstante, para facilitar los

cálculos, en este trabajo estudiaremos únicamente la cápsula que transporta personas exclusivamente.

- Las cápsulas se separan dentro del tubo aproximadamente 37 km en promedio durante el funcionamiento.
- Las cápsulas se soportan mediante cojines de aire que funcionan utilizando un depósito de aire comprimido y elevación aerodinámica.

El tubo

- El tubo está hecho de acero. Dos tubos se soldarán juntos uno al lado del otro para permitir que las cápsulas viajen en ambas direcciones.
- También hay pilares que se colocarán cada 30 metros para dar soporte al tubo. Estos han de estar hechos de un material duradero y resistente que pueda soportar la carga y la vibración de los tubos.
- Habrá paneles solares que cubrirán la parte superior de los tubos para proporcionar energía solar al sistema.

La propulsión

- Se construyen aceleradores lineales⁷ a lo largo de la longitud del tubo en varios lugares para acelerar las cápsulas.
- Rotores⁸ están situados en las cápsulas para transferir impulso a través de los aceleradores lineales.

La Ruta

- La ruta del Hyperloop dependerá de muchos diferentes factores, además de influenciar en temas como la aceleración y la velocidad límite. Dependiendo del lugar por dónde la ruta pasa y si el tubo se mantiene en línea recta durante una determinada distancia son uno de los factores más importantes para determinar cualquiera de los factores anteriores. Como comentado, la ruta fijada es la de Barcelona-Mataró, una ruta con muy poco ángulo de giro y una distancia de aproximadamente 30km.

La terminal

- La estación del Hyperloop se espera que sea una estación de transporte moderna y altamente eficiente, diseñada para proporcionar una experiencia de viaje rápida y cómoda para los

⁷ Máquina que usa energía solar para formar una corriente rápida de partículas subatómicas. Esto crea una radiación de energía alta

⁸ Componentes que giran con el fin de transmitir la potencia

pasajeros. El posicionamiento de la estación es vital ya que tendrá un gran impacto en sus alrededores, principalmente inmobiliario.

Ahora, vamos a entrar más en detalle en estos diferentes componentes de los cuales el Hyperloop consta:

3.1. La Cápsula

Existen dos configuraciones de cápsulas; la que se utilizaría para transportar pasajeros exclusivamente, diseñada para albergar hasta 28 personas y la otra opción permite transportar pasajeros y tres vehículos del tamaño del Tesla model S⁹.

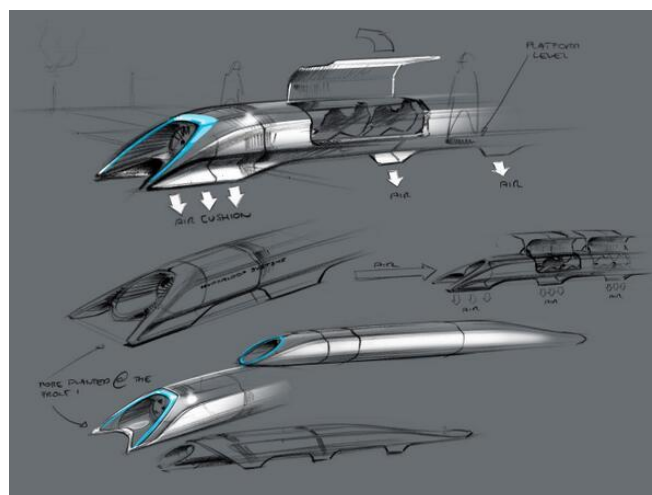
Su geometría

En el documento de Hyperloop Alpha, se presentó una propuesta de diseño de la cápsula del Hyperloop con las siguientes medidas:

- Longitud: 8,5 metros
- Diámetro exterior: 1,86 metros
- Diámetro interior: 1,25 metros

Es importante destacar que estas medidas son parte de una propuesta de diseño inicial y podrían variar en futuras versiones de la cápsula del Hyperloop.

Con el fin de optimizar la velocidad de la cápsula y el rendimiento, el tamaño del área frontal se ha minimizado, manteniendo al mismo tiempo el confort de los pasajeros.



⁹ Automóvil eléctrico de cinco puertas fabricado por Tesla Inc. Tiene una longitud de 5,021 metros.

Fig. 3.1 Posible diseño de una cápsula de Hyperloop. [2]

El interior

El interior de la cápsula se ha diseñado especialmente teniendo en cuenta la seguridad y la comodidad de los pasajeros. El asiento se sienta cerca del cuerpo para mayor comodidad durante la aceleración de alta velocidad experimentada en la carretera. La cabina exhibirá hermosos paisajes y cada pasajero tendrá acceso a su propio sistema de entretenimiento personal. Se espera que el peso total dentro del compartimiento de pasajeros del Hyperloop sea cercano a los 2500 kg, incluidos los asientos, los sistemas de sujeción, los paneles interiores, las puertas, el maletero y las pantallas de entretenimiento. Por otro lado, la cápsula que puede transportar coches se estima en unos 2.700 kg.

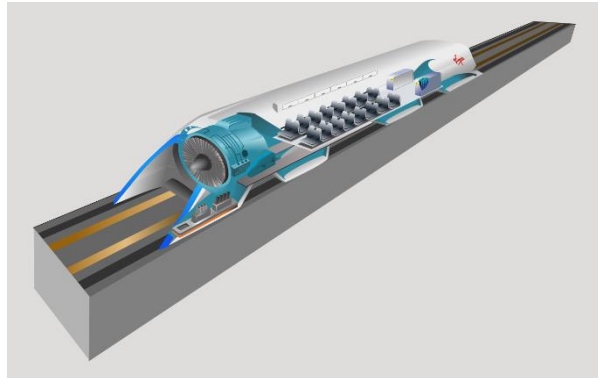


Fig. 3.2 Diseño del interior de la cápsula de pasajeros del Hyperloop. [2]

El compresor

El sistema mueve la cápsula a través del tubo comprimiendo el aire que pasa por la cápsula. También proporciona cojinetes de aire que soportan el peso de la cápsula a lo largo de su recorrido. Estos compresores son compresores axiales¹⁰, muy parecidos a los que se usan en los aviones, pero en lugar de ser accionados por una turbina en el escape, son accionados por un motor eléctrico. En el diseño de Musk, hay dos compresores con un intercooler¹¹ o radiador intermedio entre ellos. La razón de esto es que, si solo se usa un compresor, las temperaturas generadas al comprimir el aire excederán los límites de lo que pueden soportar los materiales, pudiendo causar que se derritan.

En la Figura 3.3 se puede ver la representación de la cápsula, donde se muestra el compresor de aire en la parte delantera, el compartimiento de pasajeros en el medio, el compartimiento de batería en la parte trasera y esquís con cojinetes de aire en la parte inferior.

¹⁰ Tipo de compresor utilizado en motores de turbina y reactores de aviones, así como en otros sistemas de propulsión, que se encarga de comprimir el aire antes de que entre en la cámara de combustión. Es capaz de generar un mayor flujo de aire comprimido para su uso en sistemas de propulsión.

¹¹ El intercooler se coloca entre el compresor y el colector de admisión del motor y tiene como función enfriar el aire comprimido que entra en el motor, lo que aumenta su densidad y su rendimiento.

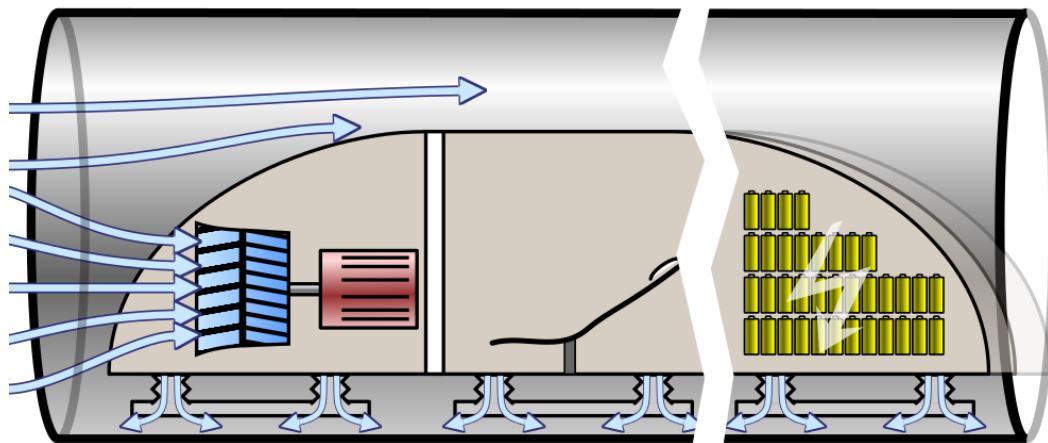


Fig. 3.3 Representación de la Cápsula. [3]

La suspensión

En el documento *Hyperloop Alpha*, Elon Musk propone un sistema de suspensión activa para la cápsula del Hyperloop. Este sistema se basa en el uso de aire comprimido para levantar y mantener la cápsula a una distancia de aproximadamente 1 cm sobre la guía de levitación magnética. Además, se utilizan sensores y actuadores para ajustar constantemente la presión del aire y mantener la estabilidad de la cápsula durante la aceleración, la deceleración y en los cambios de dirección. Este sistema de suspensión activa permite una conducción más suave y reduce la necesidad de mantenimiento en comparación con otros sistemas de suspensión pasiva.

La Propulsión

Se ha diseñado un sistema de motor lineal avanzado para acelerar la cápsula por encima de los 1.220 km/h. El motor móvil (rotor) estará situado en el vehículo para ahorrar peso y requerimientos de potencia, mientras que el tubo incorporará el elemento motor estacionario (estator) que alimenta el vehículo.

- El **motor lineal** es un tipo de motor eléctrico que convierte la energía eléctrica en movimiento lineal. A diferencia de los motores rotativos convencionales, no tienen partes móviles giratorias y en su lugar utilizan campos magnéticos variables para generar la fuerza necesaria para producir el movimiento lineal. Estos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde sistemas de transporte como trenes de levitación magnética (Maglev) y el Hyperloop, hasta equipos de fabricación, maquinaria industrial y robótica. Consta de dos partes principales: el estator (la parte que contiene el rotor) y los polos magnéticos que recubren el núcleo de hierro.
- El **motor móvil (rotor)** es la parte móvil del motor. El rotor es el elemento de transmisión mecánica porque de él depende la conversión de energía eléctrica en energía mecánica.

- El **motor estacionario** (estator) constituye la parte fija del motor. Es el elemento que opera como base, permitiendo que desde ese punto se lleve a cabo la rotación del motor. El estator no se mueve mecánicamente, pero sí magnéticamente.

3.2. El Tubo

El Hyperloop estará dentro de unos tubos de acero, sostenido por unas columnas, donde habrá un vacío parcial. El tubo está dimensionado para un flujo de aire óptimo alrededor de la cápsula, lo que mejora el rendimiento y el consumo de energía a las velocidades a las que viaja la cápsula. Se espera que la presión dentro del tubo permanezca alrededor de 0,015 psi (100 Pa). Para minimizar el costo de la tubería, se elevará sobre los pilares, lo que reducirá significativamente el tamaño del área de construcción requerida sobre el suelo.

Como se puede ver en la Figura 3.4, los tubos estarán cubiertos de paneles solares para autogenerar su propia energía con la finalidad de ser autosuficientes energéticamente.

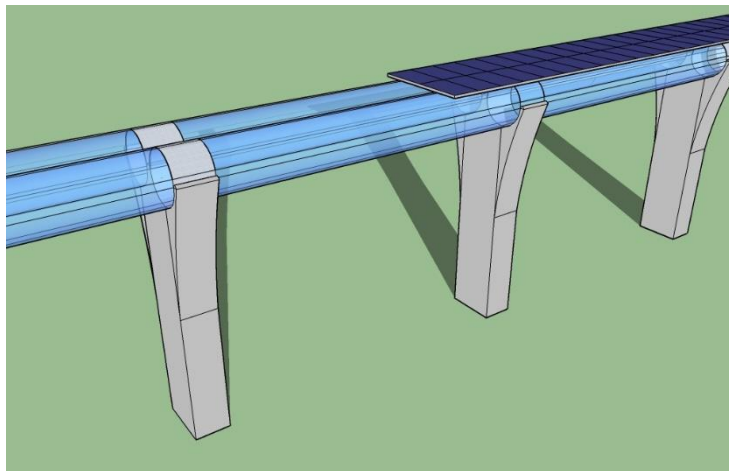


Fig. 3.4 Infraestructura del Hyperloop, mostrando el tubo, los pilares y los paneles solares. [2]

Su Geometría

La geometría del tubo del Hyperloop consiste en un tubo de acero de aproximadamente 3,3 metros de diámetro, con una longitud variable dependiendo de la ruta en cuestión. El tubo está diseñado para mantener una presión muy baja, similar a la que se encuentra en el espacio exterior, para reducir la resistencia del aire y permitir que las cápsulas viajen a velocidades muy altas. El tubo está elevado sobre pilares a una altura de aproximadamente

6 a 10 metros sobre el nivel del suelo para evitar interferencias con la superficie terrestre, y se construye de manera recta y en línea recta para reducir la longitud total del recorrido y minimizar el tiempo de viaje. Además, se prevé que el tubo se construirá con secciones de aproximadamente 100 metros de longitud, lo que facilitará su fabricación, montaje y mantenimiento.

La construcción del tubo

Para mantener los costos al mínimo, se apuesta por tubos de acero como el material para el interior de las tuberías. Los tramos de la tubería serán prefabricados y soportados por columnas que se encuentran aproximadamente cada 30 metros, las cuales varían levemente dependiendo de la posición. La construcción de tubo de acero facilita la soldadura de las diferentes partes del tubo. Se ha elegido el acero como material para las tuberías por su eficacia, ligereza, facilidad de uso y disponibilidad.

El acero es una buena opción para los tubos del Hyperloop debido a varias razones:

- **Durabilidad:** El acero es un material muy resistente y duradero. Es capaz de soportar cargas pesadas y es resistente a la corrosión, lo que lo hace ideal para su uso en un entorno de alta velocidad y alto tráfico.
- **Flexibilidad:** El acero es un material muy versátil que se puede moldear y cortar fácilmente para adaptarse a diferentes diseños y configuraciones.
- **Eficiencia:** El acero es un material muy eficiente desde el punto de vista energético. Su fabricación y transporte no requieren de una gran cantidad de energía, y su reciclaje es fácil y eficiente.
- **Disponibilidad:** El acero es un material ampliamente disponible y utilizado en la industria. Su producción y procesamiento son bien establecidos y se cuenta con una gran experiencia en su manejo y procesamiento.
- **Coste:** El acero es un material relativamente económico y su uso en la construcción de infraestructura es común, lo que permite que se cuenta con una gran cantidad de proveedores y fabricantes con experiencia en su uso y procesamiento.

Teniendo en cuenta estas características, el acero se ha convertido en una opción popular para la construcción de los tubos del Hyperloop.

3.3. La Propulsión

El avance del sistema tiene los siguientes requisitos:

- Acelerar la cápsula de 0 a 480 km/h para velocidades relativamente bajas en áreas urbanas.
- Mantener la cápsula a 480 km/h cuando sea necesario.
- Acelerar la cápsula de 480 a 1.220 km/h al inicio de un tramo más largo, con una aceleración máxima de 0,5g.
- Reducir la velocidad de la cápsula a 480 km/h al final del tramo.

Componentes del almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía permite que el acelerador lineal del Hyperloop sólo extraiga su potencia media de 8.000 CV (6 MW), en lugar de su potencia máxima de 74.000 CV (52 MW).

El lanzamiento de 1 cápsula sólo utiliza el 0,5% de la energía total, por lo que la degradación debida a un ciclo repetitivo no es un problema. Con una construcción y controles adecuados, la batería está conectada, eliminando la necesidad de un convertidor DC-DC¹² adicional para conectarlo al sistema de propulsión. Gracias a esto, se simplifica la alimentación del sistema, reduciendo la cantidad de líneas de potencia necesarias además de permitir un mejor manejo de la potencia, control de tensiones de entrada y un aumento de seguridad.

3.4. La Ruta

Al elegir o aceptar una ruta de construcción, se estima que el mínimo requerido para que un vehículo de este tipo funcione sin problemas es de aproximadamente 50 kilómetros. El Hyperloop podrá viajar de Los Ángeles a San Francisco en unos 35 minutos. Pero habrá muchas otras rutas además de esta, todas las cuales deben seguir las mismas consideraciones, entre ellas:

- Ubicar las tuberías lo más cerca posible de los derechos de paso¹³ existentes.
- Limitar la velocidad máxima de la cápsula a 1.220 km/h por motivos aerodinámicos.
- Limitar la aceleración de los pasajeros a 0,5g¹⁴.
- Restricciones geográficas locales, incluidas las ubicaciones de áreas

¹² Un convertidor DC-DC es un circuito electrónico o dispositivo electromagnético que convierte una fuente de corriente continua de un nivel de voltaje a otro. Es un tipo de convertidor de energía eléctrica.

¹³ Un derecho de paso es el derecho de cualquier persona a pasar sobre la propiedad de otra persona a pie, a caballo o en un vehículo, o conducir un animal de carga o una carreta

¹⁴ La gravedad es una medida de la aceleración. Se basa en la aceleración que produce la gravedad de la Tierra en cualquier objeto (en este caso, una persona en un Hyperloop)

urbanas, montañas, embalses, parques nacionales, carreteras, vías férreas, aeropuertos, etc. Las rutas deben respetar las estructuras existentes.

Para la eficiencia aerodinámica, la velocidad de la cápsula es normalmente:

- **480 km/h** donde, debido a la situación geográfica, el tubo necesita un radio de curvatura menor a 1,6 km.
- **1.220 km/h** donde la situación geográfica permite un radio de curvatura mayor a 4.8 km, o donde se permita un tubo en línea recta

Estos radios de curvatura están calculados para que los pasajeros no experimenten aceleraciones superiores a 0,5 g.

Optimización de la ruta

Es necesario optimizar la ruta para evitar curvas que puedan causar molestias a los pasajeros al acelerar. Esto se puede lograr desviándose del sistema vial actual, construyendo pilones para permitir cambios de elevación o túneles. La ruta propuesta considera combinaciones de alturas de torre de 6, 15 y 30 m para subir y bajar la tubería Hyperloop por encima de los obstáculos geográficos.

3.5. La Estación

La estación del Hyperloop será un lugar de transición para los pasajeros y las cargas que se muevan a través del sistema de tubos. La estación se diseñará para facilitar la entrada y salida de los pasajeros, así como para cargar y descargar la carga. También puede incluir áreas de espera, restaurantes y tiendas minoristas.

En términos de su diseño físico, la estación del Hyperloop será un edificio con una entrada en un extremo y una salida en el otro. Los tubos del Hyperloop entrarán y saldrán del edificio a través de las paredes y se conectarán con la estación en su interior. El edificio puede tener una forma aerodinámica para facilitar el flujo de aire y reducir la resistencia.

Algunas propuestas para la estación del Hyperloop también incluyen características futuristas, como sistemas de realidad aumentada para guiar a los pasajeros, vehículos autónomos para transportarlos desde y hacia la estación, y sistemas de energía renovable para alimentar la estación. En resumen, la estación del Hyperloop será una parte integral del sistema en sí, diseñada para proporcionar la mejor experiencia posible a los pasajeros y garantizar la eficiencia y seguridad del sistema en su conjunto.

Se esperan características muy semejantes a las de un aeropuerto. Estas incluyen:

- **Accesibilidad:** Las estaciones del Hyperloop deben ser fácilmente accesibles para personas con discapacidades y personas con equipaje.
- **Seguridad:** Las estaciones del Hyperloop deben contar con medidas de seguridad avanzadas para garantizar la seguridad de los pasajeros y el personal.
- **Conectividad:** Las estaciones del Hyperloop deben estar conectadas a otras redes de transporte, como trenes, autobuses y coches compartidos, para proporcionar una experiencia de viaje fluida para los pasajeros.
- **Servicios:** Las estaciones del Hyperloop deben proporcionar servicios adicionales, como servicios de información, servicios de comida y bebida, y servicios de almacenamiento de equipaje.
- **Información:** Se debe proporcionar información en tiempo real sobre los tiempos de llegada y salida de los trenes, así como sobre las conexiones con otros medios de transporte.
- **Tecnología:** Las estaciones del Hyperloop deben contar con tecnologías avanzadas para facilitar el proceso de embarque, como el uso de boletos electrónicos y la verificación automatizada de identidad.

A continuación, se muestran diferentes propuestas para la estación de Hyperloop:



Fig. 3.5 Estación de Hyperloop diseñada por Astin John. [4]

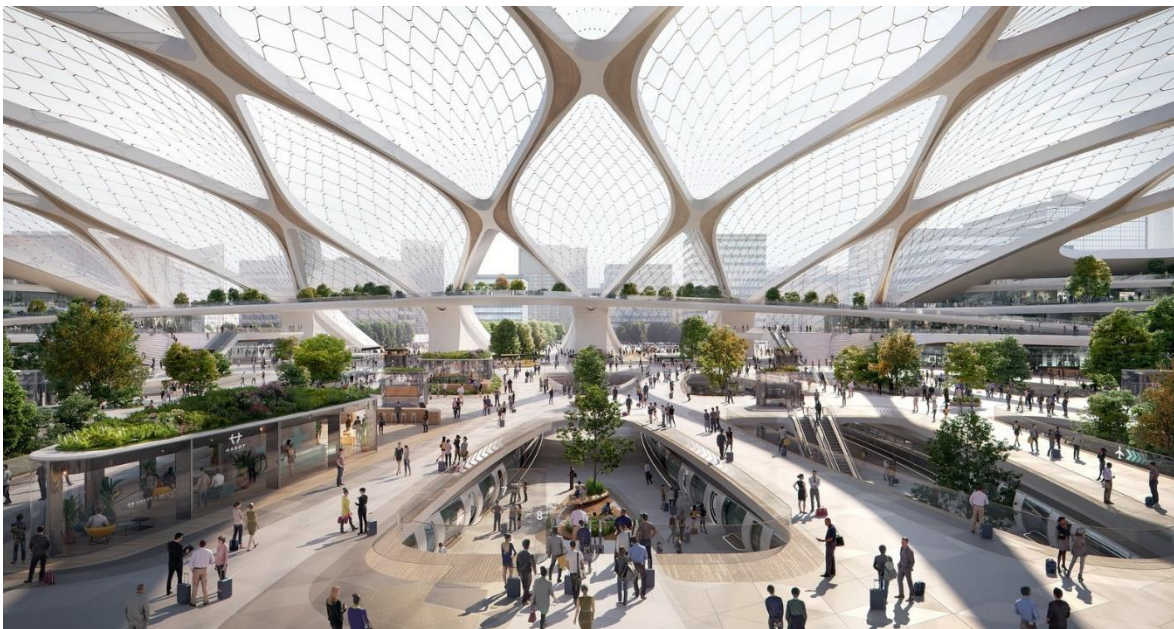


Fig. 3.6 Prototipo de Estación Hyperloop en Holanda. [5]

4. La Línea Barcelona-Mataró

La línea de ferrocarril que conecta Barcelona con Mataró, Blanes y la estación de Massanet-Massanas, conocida como la línea Barcelona-Mataró tiene una longitud de 73 kilómetros. Transcurre por la costa catalana y fue inaugurada en 1848 como el primer ferrocarril construido en la península ibérica. La construcción y la explotación de la línea fueron realizadas por la compañía de los Caminos de Hierro de Barcelona a Mataró, que más tarde se fusionó con otra compañía para crear la compañía de los Caminos de Hierro de Barcelona a Gerona¹⁵. La línea atraviesa el túnel de Montgat, siendo la infraestructura ferroviaria más antigua de lo que actualmente es España, tras la independencia de Cuba. La velocidad comercial, es decir, la velocidad a la que el tren realiza su recorrido incluyendo paradas y tiempo de espera en las estaciones, por lo general, es de 50 km/h. Tiene una duración de 47 minutos entre las paradas de Barcelona y Mataró y un valor promedio de 3€ para el billete.

Esta ruta mencionada se puede apreciar en la Figura 4.1.



Fig. 4.1 Línea R1: Molins de Rei – Maçanet-Massanes (por Mataró) [6]

A la hora de diseñar la ruta del Hyperloop, se ha tomado como referencia esta línea R1 que une Barcelona y Mataró. Esta, es sin lugar a duda la opción más viable y efectiva principalmente debido a su poco desnivel y su alto radio de

¹⁵ Caminos de Hierro de Barcelona a Gerona fue una empresa ferroviaria española que unió Barcelona y Gerona mediante el ferrocarril. Se creó en 1862 tras la fusión de las compañías ferroviarias Camino de Hierro del Norte (Barcelona-Granollers) y Camino de Hierro del Este (Barcelona-Mataró).

curvatura. No obstante, teniendo en cuenta que el medio de transporte se mueve a una velocidad media mucho mayor (la línea de tren convencional tiene una velocidad media de 47km/h mientras que el Hyperloop alcanzaría velocidades hasta los 450km/h), se han de eliminar aquellas curvas más pronunciadas que puedan resultar peligrosas para el Hyperloop. Con esto dicho, se ha diseñado una nueva ruta, aprovechando y utilizando gran parte del terreno ya utilizado en la línea de tren ya existente. Esta nueva ruta se muestra en la Figura 4.2, la cual también se encuentra en el Anexo A.



Fig. 4.2 Línea propuesta Hyperloop Barcelona-Mataró. Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

Saliendo de Barcelona, la ruta parte de la estación de Sants de Barcelona y finaliza en la Estación de Tren de Mataró ubicada en Av. del Maresme 166. En total, la ruta es de **31,079km** de distancia.

Los primeros 12,5km de la ruta serían subterráneos, ya que, si se quiere cumplir con los requisitos básicos de una ruta de Hyperloop, donde se incluye la aceleración de los pasajeros, el paso por el centro de la ciudad no es una opción.

Sin embargo, una vez fuera de la ciudad condal, todo el tramo sería externo, siguiendo la misma línea que el tren convencional. Una vez en este punto el tramo es prácticamente llano siguiendo el perímetro de la costa.

Otra característica por destacar de esta ruta es el desnivel con la que cuenta. La figura 4.3 muestra el perfil de elevación de la ruta diseñada para el Hyperloop.



Fig. 4.3 Perfil de elevación ruta Hyperloop Barcelona-Mataró. Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

Tal y como muestra este gráfico, el desnivel es mínimo, con una altitud máxima de 38 metros y una altitud mínima de 0 metros.

Sin embargo, el perfil de elevación de la ruta no es precisamente este.



Fig. 4.4 Perfil de elevación ruta Hyperloop Barcelona-Mataró. Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

Como se ha mencionado anteriormente, los primeros 12,5 Km de la ruta serán subterráneos. El perfil de elevación muestra el desnivel de la superficie terrestre, es decir, no muestra el desnivel real. Teniendo en cuenta este factor, el perfil de elevación real de la ruta debería eliminar el desnivel del área sombreada de la Figura 4.4, dejando como resultado el que se muestra a continuación:



Fig. 4.5 Perfil de elevación ruta Hyperloop Barcelona-Mataró. Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

La Figura 4.5 muestra el perfil de elevación de la ruta teniendo en cuenta el tramo subterráneo. No obstante, dicha ruta ha de ser lo mas llana posible para reducir lo máximo posible la aceleración de los pasajeros de las cápsulas. En el kilómetro 15 aproximadamente el perfil muestra un pico pronunciado, que asciende hasta los 25 metros. Este pico, tal y como muestra la Figura 4.6, es debido a la presencia de una pequeña montaña.

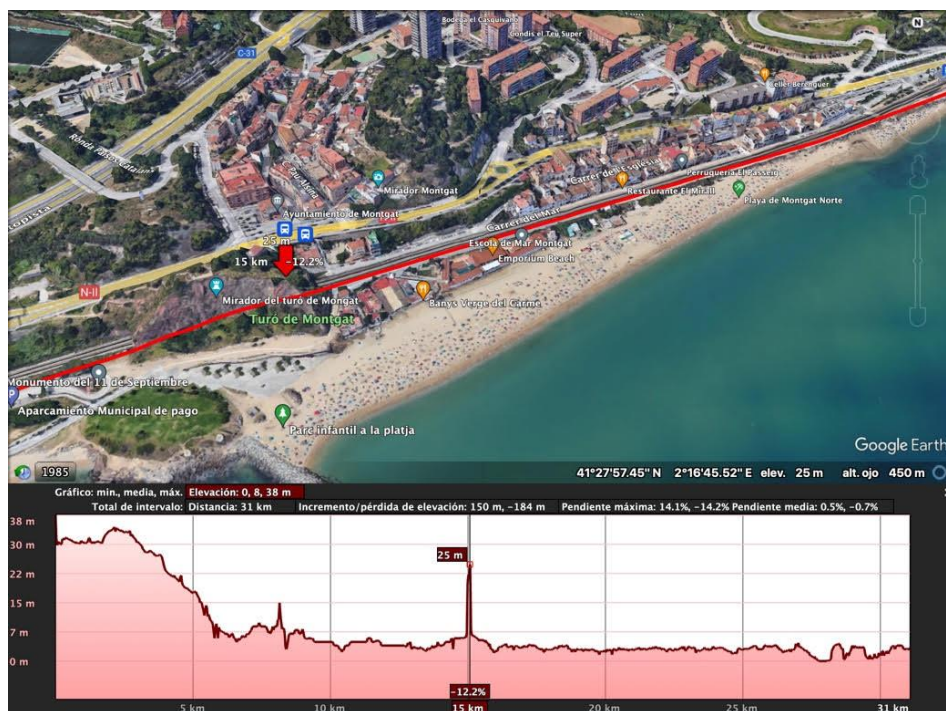


Fig. 4.6 Ilustración visual del pico del perfil de elevación de la ruta Hyperloop Barcelona-Mataró. Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

Con esto comentado, puesto que el paso por esta montaña será a través de un túnel ya existente, el **perfil de elevación final de la ruta de Hyperloop** entre Barcelona y Mataró es el siguiente:



Fig. 4.7 Perfil de elevación final ruta Hyperloop Barcelona-Mataró. Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

Características finales:

Distancia total: 31.079 metros

Altitud máxima: 6 metros

Altitud mínima: 0 metros

Altitud media: 3 metros

Estas características facilitarán la construcción de la infraestructura ya que bastará con un correcto control de la altura de las columnas de los tubos para obtener una ruta completa o parcialmente llana. Tal y como indica el punto 3.2 de este documento, los pilares que sustentarán el tubo están estimados que tendrán una altura variable entre los 6 y los 10 metros, según el documento *Hyperloop Alpha*. Sin embargo, estudiando las diferentes opciones, teniendo en cuenta el espacio necesario que debe haber por debajo del tubo para el paso tanto de personas como de todo tipo vehículos, se estima que la **altitud del tubo** por encima del nivel del agua en esta ruta será de **11 metros**.

La altitud máxima de la ruta es de 6 metros, en los puntos cuya altitud sea esta, el tubo se encontrará a una altura de 5 metros por encima del suelo, espacio suficiente para que todos los vehículos, incluidos los camiones de grandes dimensiones, puedan pasar de un lado al otro de este medio de transporte sin suponer ningún tipo de peligro. Concluimos pues que la **altura de los pilares oscilará entre los 5 y los 11 metros de altura**, dependiendo de la altitud del punto en el que se encuentre. Tomando como medida la altitud media del tramo, que es de 3 metros, se estima que la **altura media** de los **pilares** es de **8 metros** de altura.

Radios de Curvatura, aceleración y velocidad de la ruta

La aceleración que experimentan los pasajeros dentro de un tren es una aceleración centrípeta, ya que están siendo "empujados" hacia el centro de la curva debido a la fuerza centrípeta que actúa sobre ellos. Esta fuerza se origina debido a la curvatura de las vías y a la velocidad del tren, y es lo que permite que los pasajeros experimenten la sensación de estar siendo "lanzados" hacia los lados en las curvas.

Como ya se ha mencionado durante el trabajo, la aceleración máxima ha de ser de 0,5g.

A continuación, se muestra la ecuación para calcular dicha aceleración:

$$a_c = \frac{v^2}{r_{curvatura}} \quad (1.1)$$

Donde la a_c es la aceleración centrípeta, medida en metros por segundo al cuadrado [m/s^2], la v es la velocidad, medida en metros por segundo [m/s] y la r el radio medida en metros [m].

Sin embargo, no se calculará la aceleración centrípeta de todo el trayecto, sino en los puntos más críticos de la ruta, donde el Hyperloop haya llegado o este llegando a su velocidad máxima y la cápsula se encuentre en una curva.

Calculamos el radio de curvatura crítico. Para ello, primero de todo calculamos la velocidad media de todo el trayecto entre las paradas de Barcelona y Mataró, teniendo en cuenta los tramos de aceleración y deceleración.

Para ello, se utilizará la siguiente fórmula:

$$x = v \cdot t \quad (1.2)$$

Donde la x mide la distancia, en metros [m], la v es la velocidad, medida en metros por segundo [m/s] y t es el tiempo medido en segundos [s].

Según cálculos de Hyperloop, la ruta entre Barcelona y Mataró son 7 minutos de parada a parada.

$$x = 31,079 \text{ km}$$

$$t = 7 \text{ minutos} = 0,117 \text{ horas}$$

Aislando la velocidad, obtenemos una velocidad media de 266km/h, con un pico de velocidad en esta ruta de 450km/h.

Es importante destacar que en esta ruta precisamente entre Barcelona y Mataró no es necesario llegar a los 1.200 km/h, velocidad la cual será utilizada para rutas con una mayor distancia.

Tal y como explica el CEO de Transportation Technologies en una entrevista que se llevó a cabo hace unos meses, la cual se encuentra en el Anexo, se necesitan unos 15km para llegar a la aceleración 1G frontal y 0,5 lateral y poder ir a la velocidad máxima de 1200 km/h, una distancia excesiva en este caso sabiendo que la ruta en cuestión es de 31,079 km.

Una vez se ha extraído la velocidad media, se procede a calcular el radio de curvatura crítico, asumiendo una aceleración centrípeta de 0,5g. Sin embargo, en la ecuación, la unidad de la aceleración es de m/s^2 .

$$a_c = 0,5g = 4,9033 \text{ m/s}^2$$

$$v = 266 \text{ km/h} = 957,6 \text{ m/s}$$

Con estos datos, se obtiene un **radio de curvatura crítico de 187.017 metros**, que es equivalente a 187km de distancia. Por lo tanto, como mínimo, el radio de curvatura de cualquier curva en un tramo donde la cápsula se esté desplazando a 450 km/h ha de ser de 187 km.

5. Análisis Económico

Uno de los principales puntos de venta de la propuesta es su bajo costo de construcción y operación, que probablemente será financiado con dinero público. Sin embargo, los costos de construcción variarán ampliamente según la geografía, las condiciones locales y los desafíos técnicos. En áreas urbanizadas, cuando se atraviesan montañas o se deben cavar túneles, es más costoso construir que en áreas abiertas con un fondo arenoso plano.

5.1. Coste del estudio

A continuación, se muestran todos los costes del estudio durante el periodo de investigación de este proyecto.

Concepto	Tiempo (h)	Coste (€/h)	Coste Total (€)
Análisis Preliminar	100	25	250
Documentación	80	15	1.200
Redacción y diseño	120	15	1.800
Revisión formato y otros	50	5	250
Total recursos humanos	350	-	3.500
Amortización ordenador	-	-	120
Material de oficina			80
Impresión y encuadernación			110
TOTAL			3.810

Tabla 5.1 Coste del estudio

5.2. Inversión inicial

Se tomará como referencia el modelo expuesto en *Hyperloop Alpha*¹⁶, actualizando los costes al 2023 según la inflación que ha habido, que es del 11,2% desde el 2013, año de publicación del documento.

La Cápsula

El coste unitario de la cápsula es de **1.244.549€**. En la Tabla 5.2 se muestra el desglose de dicho coste.

¹⁶ Recordar que Hyperloop Alpha es un documento elaborado por SpaceX y Tesla donde se detalla, principalmente a nivel técnico, el Hyperloop. Se le pone principal foco a la ruta entre San Francisco y Los Ángeles. Se utilizará a lo largo de este trabajo para especificaciones principalmente económicas y también técnicas.

Componente de la Cápsula	Coste (€)
Estructura de la cápsula y puertas	250.000
Interior y Asientos	260.000
Sistema de Propulsión	80.000
Suspensión y Cojinetes de Aire	200.000
Baterías, Motor y Refrigerante	150.000
Compresor de Aire	280.000
Frenos de Emergencia	50.000
Asamblea General	100.000
TOTAL	1.370.000

Tabla 5.2 Costes de los componentes que forman la cápsula. [2]

En el documento *Hyperloop Alpha*, Elon Musk propone que las cápsulas del Hyperloop transportarán a 28 pasajeros cada una y tendrán un intervalo de 2 minutos entre ellas. Para la ruta entre Los Ángeles y San Francisco, sugiere que se podrían operar aproximadamente 40 cápsulas por dirección durante las horas pico, lo que equivale a 7,200 personas por hora en cada dirección.

En este apartado precisamente, no se extrapola la información en base a la proporción de distancia de las dos rutas (Los Ángeles – San Francisco y Barcelona Mataró).

Para calcular el número de personas que utilizarán el Hyperloop entre Barcelona y Mataró diariamente, y por consiguiente el número de cápsulas necesarias, se ha hecho una estimación en base a las estadísticas recogidas entre estas dos localizaciones.

Esta ruta es una de las más transitadas en el área metropolitana de Barcelona, ya que conecta la capital catalana con una ciudad importante de la comarca del Maresme. Además, la línea de tren que cubre esta ruta, la R1 (la indicada anteriormente), es una de las líneas con más demanda en la red de transporte público de la ciudad.

La cantidad puede variar dependiendo del día de la semana, la temporada del año y otros factores. Sin embargo, según datos del Instituto Nacional de Estadística de España¹⁷ [7], en 2019 se realizaron alrededor de 22 millones de desplazamientos en vehículos privados por motivos laborales o de estudio en la región de Cataluña, que incluye Barcelona y Mataró. Este número representa un promedio de aproximadamente 60,000 viajes diarios en coche por motivos laborales o de estudio en toda la región.

Tomando como referencia los viajes producidos diariamente en la línea de tren R1 en días laborables, se estima que en total hay una media de 102.000

¹⁷ El Instituto Nacional de Estadística (INE) es un organismo autónomo adscrito al Ministerio de Economía y Hacienda. Su tarea principal y de mayor tradición es la de elaborar estadísticas públicas, que son estudios oficiales sobre la situación y evolución de la población, la economía y la sociedad de España.

viajeros, tanto de ida como de vuelta. La línea R1 une Molins de Rey y Massanet-Massanas, en total hay 31 estaciones. Partiendo desde Molins de Rey, las estaciones de Barcelona y Mataró son las 6 y 20 respectivamente, abordando un 48% de el número total de paradas. Teniendo en cuenta que Barcelona y Mataró son una de las principales estaciones, o más bien, de las que tienen más movimiento, puesto que no hay un número detallado que indique cuantas personas van exactamente de Barcelona a Mataró diariamente, o viceversa, cogeremos como referencia un 25% del valor de viajes total de la línea R1, contando como válidas las paradas cercanas a las de estudio. Con esto, contamos aproximadamente con 25.000 viajes en total.

Para calcular el número de cápsulas necesarias en un tubo, cogeremos el dato de una dirección únicamente, teniendo pues 30.000 viajes diarios en coche y 12.500 viajes diarios en tren, por lo tanto, un total de 42.500 viajeros.

Con esto estamos diciendo que aproximadamente 100.000 personas utilizarán el Hyperloop diariamente entre Barcelona y Mataró, contando tanto con la ida como con la vuelta.

Se aproxima que la ruta en Hyperloop entre Barcelona y Mataró será de aproximadamente 7 minutos. Si se contara con dos cápsulas por dirección, dando 2 minutos a los pasajeros para subirse a la cápsula, y 14 horas diarias como referencia (de 8h a 22h), el Hyperloop podría abastecer **11.500 viajeros por dirección diariamente aproximadamente**, y un total de 23.000 viajeros en la ruta diariamente.

Con estos números obtenemos que el Hyperloop podrá abastecer aproximadamente la mitad (54%) de los viajes que se llevan a cabo hoy en día entre las dos ciudades. Se han supuesto dos cápsulas por dirección debido a la relativa corta distancia entre las dos ciudades. Si la ruta tuviera una distancia mayor, el aumento del número de cápsulas ayudaría mucho más a abastecer toda la demanda, pero en este caso concreto, la inserción de más cápsulas supondría un mayor gasto y no tendría gran efecto en la gestión de la demanda.

Estructura Restante

En este apartado se analizarán los costes de la estructura principal del Hyperloop, el cual incluye el tubo, las estaciones, los pilares y las bombas de vacío.

El Tubo

Se necesita un espesor de pared de tubo de acero entre 20 y 23 mm que soporten suficiente resistencia para los casos de carga considerados en este estudio. Estos casos incluyen diferencial de presión, flexión y pandeo entre pilares, carga por peso y aceleración de la cápsula. Según el estudio de

Hyperloop Alpha, para la ruta calculada entre Los Ángeles y San Francisco, el coste del tubo sería de aproximadamente 670 millones de euros, incluyendo los tramos de tubo prefabricados con refuerzos y salidas de emergencia.

Esta ruta analizada en el documento (Los Ángeles – San Francisco) tiene una distancia aproximada de 610 km, no obstante, el coste especificado incluye tanto la ida como la vuelta, es decir, un tramo de 1.220km. Dicho esto, la construcción del tubo tiene un coste de **549.000€ por km**.

Los Pilares

El espacio entre los pilares del Hyperloop que retienen el tubo es fundamental para lograr el objetivo de diseño de la estructura tubular. El espacio promedio es de 30 m.

Si la ruta estudiada (Los Ángeles – San Francisco) es de 610km, siguiendo la referencia indicada de 30m de espacio entre pilares, habrá 20.334 pilares en la ruta, con un coste 2.351 millones de euros, por lo tanto, se estima que cada pilar tendrá un coste aproximado de **128.000€ por unidad**.

Puesto que la ruta entre Barcelona y Mataró es de 31.079 metros, se toma como estimación que habrá un total de 1036 pilares en toda la ruta.

Dicho esto, la inversión inicial es de **132.600.000 euros** en total aproximadamente.

La Tunelización

El coste de tunelización será de aproximadamente 615 millones de euros, con un coste de **110.000€ por km**.

Con la finalidad de optimizar el proceso de tunelización además de hacerlo más económico, en diciembre de 2016 Musk fundó The Boring Company, una empresa estadounidense de servicios de infraestructura y construcción de túneles. Sus proyectos en curso y propuestos están diseñados para sistemas de tránsito dentro de la ciudad. Esto será necesario para el túnel de los **12,5** primeros **kilómetros** de la ruta, donde el Hyperloop pasará por debajo de la ciudad de Barcelona hasta encontrar su salida.

Por lo tanto, el coste de los 12,5 km de túnel es de **13.800.000 euros** en total.

Las Estaciones

Por otro lado, hay que incluir el gasto de las dos estaciones, que es independiente de la distancia de la ruta.

En *Hyperloop Alpha*, se estima que el coste total de cada estación es de 128 millones de euros aproximadamente, por lo tanto **256 millones de euros** destinados a las **dos estaciones**.

Sistema de Propulsión y Almacenamiento de Energía

Del sistema de propulsión, la suma de todos los aceleradores lineales tiene un coste aproximado de 143 millones de euros. No obstante, teniendo en cuenta que estos números son los proporcionados por el documento *Hyperloop Alpha* para la ruta entre Los Ángeles y San Francisco, siendo esta de 610 km de distancia y la ruta entre Barcelona y Mataró de 31,079 km, el coste para el sistema de propulsión, haciendo un cálculo proporcionado a la distancia, desciende a los **7.300.000 millones de euros**.

Desglosando este coste:

- Estator y materiales de la estructura: 4.000.000 €
- Electrónica de potencia (inversores de tracción, inversores de conexión a red): 2.400.000€
- Almacenamiento de energía: 900.000€

Además, la matriz solar y la electrónica asociada proporcionan la potencia promedio requerida de 28,000 hp (21 MW) el cual tendrá un coste aproximado de **10.100.000 euros** (componentes asociados con el almacenamiento de energía), tomando como referencia el coste indicado en *Hyperloop Alpha*.

Dicho esto, el coste total será de **17.400.000 euros**.

Evacuación de los Tubos

Para que el Hyperloop funcione como se sugiere, el tubo debe tener un sistema de evacuación. El objetivo de esta sección es explorar la viabilidad, la energía, el uso y el costo de las tuberías de evacuación (si las hay) que puede usar el Hyperloop. Si se construye este sistema, se utiliza una bomba de aire para eliminar el aire de los tubos, y la bomba se coloca a lo largo de la manguera. El proyecto Hyperloop propone la ruta entre San Francisco y Los Ángeles, que tiene unos 610 kilómetros de largo. Para calcular la energía requerida para eliminar el aire a la presión deseada, se debe realizar una simplificación. Para este ejemplo, se asume una tubería de 1 km de largo. Un contenedor con un diámetro de 4,5 metros para una cápsula con un diámetro de 2,3 metros para calcular los costos de evacuación y la energía. En lugar de modelar una bomba de aire para calcular la extracción de aire, se utilizará un pistón para expandir el volumen de una tubería hasta que se alcance la presión deseada dentro de la tubería. Este concepto se podría ver en la Figura 1.7.

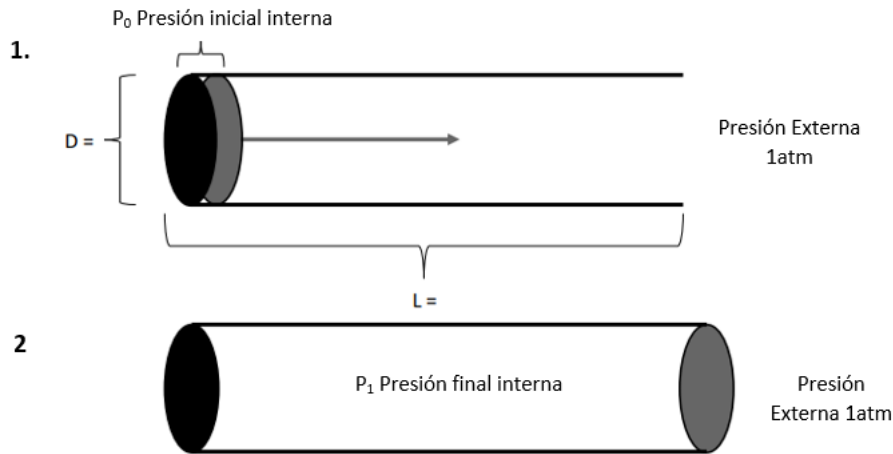


Fig. 5.1 Estado inicial y final del tubo en el proceso de evacuación para conseguir el vacío

La 5.1.1 es el estado inicial del sistema de ejemplo y la figura 5.1.2 es el estado final. En un extremo hay una tapa de sellado y un émbolo que se puede mover de izquierda a derecha. Cuando el pistón se mueve hacia la derecha, como se muestra en la Ecuación 1.3, la presión de 1 atmósfera se distribuye en un volumen creciente. Habrá una presión constante de 1 atm en el exterior del pistón, empujándolo a medida que se mueve hacia la derecha. Para calcular el trabajo utilizamos la siguiente fórmula:

$$W = F \cdot D \quad (1.3)$$

Donde la W es el trabajo, medido en Julios [J], la F la fuerza, medida en Newtons [N] y la D la distancia, medida en metros [m].

La presión, por otro lado, la calcularemos con esta fórmula:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.4)$$

Donde la P es la presión, medido en Pascales [Pa], la F la fuerza, medida en Newtons [N] y la A el área, medida en metros cuadrados [m^2].

Aislando la fuerza de las dos fórmulas e igualándolas, llegamos a la siguiente fórmula:

$$W = P \cdot A \cdot D \quad (1.5)$$

En las anteriores ecuaciones, la D es la distancia que el pistón se desplazará a lo largo del tubo. Simplificando la ecuación obtenemos la indicada para poder calcular el trabajo hecho para poder evacuar el tubo y así conseguir su estado al vacío.

$$W = P\Delta V \quad (1.6)$$

Donde la V es el volumen, medido en metros cúbicos [m³].

A continuación, se muestran los valores de trabajo obtenidos teniendo en cuenta que la longitud del tubo es de 1km (Tabla 5.3).

P ₁	Longitud del tubo (m)	Diámetro tubo (m)	Trabajo (kJ)	Trabajo (kWh)
0.1	1000	4.5	1.4*10 ⁶	403.2
0.01	1000	4.5	1.6*10 ⁶	443.5
0.001	1000	4.5	1.6*10 ⁶	447.6

Tabla 5.3 Trabajo obtenido suponiendo que el tubo tiene una longitud de 1km

Tomamos como valor el precio medio de la electricidad en España en 2022, que es 0.3071€ el kWh. Con este dato, la evacuación de una tubería de 1 km de largo y 4,5 m de diámetro, supondría un gasto de aproximadamente 136€/km. Plasmando estos cálculos a la ruta de estudio entre Barcelona y Mataró, que es de una distancia de 31,079 km el coste sería de **4.226,7€**. Esto significa que para evacuar los dos tubos el gasto aumentaría a **8.453,5€** en total para este trayecto en concreto, aproximando a 8.500€.

Este coste no considera la ineficiencia de las bombas de vacío, la fuga de aire a través del tubo, la introducción de aire en las terminales, ni el funcionamiento constante de esas bombas para mantener el vacío. Cabe señalar, que todos de estos cálculos son estimaciones aproximadas.

Paneles Totales

En este apartado se añadirá el coste total para cubrir el sector exterior del tubo con paneles solares.

Para ello, hemos tomado como referencia una empresa (Sud Renovables [8]) que vende placas solares para empresas, es decir, en grandes cantidades.

El precio de 15.000 m² es de 700.000€ + IVA.

En la ruta diseñada entre Barcelona y Mataró, como ya se ha mencionado anteriormente, 12.500 metros de la ruta serán subterráneos, así que 18579 metros se encontrarán en el exterior. La superficie de este tramo exterior es de 131.327,21m². Siguiendo la tarifa impuesta por esta empresa, cubrir esta superficie de paneles solares supondría un coste de aproximadamente

6.000.000 de euros, contando que se reduciría un pequeño porcentaje del coste al ser un pedido tan superior.

Cálculo total

Para finalizar el apartado de inversión inicial necesaria para este medio de transporte, se expone el coste total de la ruta entre Barcelona y Mataró.

Componente	Coste	Coste aproximado (Millones de euros)
Cápsulas (4)	5.500.000€	5,5
Tubo	17.000.000€	17
Pilares	132.600.000€	132,6
Tunelización	13.800.000€	13,8
Sistema de propulsión y almacenamiento de energía	17.400.000€	17,4
Evacuación de los Tubos	8.500€	0,0085
Paneles Solares	6.000.000€	6
Estaciones	256.000.000€	256
TOTAL	448.308.500	448

Tabla 5.4 Costes totales de la infraestructura necesaria del tramo Barcelona - Mataró

Concluimos pues que la inversión inicial para la ruta de Hyperloop entre Mataró y Barcelona sería de aproximadamente 448 millones de euros, que equivale a 14,42 millones de euros por kilómetro.

Comparando este coste con el de AVE, hemos tomado como referencia el tramo entre Barcelona y Madrid. Según El País [9], el AVE Madrid-Barcelona costó 8.966 millones de euros, con un coste medio por kilómetro de 14,45 millones de euros.

Con estos datos podemos decir que el coste medio por kilómetro de los dos medios de transporte, con la ruta de Barcelona-Mataró concretamente es muy cercano. Sin embargo, el AVE alcanza una velocidad máxima de 300 km/h mientras que el Hyperloop, será capaz de alcanzar velocidades de hasta 1.200 km/h. Con este dato podemos concluir que, teniendo en cuenta las características del Hyperloop y su precio, en comparación con lo que ya está operativo que es el AVE, es económicamente viable.

Sin embargo, con rutas más largas, como por ejemplo un Hyperloop entre Barcelona y Madrid el costo por kilómetro del Hyperloop sería mucho menor que el del AVE. Esto es debido al coste de las estaciones, el cual es el mismo para una ruta entre Barcelona-Mataró y Barcelona-Madrid, donde en la primera supone el 57% del coste y en la segunda sería inferior al 1%.

5.3. Coste anual de explotación

En este apartado se incluirá lo que supone mantener en funcionamiento el Hyperloop cada año.

Coste de energía anual

Una de las principales razones por la cual se hace una inversión inicial en paneles solares es para poder ser autosuficientes energéticamente y no tener más gastos destinados a este motivo. Más adelante, en el apartado de estudio ambiental, se muestran los cálculos y se demuestra como esta ruta entre Barcelona y Mataró es autosuficiente y no solo eso, sino que genera energía restante que puede ir destinada al gasto energético de las estaciones entre otras opciones. Dicho esto, no tendremos en cuenta el coste de gasto energético.

Amortización de la inversión inicial

Los activos de una empresa pierden valor a lo largo del tiempo y esa pérdida se contabiliza teniendo en cuenta los años de vida del activo.

Las amortizaciones es la pérdida del valor de los activos o pasivos con el paso del tiempo. Esta pérdida, que se debe reflejar en la contabilidad, debe tener en cuenta cambios en el precio del mercado u otras reducciones de valor. Con las amortizaciones, los costes de hacer una inversión se dividen entre todos los años de uso de esa inversión.

Procedemos a analizar la amortización del sistema. Primero de todo, los diferentes componentes que forman el Hyperloop se devaluarán con el tiempo, así que es necesario indicar la vida útil de cada uno de ellos, que se indican en la Tabla 5.5.

Componente	Vida útil (años)
Cápsulas	20
Tubo	40
Pilares	40
Estaciones	40
Sistema de propulsión y energía	30
Paneles Solares	30

Tabla 5.5 Vida útil considerada para los diferentes componentes del Hyperloop

Por lo tanto, para calcular la amortización anual tan solo es necesario dividir del valor de compra del bien en cuestión por su vida útil estimada.

Analizando la ruta estudiada, la Tabla 5.6 mostrará la amortización anual de cada componente del primer año. En el ejercicio financiero se muestra la depreciación total proyectada en los siguientes años.

Componente	Amortización anual
Cápsulas	275.000€
Tubo	425.000€
Pilares	3.315.000€
Estaciones	6.400.000€
Sistema de propulsión	580.000€
Paneles Solares	200.000€

Tabla 5.6 Amortización anual calculada de los diferentes componentes del Hyperloop

Costes fijos de mantenimiento

Aunque no se haya especificado el coste que supondrá el mantenimiento de este innovador medio de transporte, se va a comparar con el tren Maglev, situado en Japón entre otras localizaciones. Se ha escogido este transporte en concreto ya que, aunque el concepto no sea el mismo, de los medios de transporte ya operativos, es el que tiene características más parecidas al Hyperloop. Con esto, se supondrá un coste de mantenimiento de un 7% respecto la inversión inicial.

En la ruta de Barcelona-Mataró, el mantenimiento anual se elevaría hasta los **32 millones de euros** aproximadamente.

Mano de obra de los operarios para la construcción

Puesto que el número exacto de ingenieros civiles, eléctricos, mecánicos, constructores y otros especialistas necesarios puede variar según la experiencia y la eficiencia de cada uno, estimaremos un número aproximado de cada uno para la ruta de estudio, con un tiempo aproximado de construcción de 2 años = 3.600 horas laborables.

Todas las tasas son extraídas del Instituto Nacional de Estadística [7].

Tipo de Trabajador	Tasa (€/hora)	Número de horas (h)	Número de trabajadores	Coste Total (€)
Ingeniero Civil	27,32	3.600	15	983.520
Eléctricos (Suministro de energía eléctrica)	47,59	3.600	20	3.426.480
Mecánicos (Reparación e instalación de maquinaria y equipo)	24,16	3.600	70	4.348.800
Constructores (Actividades de	21,13	3.600	150	7.606.800

construcción especializada)				
Servicios Financieros	43,40	3.600	10	1.562.400
TOTAL	-		-	17.928.000

Tabla 5.7 Costes totales de construcción por trabajadores

5.4. Financiación

Tal y como ha indicado El País este enero de 2023 [10], Ucrania ha marcado un antes y un después en los mercados financieros en 2022. El aumento de la inflación ha provocado un endurecimiento de la política monetaria para combatirla, con subida de tipos de interés y disminución del ritmo de compra de activos, lo que, según la mayoría de expertos consultados, ha repercutido en el aumento del coste de financiación tanto para familias como para empresas y la reducción de volúmenes.

Ante esta situación, puesto que el posible beneficio de financiar el proyecto ha disminuido con esta situación comentada, se ha optado por mostrar el ejercicio financiero sin financiación externa.

No obstante, si se optara por financiar se supondría que el banco financia los costes de construcción y la compra de activos (LTC¹⁸) a un tanto por ciento específico. Por ejemplo, si este fuera del 50%, teniendo en cuenta los 448 millones de euros de inversión inicial para la infraestructura y los 18 millones de euros de coste de construcción, sería **un préstamo total de 233 millones de euros** para la ruta en cuestión. Y en el ejercicio financiero habría que tener en cuenta el interés sobre esta deuda. Con un 5%, se debería pagar anualmente **11.650.000 de euros**, extrapolando este valor con el paso de los años teniendo en cuenta la inflación.

5.5. Rentabilidad

Puesto que una de las principales fuentes de ingreso del Hyperloop es la venta de billetes, se ha tenido que estimar el precio del billete entre Barcelona y Mataró.

Se ha tomado como referencia un estudio hecho en junio de 2020 [11]. En él, se ha estimado el coste del billete del Hyperloop utilizando estimaciones hechas por las diferentes compañías de Hyperloop, con un precio de 0,20€/km.

Dicho esto, el precio del billete entre Barcelona y Mataró, cuya distancia es de 31,079 km, sería de **6,2€**.

Anteriormente, se ha calculado que esta ruta podrá hacer 11.500 viajes por dirección aproximadamente, es decir, 23.000 viajes en total, a un precio de 6,2€

¹⁸ LTC significa Loan to Cost. Se utiliza a la hora de financiar una construcción para estimar qué parte del proyecto va a costearse con fondos propios y cuál con una financiación.

el viaje, son **142.600 euros al día y 52.049.000 euros al año** aproximadamente para esta ruta en concreto.

Por otro lado, otra fuente de ingreso será la actividad en las estaciones. Para ello, puesto que no se sabe con exactitud ni el tamaño ni la actividad dentro de las estaciones de Hyperloop, se tomará como referencia el aeropuerto de Barcelona (la Terminal 1).

Para analizar los ingresos recibidos por la publicidad en las estaciones, se ha hecho una estimación consultando las tasas de alquiler de un mes para campañas de corta duración, campañas de larga duración y stands promocionales [12].

Por otro lado, para estimar los ingresos recibidos por otros servicios externos en las estaciones del Hyperloop, principalmente locales comerciales, se ha cogido el número de metros cuadrados destinados a tiendas en la terminal 1, que son aproximadamente **13.000 metros cuadrados**, según AENA [13]. Además, se ha consultado la guía de tarifas de AENA de febrero 2023 [14], donde, para el aeropuerto de Barcelona, la tarifa para oficinas y locales es de 25,38 euros por metro cuadrado al mes. Sin embargo, como indica, esta tarifa es para contratos por períodos de tiempo igual o superior a 6 meses. Cuando se contraten por períodos inferiores a seis meses el precio se incrementará en un 25%. El período mínimo de contratación es de un mes. Con este dato, estimaremos que el precio mensual por metro cuadrado es de 30 euros, que es equivalente a **360 euros anuales por metro cuadrado**. Con estos datos, obtenemos que habrá un ingreso anual aproximado de **4.680.000 euros anuales** para la estación de **Barcelona**. Estimando que los metros cuadrados de tiendas en la estación de **Mataró** es la mitad de Barcelona, obtenemos un beneficio por alquiler de **2.340.000 euros anuales**, obteniendo un **total** en esta ruta de **7.020.000 euros**.

Por último, incluiremos en “Otros ingresos” todos aquellos ingresos obtenidos por el aparcamiento de vehículos, servicios premium, salas y zonas no delimitadas, filmaciones y grabaciones, espacios y soportes de publicidad adicionales, otras utilizaciones del recinto, y explotaciones comerciales, cuyas tasas también se encuentran en la guía de tarifas de AENA de febrero 2023 [14].

A continuación, se muestra el **estado de resultados estimado** para una ruta de Hyperloop entre Barcelona y Mataró, **sin financiación externa**:

Año	2023 (Real)	2024 (Forecast)	2025 (Forecast)	2026 (Forecast)	2027 (Forecast)	2028 (Forecast)
IPC (Inflación)	4%	3%	2%	2%	2%	2%
Billetes	52.000.000	53.560.000	54.631.200	55.723.824	56.838.300	57.975.066
Servicios Externos (restauración estación, tiendas, etc.)	7.020.000	7.230.600	7.375.212	7.522.716	7.673.171	7.826.634
Publicidad	20.000.000	20.600.000	21.012.000	21.432.240	21.860.885	22.298.102
Otros ingresos	25.000.000	26.000.000	26.780.000	27.315.600	27.861.912	28.419.150
Ingresos	104.020.000	107.390.600	109.798.412	111.994.380	114.234.268	116.518.953
Gastos de personal	12.000.000	12.360.000	12.607.200	12.859.344	13.116.531	13.378.861
Mantenimiento	32.000.000	32.960.000	33.619.200	34.291.584	34.977.416	35.676.964
Gastos de marketing y publicidad	10.000.000	10.300.000	10.506.000	10.716.120	10.930.442	11.149.051
Suministros	15.000.000	15.450.000	15.759.000	16.074.180	16.395.664	16.723.577
Otros gastos	5.000.000	5.150.000	5.253.000	5.358.060	5.465.221	5.574.526
EBITDA	30.020.000	31.170.600	32.054.012	32.695.092	33.348.994	34.015.974
(%) Margen	28,9%	29,0%	29,2%	29,2%	29,2%	29,2%
Depreciación	11.540.000	11.337.820	10.934.883	10.545.477	10.269.839	10.001.592
Resultado antes de impuestos	18.480.000	19.832.780	21.119.129	22.149.615	23.079.155	24.014.382
Impuesto de sociedades (25%)	13.860.000	14.874.585	15.839.346	16.612.211	17.309.366	18.010.786
Resultado del ejercicio (Beneficio neto)	13.860.000	14.874.585	15.839.346	16.612.211	17.309.366	18.010.786

Tabla 5.8 Estado de resultados estimado ruta Hyperloop de Barcelona - Mataró

Analizando los resultados de la Tabla 5.8, se puede concluir que el beneficio neto obtenido no es óptimo, teniendo en cuenta la inversión inicial necesaria para la construcción de la infraestructura. Con estos datos, se estima que se recuperaría la inversión en aproximadamente 20 años.

Sin embargo, esto es debido principalmente a la ruta en cuestión (Barcelona – Mataró). Como ya se ha mencionado anteriormente, un alto porcentaje de la inversión inicial está destinado a la construcción de las dos estaciones. Con una ruta relativamente corta (como es la de Barcelona-Mataró), los ingresos por venta de billetes disminuyen considerablemente.

Si se quisiera estudiar una ruta más larga, como por ejemplo Barcelona-Madrid, el ingreso obtenido por la venta de billetes sería mucho mayor y por lo tanto también el beneficio neto del ejercicio financiero.

Rentabilidad personal valorando el tiempo ahorrado

En este apartado se procede a analizar los beneficios personales obtenidos con el tiempo ahorrado respecto otros medios de transporte, dándole un alto valor al tiempo de las personas.

Para ello, se compararán los tiempos del Hyperloop y del tren convencional que une Barcelona y Mataró (línea R1).

Tiempos estimados:

- Hyperloop: 7 minutos
- Tren: 47 minutos

Con esto obtenemos que la diferencia de tiempo por viaje es de 40 minutos, es decir, 80 minutos al día (1,33h diarias). Suponiendo un valor aproximado de 40€/h, monetizando de esta manera el tiempo, supondrían 53 euros al día, que es equivalente a 1.650 euros mensuales.

De este modo se le da un valor a la principal ventaja y propuesta de valor del Hyperloop, que es el tiempo.

6. Impacto Ambiental

Un estudio ambiental del Hyperloop es un proceso exhaustivo y detallado para evaluar los impactos ambientales potenciales de construir y operar este sistema de transporte. El objetivo principal de un estudio ambiental es determinar si el proyecto es sostenible y se puede implementar de manera segura, sin causar daños significativos al medio ambiente.

Para hacer un estudio ambiental completo, en primer lugar, se llevaría a cabo una revisión de los recursos naturales existentes en la zona donde se pretende construir el Hyperloop. Esto incluiría evaluaciones del suelo, el agua, el aire, la biodiversidad y los patrones de tráfico en la zona. También se analizarían los riesgos potenciales para la seguridad y la salud humana.

Por otro lado, se deberían estudiar los impactos ambientales potenciales durante la construcción del Hyperloop. Esto incluye el uso de maquinaria pesada, el constante movimiento de la vegetación, la excavación necesaria y la contaminación producida por la construcción de las estaciones.

En tercer lugar, se analizarían los impactos ambientales potenciales durante la operación del Hyperloop. Esto incluiría la generación de ruido, la emisión de gases de escape y el uso de energía.

Y por último, se deberían proponer medidas para minimizar estos impactos ambientales identificados en el estudio. Estas medidas podrían incluir la restauración de áreas degradadas, el uso de tecnologías más limpias y la creación de corredores ecológicos.

En general, un estudio ambiental del Hyperloop es esencial para garantizar que el proyecto sea sostenible y se pueda implementar de manera segura, sin causar daños significativos al medio ambiente.

Sin embargo, este apartado se focalizará en la energía consumida y producida durante el funcionamiento del medio de transporte, comparándola con los medios de transporte ya existentes. No da una visión muy detallada de todo el impacto que la inserción del Hyperloop causará en el medio, pero si una visión real donde se pueda posicionar el Hyperloop ante los demás transportes que se utilizan actualmente en el día a día.

La propuesta de Musk es un diseño de bajo consumo. Esto se debe principalmente a su diseño de tubo a muy baja presión, lo que permite un lo que permite que prácticamente no haya ninguna fricción debido a la sustentación por aire presurizado. Según estimaciones preliminares, Hyperloop será dos o tres veces más eficiente energéticamente que el tren de alta velocidad. Musk enfatizó que la tecnología sería autosuficiente y económica debido a los bajos requisitos de energía del sistema solar. Los paneles solares montados en la parte superior de las tuberías proporcionan la electricidad que alimenta el Hyperloop. Según el estudio, un Hyperloop puede generar más energía de la que necesita para funcionar. Su energía se puede almacenar y utilizar para hacer funcionar el sistema cuando está nublado, de noche o en

túneles, etc. Sin embargo, otras investigaciones han demostrado que la forma en que se alimenta un sistema puede variar según los requisitos del sistema y el terreno.

Con base a los hechos anteriores, se generaría más energía de la requerida para operar el sistema en lugares donde hay abundancia de luz solar, que es precisamente el caso de la ruta entre Barcelona y Mataró. Dicho esto, aprovechando el clima que tenemos en España, analizaremos la cantidad de energía que se produciría, la requerida para el funcionamiento del Hyperloop y la que podría ser usada para temas ajenos al medio de transporte.

Es difícil dar una cifra exacta de la cantidad de energía que se podría generar si el tubo del Hyperloop estuviera cubierto de paneles solares, ya que depende de varios factores, como la orientación y la inclinación del tubo, la eficiencia de los paneles solares y la cantidad de sombra que reciba el tubo.

Sin embargo, a continuación, se estimará la cantidad de energía generada mediante un cálculo de la superficie total del tubo y la eficiencia promedio de los paneles solares en la ruta entre Barcelona y Mataró.

Primero de todo calcularemos la superficie del tubo, utilizando la siguiente fórmula:

$$S_{TOTAL} = \pi r^2 \cdot L \quad (1.7)$$

Donde la S es la superficie, medida en metros cuadrados [m²], la r el radio, medido en metros [m] y la L la longitud, medida en metros [m]

Supondremos que el diámetro del tubo es de 3m, por lo tanto, el radio es de 1,5m. Con esta ecuación, sabiendo que hay 12.500 m de la ruta entre Barcelona y Mataró subterráneos, 18579 metros son los que estarán en el exterior. Con esto, obtenemos que la **superficie exterior total** del tubo es de **131.327,21m²**.

Por otro lado, según los Expertos de energía solar fotovoltaica y paneles solares en Cataluña (EFC) [15], Barcelona presenta una irradiación solar de 5,3 kWh/m² al día con 2.453 horas de sol al año (6,72 horas de sol al día). Con esto, calculamos la energía solar generada por metro cuadrado al año:

Energía solar generada por metro cuadrado de panel solar = 5,3 kWh/m² x 365 días = **1.934,5 kWh/m² al año**.

Para obtener la cantidad total de energía solar generada en el tubo del Hyperloop, multiplicamos la superficie exterior total por la cantidad de energía solar generada por metro cuadrado:

Energía solar generada anualmente en la ruta entre Barcelona y Mataró = **254.053 MWh/año**

Energía solar generada diariamente en la ruta entre Barcelona y Mataró = **696,03 MWh/día**

Finalmente, para obtener la cantidad de MWh/km anuales, debemos dividir la cantidad de energía solar generada por la longitud del tubo en kilómetros:

Cantidad de MWh/km anuales = $426.343.590,04 \text{ kWh} / (31.079 \text{ m} / 1000) =$
8.174,43 MWh/km anuales

Esta es la cantidad de energía que un tubo de Hyperloop entre Barcelona y Mataró generaría.

Según el U.S Department of Energy, en un documento titulado “Effect of Hyperloop Technologies on the Electric Grid and Transportation Technologies” [16], La energía eléctrica requerida para soportar un Hyperloop durante un período de 24 horas al ritmo máximo puede estar en el rango de 500 a 600 MWh/día.

Con los cálculos obtenidos anteriormente, podemos concluir que la ruta del Hyperloop entre Barcelona y Mataró generaría aproximadamente 696,03 MWh/día mientras que consumiría aproximadamente 550 MWh/día. En esta ruta se almacenarían diariamente una estimación de 146,03 MWh/día, energía que se puede utilizar para temas ajenos al medio de transporte. Cabe destacar que esta es la energía restante para una ruta relativamente corta que es la de Barcelona-Mataró. Una de las ideas principales del Hyperloop es construir rutas con más distancia lo que aumentaría significativamente la diferencia entre la energía generada y consumida. Esta energía restante podría usarse para otras partes de la infraestructura del Hyperloop, como puede ser el gasto energético de la estación. Otra opción sería vender esta energía almacenada a externos destinados a otros usos ajenos al Hyperloop.

Sin embargo, lo que sí que se puede concluir con estos cálculos es que el Hyperloop es autosuficiente energéticamente.

En general, se espera que el Hyperloop sea mucho más eficiente energéticamente que otros medios de transporte como los trenes o los aviones, debido a la aerodinámica del vehículo y la reducción de la resistencia al aire en el tubo. A continuación, se comparará el consumo energético del Hyperloop con otros medios de transporte.

6.1. Comparación con los medios de transporte actuales

Uno de los factores que diferenciará más al Hyperloop respecto las otras alternativas como medio de transporte será su impacto medio ambiental. Estas son las principales características:

- **Emisiones de gases de efecto invernadero:** El Hyperloop podrá tener un impacto ambiental positivo al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que opera con energías limpias, como la electricidad, en lugar de combustibles fósiles. Esto ayudará a mitigar el cambio climático y mejorar la calidad del aire.

- **Consumo de energía:** El Hyperloop es más eficiente energéticamente que otros medios de transporte, ya que podría operar a altas velocidades en un ambiente cerrado y controlado, reduciendo así las pérdidas de energía.
- **Ruido:** El Hyperloop es un medio de transporte menos ruidoso que otros medios de transporte, ya que opera dentro de un tubo sellado, reduciendo el ruido externo.
- **Espacio:** El Hyperloop podría requerir menos espacio que otros medios de transporte, ya que opera en un tubo subterráneo o elevado, lo que reduce la necesidad de talar árboles y construir carreteras. Además, tal y como se ha mencionado durante el trabajo, la idea es que pueda haber “vida” o tránsito ocurriendo por debajo del Hyperloop. Este factor se tuvo en cuenta a la hora de decidir la altura de los pilares, ya que uno de los objetivos es no obstaculizar el movimiento existente en gran parte de la ruta.

En este sentido, existe en la actualidad un verdadero interés en lograr que los medios de transporte utilicen menor energía o ya buscar formas alternativas, circunstancia en parte debida a los problemas que pueden existir en el futuro con la provisión del petróleo. El petróleo, recurso natural de gran importancia para el desarrollo de la humanidad, ha generado en el mundo impactos ambientales negativos, significativos por las graves consecuencias provocadas en el medio. A diferencia de la mayoría de los medios de transporte actuales, el Hyperloop tiene un gasto energético en cuanto a combustibles fósiles nulo.

A continuación, se comparará el consumo energético aproximado del Hyperloop con algunos medios de transporte.

Utilizando los cálculos del punto 5.2 de la cápsula, donde se indica que aproximadamente podrán viajar 11.500 viajeros por dirección, estimamos que cada cápsula hará un total de 200 viajes aproximadamente diarios. 2

Con esto, suponemos que cada cápsula recorrerá diariamente 6.000 km aproximadamente, habiendo un total de 4 cápsulas, queda un consumo energético aproximado de 22 kWh / 100 km.

Medio de Transporte	Consumo energético aproximado (kWh / 100 km)
Hyperloop	22
Coche de gasolina	56,4 [17]
Coche de diésel	49 [17]
Coche Eléctrico	19 [17]
Avión comercial	42 [18]
AVE 103, v max 320 km/h	18,1 [19]
Tren Regional	47,9 [19]
Autobús	24 [19]

Tabla 6.1 Consumo energético aproximado de diferentes medios de transporte

Como se puede apreciar en la Tabla 6.1, el consumo energético medio aproximado de las diferentes alternativas que puede haber al Hyperloop es notablemente mayor. Además, cabe destacar que en el Hyperloop no solamente es autosuficiente, y generará toda su energía necesaria, sino que no necesita petróleo para su funcionamiento. Además, debido a su mayor dificultad para obtenerlo, los precios van aumentando gradualmente, cosa que también acaba siendo un problema para los demás transportes.

En conclusión, el Hyperloop tiene un gasto energético considerable. Según la Tabla 6.1, el gasto energético del AVE es inferior al del Hyperloop, no obstante, el segundo no necesita energía de fuentes externas ya que lo genera su propia infraestructura. Y como mencionado, la gran ventaja de la cual parte el Hyperloop respecto el AVE es el gasto energético nulo de combustibles fósiles, uno de los principales causantes y catalizadores de la polución.

7. Impacto Social y de Igualdad de Género

7.1. Proyección e integración de los medios de transporte ya existentes

Los medios de transporte tienen una gran importancia en la sociedad porque permiten la circulación de bienes y de personas, logrando una integración social que favorece el desarrollo. Es por esta razón que con el paso del tiempo siempre veremos una mejora en la eficiencia y funcionamiento de los medios de transporte, con servicios mejorados y una utilización de recursos menor.

Los medios de transporte que sin lugar a duda cambiaron en gran medida la manera en que la sociedad se relaciona son el avión, el coche y el tren. Estos nuevos medios permitieron el transporte de pasajeros de un punto a otro, incluso de un extremo al otro del mundo con un coste y un tiempo realmente bajo, en comparación con lo existente anteriormente. El avión fue perfeccionado sus características con el paso del tiempo, logrando transportar cada vez más personas, consiguiendo que visitar diferentes continentes acabase siendo más que posible. Hoy en día, el desafío se enfoca en lograr bajar más y más los costes de los medios de transporte, además de recortar el tiempo lo máximo posible.

La población, como sociedad, está en constante desarrollo: Sin embargo, en la época de avance tecnológico en la que nos encontramos, este crecimiento empieza a ser exponencial. Es por eso que cada vez es más necesario un cambio en los medios de transporte que nos rodean a día de hoy. La demanda es cada vez mayor, y el tiempo más valioso. El Hyperloop es una gran alternativa tecnológica y sostenible, que puede tener un gran impacto en el día a día de las personas y en la fisonomía de los propios continentes.

En este apartado se discutirán los posibles impactos que supondrá la implantación del Hyperloop en las ciudades de Barcelona y Mataró.

Impacto en los medios de transporte actuales tras la inserción del Hyperloop

Como ya hemos dicho antes, el Hyperloop es una perfecta opción para el desafío que tienen los medios de transporte del futuro, básicamente porque cumple con todos los requisitos necesarios para ello. El Hyperloop alcanzará velocidades de hasta 1.200km/h, pudiendo dirigirse a cualquier localización en un tiempo muy reducido. Además, su precio se ha rebajado significativamente en comparación con lo que hay que pagar hoy en día por recorrer tantos kilómetros, debido al uso de energía natural. El consumo energético es mucho menor que el de los medios de transporte convencionales. Además, otra renovación es la mejor seguridad que asegura este medio de transporte,

incluso en un hipotético caso de accidente hay seguridad. En conclusión, sería un avance tecnológico inmenso en la historia de los transportes. Pero la cuestión verdadera es qué cambios habrá en el mundo de los medios de transporte cuando el Hyperloop ya sea una realidad y esté operativo e integrado.

Este es un gran interrogante ya que claramente el Hyperloop suplirá las funciones o usos que ya tienen algunos transportes.

A continuación, se muestran los posibles impactos que podrá tener la inserción de un Hyperloop que una Barcelona y Mataró.

- **El avión**

- Nacional: con la entrada del Hyperloop, este sería el tipo de avión que probablemente empezaría a desaparecer. Está estimado que el Hyperloop hará viajes de media distancia principalmente, que son aquellos aproximadamente entre los 500 y los 2.000 km de distancia. Esto significa, que sabiendo la gran diferencia de precios entre el avión y el Hyperloop (el precio del Hyperloop es 4 veces más barato aproximadamente que la manera más económica del avión) y la reducción del tiempo en el proceso, la gente optará por la manera más cómoda y económica que es el Hyperloop, en vez de usar el avión como transporte y recorrer la misma distancia. Por lo tanto, esto podrá causar la significativa eliminación de vuelos nacionales, habiendo muchos menos de la mitad de los que ya hay hoy en día, causando también consecuencias económicas en los aeropuertos.
- Continental: estos tipos de vuelos no se verán muy afectados debido al Hyperloop. Como ya se ha mencionado anteriormente, el Hyperloop hará sobre todo la función que hacen los aviones nacionales hoy en día ya que, de momento, se estima que solamente se harán rutas terrestres. Eso significa que gran parte de la población solo usarán los aviones en vuelos de larga distancia (sobre todo aquellos que la ruta implica sobrepasar un océano, mar, etc.), causando también un gran cambio en el mundo aéreo debido a su gradual pérdida de uso.
- Intercontinental: este tipo de vuelo se verá afectado en parte por el Hyperloop. La gran mayor parte de los vuelos intercontinentales son de una larga distancia lo que significa que el Hyperloop no interferirá mucho en esta zona, pero los vuelos restantes intercontinentales pero que no necesariamente son de muy larga distancia, sí que se verán afectados por el Hyperloop ya que el recorrido podrá ser similar al de los vuelos nacionales.

- **El tren**

- De larga distancia: los trenes que hay hoy en día de larga distancia (entre los 300 y los 900 km aproximadamente) estarán completamente afectados con la entrada del Hyperloop.

Prácticamente todas las rutas existentes, en el caso de que haya la misma ruta en el Hyperloop, se eliminarán muy rápidamente. El Hyperloop, aproximadamente tarda tiempos 5 veces más rápidos que los del tren convencional. Todas las rutas de los trenes de larga distancia empezarán a desaparecer hasta que, a medida que se vayan implementando más rutas del Hyperloop, llegará a la total eliminación.

- De corta distancia: los trenes de corta distancia, por el otro lado no se verán tan afectados por el Hyperloop que en los trenes de larga distancia. Sabiendo ya lo que cuesta hacer una ruta del Hyperloop, crear nuevas rutas en las cuales los trenes ya tardan 15-20 minutos, no tendría mucho sentido en proporción al inmenso trabajo que causa su construcción. Es por eso por lo que es muy probable que estos tipos de trenes se mantengan durante un mayor tiempo que los de larga distancia, ya que las rutas del Hyperloop están un poco limitadas en gran parte debido a su demanda. Precisamente, líneas de tren como la R1 comentada en el apartado 5 se verían completamente afectadas con la implantación del Hyperloop, ofreciendo un servicio mucho más rápido y eficaz, con un precio ligeramente superior.
- **El bus regional:** tal y como se nos ha mencionado anteriormente, se estima que la distancia mínima aproximada que debería tener el Hyperloop para funcionar con total perfección sería de unos 37 km de distancia, tal y como se indica en un artículo publicado en el año 2016 en la web de la real televisión española [20]. También, tal y como nos explica el CEO de Hyperloop Transportation Technologies en la entrevista situada en el Anexo B, es totalmente viable hacer una ruta de 30 km de distancia. Teniendo esto en cuenta, los buses regionales que se verán totalmente afectados serán aquellos que superen esta distancia. Por el contrario, aquellos que no la superen no se verán muy afectados ya que hay poca probabilidad de que existan rutas existentes con una distancia inferior a los 50km. Por lo tanto, muchas rutas desaparecerán.
- **El metro metropolitano:** al metro metropolitano le ocurre algo parecido al bus regional. Las rutas que se verán totalmente afectadas serán aquellas en las que ya hay una existente en Hyperloop, pero se mantendrán aquellas que no superen la distancia recomendada mínima para las rutas del Hyperloop.

Integración con los medios de transporte urbanos

La integración segura de Hyperloop con otros modos de transporte resultará fundamental para el rendimiento general de sus sistemas, pasajeros y áreas atendidas por la línea. Esta integración permitirá que las líneas de Hyperloop se conecten a los servicios regionales, que luego podrán operar con Hyperloop a través de conexiones y horarios coincidentes. Esto provoca demoras e interrupciones en la conexión durante las horas pico y afecta el potencial de desarrollo del área. Más usuarios pueden llegar a las estaciones de Hyperloop, lo que aumenta el movimiento y mejora el uso de modos de transporte sostenibles que los conectan.

Idealmente, Hyperloop debería incluir una integración física perfecta entre los modos de conexión y las estaciones de preparación, donde el objetivo de los conectores es reducir la "resistencia a la transferencia"¹⁹. El transporte terrestre ferroviario de alta velocidad se basa en la combinación de autobuses y vehículos no motorizados cerca de la estación ferroviaria, brindando un servicio puerta a puerta, ajuste de horarios y venta integrada de boletos, lo que también ayuda a reducir la "resistencia a la transferencia". Por otro lado, una integración débil conduce a un bajo flujo de pasajeros, lo que es indirectamente beneficioso para los automóviles. A la larga, reduce el impacto en el desarrollo de las zonas de desarrollo principal de la estación, provocando retrasos y desconexiones en las horas pico y afectando el potencial de desarrollo del área.

También hay evidencia de que la ubicación del transporte terrestre de alta velocidad plantea un desafío para otros modos de transporte. Sería más beneficioso ubicar la estación Hyperloop en el centro de la ciudad. Esto se debe a que Hyperloop puede ofrecer la oportunidad de utilizar la infraestructura existente (metro u otro ferrocarril) para respaldar el desarrollo de sus estaciones o terminales. Esto ahorrará a los pasajeros costos de terminal, viajes y tiempos de espera, y facilitará la integración con otros modos de transporte. Desafortunadamente, la ubicación del Hyperloop en el centro de la ciudad también presenta algunos desafíos. El costo de adquisición del terreno será más alto que el de zonas situadas en las afueras de la ciudad. En estos casos, como el propuesto en la ruta entre Barcelona y Mataró, la construcción subterránea puede ser una solución. De primeras puede parecer una decisión u opción poco rentable debido al alto costo del túnel. No obstante, como mencionado anteriormente, se utilizaría la tecnología y recursos de otra de las empresas de Elon Musk, llamada The Boring Company. Esta empresa de excavación e infraestructuras tiene como objetivo mejorar la velocidad de excavación lo suficiente para establecer una red subterránea de túneles mucho más factible económicamente.

Con una buena planificación para evitar los desafíos descritos anteriormente, una ubicación en el centro de la ciudad resultará más ventajosa. Si bien Hyperloop competirá con los viajes aéreos, la integración con los aeropuertos

¹⁹ Se entiende como transferencia de masa al movimiento de personas entre fases, es decir, entre las estaciones y el Hyperloop, o el movimiento hacia o desde las conexiones cercanas a la estación.

brindará servicios complementarios. Puede proporcionar un acceso rápido y conveniente al aeropuerto y ampliar su gama de servicios en términos de vuelos intercontinentales.

En conclusión, el objetivo principal es integrar Hyperloop con otras redes de transporte. Para satisfacer las necesidades de pasajeros y transferencias, cada estación Hyperloop debe proporcionar un acceso seguro y fácil y salidas y llegadas puntuales constantes a través de horarios razonables y áreas convenientes de embarque, desembarque y espera. Las estaciones también deben proporcionar una buena orientación espacial y distribución para que los pasajeros se trasladen entre medios de transporte.

Poniendo foco en la ruta de estudio, analizamos la posible integración del Hyperloop con los diferentes medios de transporte en las estaciones de Mataró y Sants Barcelona:

- Estación de Mataró: esta estación se encuentra a 1 minuto caminando de una parada de bus. Esta parada podría ser un gran nexo entre la estación de Hyperloop de Mataró con los pueblos y localizaciones cercanas como por ejemplo Cabrera de Mar, Premià de Dalt, Cabrils, Vilassar o Sant Andreu de Llavaneres. Por otro lado, la estación de tren de Mataró se encuentra a menos de 100 metros de distancia del puerto de Mataró, ofreciendo otra opción de acceso a la estación vía el mar.
- Estación Sants Barcelona: En la misma localización está la estación de autobuses de Barcelona Sants. A esta Se puede llegar en cercanías a través de todas las líneas que lleven hacia la parada de Sants, además de la posibilidad de ir en metro, autobuses urbanos e interurbanos que realizan el mismo recorrido. También se puede acceder tanto en coche como en taxi a través del Carrer d’Aragó, el Carrer Comte d’Urgell o el Carrer de Roger de Llúria y en metro las líneas L3 hasta Plaça Centre o L5 hasta Plaça Sants.

Como se puede ver, la implantación del Hyperloop en estas dos localizaciones supondría un aumento sustancial del uso de las diferentes opciones de medios de transporte que les rodea, fomentando la integración entre ellos y mejorando así la fluidez de movimiento entre lugares.

7.2. Impacto causado por rutas a nivel regional

El impacto social causado por el Hyperloop en rutas a nivel regional podría ser significativo, ya que podría cambiar la forma en que las personas viajan y cómo se relacionan entre sí. Algunos posibles impactos sociales incluyen:

- **Mejora de la movilidad**: El Hyperloop mejoraría la movilidad de las personas en rutas regionales, al proporcionar un medio de transporte

rápido y eficiente que podría reducir el tiempo de viaje y mejorar la accesibilidad entre las diferentes ciudades y regiones.

- **Cambios en las relaciones sociales:** El Hyperloop podría cambiar las formas en que las personas interactúan entre sí, ya que podría facilitar el viaje entre diferentes ciudades y regiones, lo que podría mejorar las relaciones sociales y económicas entre las diferentes comunidades. Cada vez habrá una menor barrera cultural y lingüística, principalmente con los países vecinos. Por ejemplo, españoles con portugueses o franceses.
- **Impacto en el empleo:** El Hyperloop podría afectar el empleo en las ciudades y regiones a lo largo de la ruta, ya que podría aumentar la demanda de trabajos en la construcción y operación del sistema, así como en los servicios relacionados con el turismo y el comercio. Sin embargo, tal y como se ha descrito anteriormente, también podría haber un impacto negativo en el empleo en las industrias de transporte existentes, como el ferrocarril, los autobuses, los aviones y en las empresas relacionadas con el transporte.
- **Impacto en la vida rural:** El Hyperloop podría tener un impacto significativo en la vida rural, ya que podría mejorar la conectividad entre las ciudades y las áreas rurales, lo que podría mejorar el acceso a los servicios y las oportunidades económicas en las áreas rurales. Con líneas de Hyperloop bien conectadas y ubicadas, la necesidad de vivir en el centro de una ciudad no será prioritaria, puesto que el tiempo invertido en ir al lugar del trabajo se reducirá significativamente.
- **Impacto en la economía:** Otro aspecto a tener en cuenta es el impacto que puede tener la implantación del Hyperloop en la economía, el cual sería positivo en las ciudades y regiones a lo largo de la ruta, ya que podría aumentar el turismo, la inversión y el comercio. También podría mejorar la competitividad económica de las regiones, ya que podría reducir los costos de transporte y mejorar la accesibilidad a los mercados y las oportunidades de negocio. Sin embargo, se reitera que también podría haber impactos negativos en las industrias de transporte existentes y en las empresas relacionadas con el transporte, teniendo esto un impacto negativo en la economía.
- **Impacto en la propiedad inmobiliaria:** El Hyperloop podría tener un impacto significativo en el valor de la propiedad inmobiliaria en las ciudades y regiones a lo largo de la ruta, ya que podría aumentar la demanda de viviendas y terrenos cerca de las estaciones del Hyperloop. Sin embargo, también podría haber impactos negativos en las propiedades que se encuentran cerca de las rutas de construcción o en las zonas de paso del Hyperloop.

Por otro lado, La reducción del consumo de petróleo podría tener un impacto positivo en el PIB ²⁰de un país, ya que podría reducir los costos de energía y mejorar la eficiencia energética. Algunas formas en que esto podría mejorar el PIB incluyen:

- **Reducción de los costos de producción:** Si un país reduce su consumo de petróleo, también podría reducir sus costos de producción, ya que el petróleo es una de las principales fuentes de energía utilizadas en la industria. Esto podría permitir a las empresas reducir sus precios y mejorar su competitividad en el mercado global.
- **Mejora de la eficiencia energética:** La reducción del consumo de petróleo podría mejorar la eficiencia energética de un país, lo que podría permitir a las empresas y hogares ahorrar dinero en sus facturas de energía. Esto podría aumentar el poder adquisitivo de las personas y mejorar la economía en general.
- **Inversión en energías limpias:** La reducción del consumo de petróleo podría llevar a una mayor inversión en energías limpias, como la solar y la eléctrica, fomentando una vez más la sostenibilidad.
- **Reducción de la dependencia del petróleo importado:** Si un país reduce su consumo de petróleo, también podría reducir su dependencia del petróleo importado. Esto podría mejorar la balanza comercial del país y aumentar los ingresos nacionales.
- **Estímulo a la innovación y el desarrollo de tecnologías:** un menor consumo de petróleo puede impulsar a la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con la energía, como las energías renovables, la eficiencia energética y los vehículos eléctricos. Esto podría generar nuevos empleos y oportunidades de negocio, y también podría atraer inversiones a esos sectores.

7.3. Efecto Inmobiliario y la importancia de la ubicación de la estación

Este apartado se centrará en el efecto inmobiliario que tendría la implantación del Hyperloop en nuestra sociedad. Este, atraerá la actividad minorista y aumentará el valor de los inmuebles y alquileres cercanos.

Las ciudades subsidiarias crean nuevas ventajas de ubicación para individuos y empresas en términos de vivienda privada, oficinas y actividades intensivas en conocimiento. En otras palabras, el factor ubicación crea más oportunidades y un alto nivel de actividad comercial, atrayendo a más personas de lejos. Esto

²⁰ Producto Interior Bruto. Es un indicador económico que refleja el valor monetario de todos los bienes y servicios finales producidos por un territorio en un determinado periodo de tiempo. Se utiliza para medir la riqueza de un país.

cambia la estructura espacial, amplía el mercado y el potencial laboral y, a su vez, mejora el rendimiento general de las ciudades conectadas.

Impacto de la ubicación de la estación

La estación Hyperloop puede verse como una nueva puerta de entrada a la ciudad, elevando su prestigio y posicionamiento. Esto permite a las ciudades cambiar el centro de gravedad y tener más ciudades policéntricas. Las terminales de Hyperloop pueden estar ubicadas en el centro de la ciudad o en las afueras, y tienen diferentes influencias urbanas según la ubicación.

Dependiendo de la ubicación de la estación HSR en una ciudad, puede haber diferentes impactos urbanos:

- Si la estación de tren está ubicada en el centro comercial y de negocios de la ciudad, puede fortalecer la ubicación de la inversión comercial. Los ejemplos incluyen Chamartín en Madrid, Kings Cross-St Pancras en Londres y Rotterdam Central en los Países Bajos.
- Desarrollar subcentros complementarios para estaciones de trenes de cercanías. Los ejemplos incluyen Kassel Wilhelm Heights en Alemania y Stratford en Londres.
- El impacto urbano final, como el desarrollo de una nueva base comercial, es cuando la estación de tren se ubica en las afueras de la ciudad. Los ejemplos incluyen Amsterdam South en los Países Bajos y Shin-Yokohama en Japón.

La primera opción principalmente acelera el desarrollo y crecimiento de la ciudad, ampliando el número de comercios y negocios en sus alrededores. Los efectos las dos últimas opciones pueden impulsar la remodelación de áreas infrutilizadas y subdesarrolladas, dando lugar a más centros urbanos.

Hyperloop puede tener un gran impacto en el crecimiento de una urbanización, actuando como un catalizador en su desarrollo. También habrá un gran efecto en el valor de la tierra de las propiedades residenciales y la infraestructura ferroviaria. Por ejemplo, las áreas dentro de una distancia a pie de 10 minutos de una estación de tren Hyperloop tienen valores de suelo significativamente más altos debido al atractivo del sector en el área. Sin embargo, también hay ciertos factores que pueden reducir el valor, como el ruido y la delincuencia, que a menudo se asocian con las estaciones de tren. Sin embargo, el efecto del primero puede ser más significativo, aunque como ya se ha comentado en este trabajo, el hecho de que el medio de transporte se encuentre dentro de un tubo reduce mucho el ruido, eliminando o quitándole importancia a este problema. No obstante, un problema que si que se puede tener en cuenta es la cantidad de movimiento que habrá en las zonas cercanas a la estación, con aglomeraciones abultadas, las cuales sí que producen cierto ruido que pueda ser incómodo para los habitantes de esas zonas.

El Hyperloop también podría conducir a la gentrificación²¹, lo que podría promover aún más la expansión, ya que muchas personas podrían mudarse a las afueras, donde la tierra es menos costosa que las áreas de las estaciones de tren.

Efectos de las estaciones en zonas urbanas en proceso de adaptación

	Zona Primaria de desarrollo	Zona Secundaria de desarrollo	Zona Terciaria de desarrollo
Acceso hacia y desde la estación de Hyperloop sin un automóvil	Menos de 1km de distancia, caminando (10 minutos aproximadamente), en bicicleta u otras alternativas.	5 km aproximadamente, (15 minutos) utilizando el transporte público como primera opción.	Más de 5km de distancia, utilizando otros medios de transporte público con una velocidad media de 20km/h, o coche/moto
Localización potencial	Ventajas directas por el prestigio obtenido: -Oficinas y zonas residenciales con alto prestigio -Efecto inmobiliario: aumento valores del negocio de real estate.	Altos valores de propiedad	
Densidad de edificios	Muy Alta	Alta	Baja
Dinámica de desarrollo	Muy Alta	Alta	Baja

Tabla 7.1 Análisis/Comparación de las tres áreas de desarrollo definidas

El área principal está experimentando el mayor número de impactos debido a su contacto directo con el área de la estación. Debido a su proximidad a la estación de tren, el área cuenta con los valores de suelo más altos, oficinas de alta calidad y funciones residenciales, lo que mejora su estatus y permite un alto nivel de desarrollo denso. Desde la estación de tren, el transporte público regular complementario como el metro, el tranvía, o en muchos casos, los autobuses urbanos pueden llegar al fraccionamiento desde la estación de tren

²¹ Proceso de rehabilitación urbanística y social de una zona urbana deprimida o deteriorada, que provoca un desplazamiento paulatino de los vecinos empobrecidos del barrio por otros de un nivel social y económico más alto.

en 15 minutos, siempre que viajen a una velocidad media de 20 km/h. Los edificios, la densidad de construcción y los valores de la tierra siguen siendo altos, pero bajos en comparación con el área alrededor de la estación. La zona terciaria es la más cercana a la estación y es poco probable que se desarrolle. Como se puede ver en el impacto de HSR anterior, se espera que las terminales Hyperloop desencadenen un patrón de desarrollo similar.

Ciertos requisitos previos son esenciales y afectarán en el desarrollo de las áreas anteriores, tales como la fortaleza económica regional, la imagen de la ciudad, integración del Hyperloop con otros modos de transporte y ubicación de las estaciones. En algunos casos, en ubicaciones más periféricas, la buena accesibilidad en automóvil también juega un papel, pero en general, las alternativas sin automóvil se ven favorecidos en ubicaciones más densas o más céntricas por su eficiencia de espacio (los automóviles necesitan gran capacidad de estacionamiento y carreteras cerca de las estaciones de tren).

En conclusión, el Hyperloop puede actuar como catalizador para nuevos desarrollos comerciales y residenciales y facilitar la regeneración urbana, implicando enormes beneficios económicos.

7.4. Tiempos estimados de ruta

A continuación, en la Tabla 7.2, se muestran los tiempos aproximados del Hyperloop en diferentes rutas.

Lugar de salida	Destino	Tiempo estimado
Barcelona	Tarragona	11 minutos
Barcelona	Valencia	26 minutos
Barcelona	Madrid	39 minutos
Barcelona	Sevilla	1 hora y 1 minuto
Barcelona	San Sebastián	32 minutos
Barcelona	Paris	1 hora y 1 minuto
Barcelona	Berlín	1 hora y 45 minutos
Barcelona	Roma	1 hora y 3 minutos
Barcelona	Gerona	7 minutos
Barcelona	Sabadell	7 minutos
Barcelona	Lérida	7 minutos
Barcelona	Puigcerdà	11 minutos
Barcelona	Mataró	7 minutos
Barcelona	Granollers	3 minutos
Barcelona	Reus	12 minutos
Barcelona	Manresa	4 minutos

Barcelona	Niza	49 minutos
París	Frankfurt	29 minutos
Madrid	Toulouse	36 minutos
Roma	Zúrich	41 minutos
Berlín	París	1 hora y 4 minutos
Barcelona	Roma	1 hora y 3 minutos

Tabla 7.2 Tiempos estimados del Hyperloop en diferentes rutas. [21]

La Tabla 7.3 muestra los tiempos aproximados de diferentes rutas, pero en este caso con diferentes medios de transporte.

Transporte	Lugar de salida	Destino	Tiempo
Tren	Barcelona	Mataró	47 minutos
Metro	Estación de Sarriá	Plaza Cataluña	10 minutos
Metro	Plaza Cataluña	Sabadell	50 minutos
Metro	Plaza Cataluña	Sant Cugat	26 minutos
Metro	Estación de Sarriá	Terrassa	40 minutos
Bus	Barcelona	Calella de Palafrugell	2 horas
Bus	Barcelona	Mataró	45 minutos
AVE	Barcelona	Madrid	2 horas y 45 minutos
AVE	Barcelona	Valencia	3 horas y 30 minutos
AVE	Barcelona	París	6 horas y 30 minutos
Coche	Barcelona	Mataró	51 minutos
Coche	Barcelona	Madrid	6 horas
Coche	Barcelona	París	11 horas

Tabla 7.3 Tiempos estimados de diferentes medios de transporte.

Estos tiempos nos abren los ojos para poder ver el inmenso efecto que esto podría tener en nuestro día a día. El Hyperloop, aproximadamente tarda 1 minuto en recorrer 4 km en sus rutas de distancia “corta”, y en los otros viajes en el cual el Hyperloop alcanza los 1200 km/h, recorre aproximadamente 20km en 1 minuto, suponiendo esto un enorme impacto en las vidas de las personas y sus costumbres.

7.5. Seguridad y Fiabilidad

Hyperloop se diseñó pensando en la seguridad desde cero. A diferencia de otros modos de transporte, Hyperloop es un sistema único que combina vehículos, sistemas de propulsión, gestión de energía, sincronización y enrutamiento. Estas Cápsulas funcionan en un entorno de tubería cuidadosamente controlado y mantenido. Este sistema no se ve afectado por el viento, el hielo, la niebla y la lluvia, lo que reduce muchos accidentes debido al tiempo. El sistema de propulsión está integrado en el tubo y sólo puede acelerar la cápsula a velocidades totalmente seguras en cada sección. Con el error de control humano y el tiempo impredecible eliminado del sistema, hay muy pocas preocupaciones en relación a la seguridad.

En muchos casos, Hyperloop es mucho más seguro que los aviones, trenes o automóviles.

Es innegable y evidente que la comodidad del pasajero es de suma importancia para cualquier modo de transporte. Los pasajeros de Hyperloop deben estar sentados durante la operación. También hay diferentes opciones para indicadores digitales en la cápsula; puedes controlar la posición, la temperatura, la potencia y el color del asiento del pasajero. Incluso la más mínima desviación de la trayectoria recta del movimiento del Hyperloop puede causar incomodidad y miedo. La comodidad de los pasajeros también depende de la comodidad de los asientos, el acceso a los baños, el acceso para discapacitados y los servicios de entretenimiento.

Sistema de emergencia para los pasajeros a bordo

Como ocurre con la mayoría de los transportes públicos, en caso de accidente, hay un sistema de emergencia para los pasajeros a bordo. Todas las cápsulas estarán en contacto directo por radio con los operadores de la estación. En una emergencia, los pasajeros pueden reportar cualquier incidente y solicitud de ayuda. Además, todas las cápsulas estarán equipadas con equipo de primeros auxilios y asistencia. En caso de una brecha repentina en la tubería, se puede cortar parte de la ruta y volver a presurizar la sección en caso de emergencia. Cada cápsula tendrá una salida de emergencia.

Fiabilidad

El sistema Hyperloop, que comprende todos los componentes de infraestructura, mecánicos, eléctricos y software, estará diseñado de tal manera que sea fiable, duradero y tolerante a fallas durante su vida útil (100 años), manteniendo niveles de seguridad iguales o superiores al estándar de seguridad comercial transporte aéreo. El Hyperloop es totalmente autónomo, por lo que no hay error relacionado con el controlador e inmune a la mayoría de los eventos climáticos. Tendrá varias técnicas de frenado de emergencia, lo que provocará una frenada inmediata del vehículo. Los vehículos tendrán un

conjunto completo de sistemas de soporte de vida, con la capacidad de volver a presurizar el tubo si es necesario. La seguridad es la ventaja número uno que proporciona el sistema Hyperloop y en los esfuerzos de diseño e ingeniería es la mayor prioridad. Se busca superar la seguridad de todos los sistemas de transporte existentes. Además, se está construyendo un equipo de seguridad dedicado a trabajar con las autoridades para definir e implementar protocolos de mejores prácticas. Hay varios factores que podrían afectar la fiabilidad del Hyperloop, incluyendo:

- **Diseño del sistema:** El diseño del sistema, incluyendo el tubo, el vehículo y los sistemas de propulsión, debe ser robusto y confiable para garantizar la seguridad y la continuidad del servicio.
- **Sistemas de seguridad:** El Hyperloop debe contar con sistemas de seguridad avanzados para detectar y mitigar fallos y riesgos potenciales.
- **Mantenimiento:** El Hyperloop debe ser fácil de mantener y reparar para garantizar una alta disponibilidad y reducir los tiempos de inactividad.
- **Condiciones climáticas y geográficas:** El Hyperloop debe ser capaz de operar en una variedad de condiciones climáticas y geográficas para garantizar la continuidad del servicio.

7.6. Impacto de igualdad de género

Este nuevo medio de transporte no tiene ojos para género. Al igual que todo el resto de los medios de transporte existentes, todo tipo de pasajeros, independientemente de su género, tendrán total acceso a utilizar este nuevo servicio, siempre y cuando se cumplan con las condiciones de seguridad además de realizar el pago impuesto para su uso. No habrá ningún tipo de prioridad que involucre al género de los pasajeros, y todo se regirá y será controlado por la oferta y la demanda existente.

7.7. Entrevista

He tenido la suerte de poder entrevistar al consejero delegado de Hyperloop Transportation Technologies (HTT).

Agradezco enormemente esta oportunidad de poder hablar con alguien tan experto e influyente en la materia.

Esta entrevista ha sido utilizada, no solo para aprender mucho más del proyecto, sino también a la hora de la investigación de los diferentes temas que contiene este trabajo.

La encuesta puede verse en el Anexo.

8. Programación del Proyecto

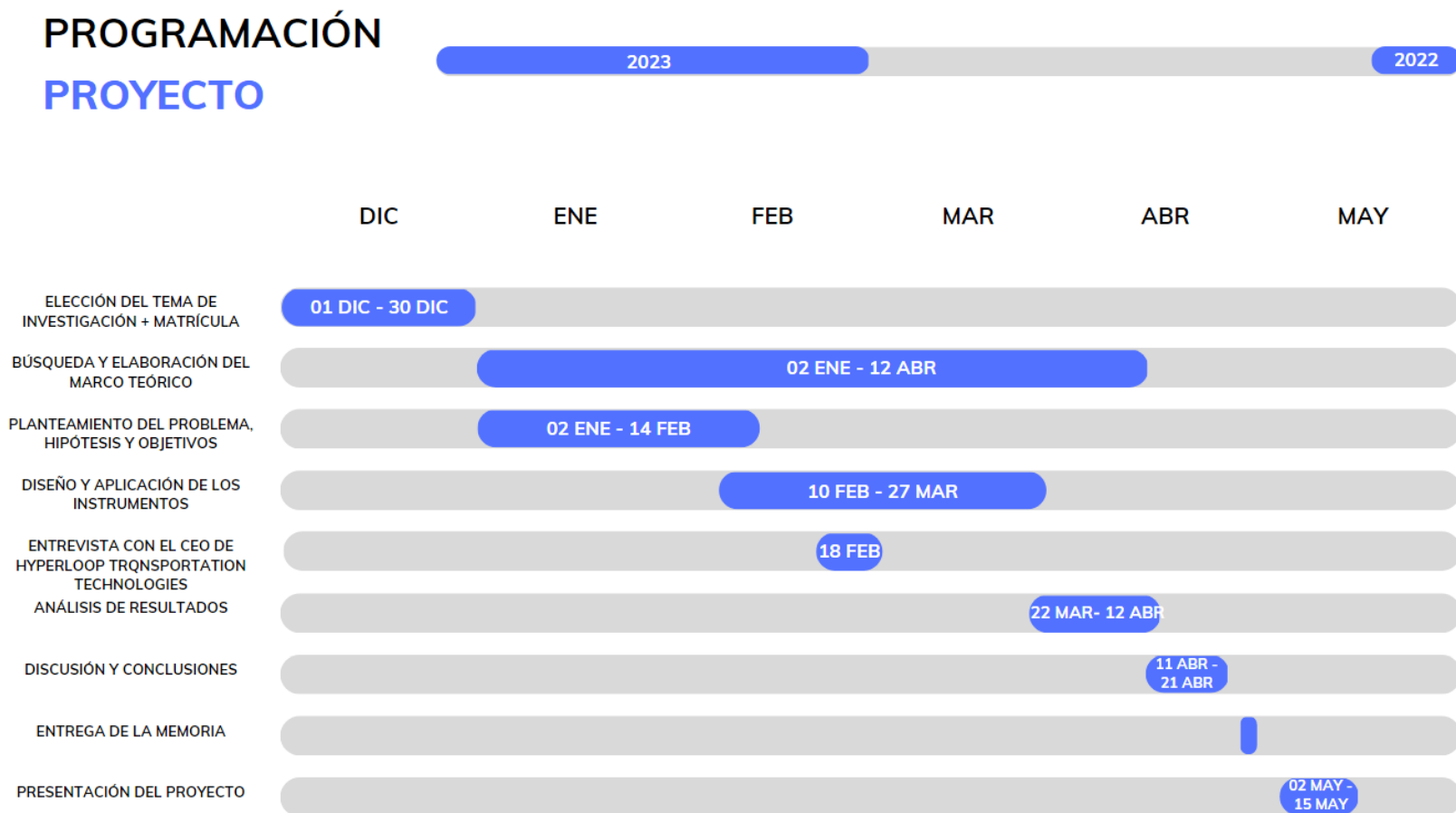


Fig. 8.1 Diagrama de Gantt del Proyecto. Elaboración propia mediante Canva [24]

9. Conclusiones

Con el desarrollo de este proyecto, el objetivo principal ha sido estudiar la viabilidad de la implantación del Hyperloop, con foco especial en la ruta de estudio entre las ciudades de Barcelona y Mataró.

Además, con la finalidad de conocer más acerca del Hyperloop, se ha dedicado un capítulo a su descripción y principio de funcionamiento, centrándose las principales partes que lo forman y los sistemas de propulsión, compresión y potencia.

A continuación, se ha analizado la ruta de estudio, teniendo en cuenta no solo su longitud, sino que también su elevación y obstáculos en el camino. En este apartado se concluye que, si se lleva a cabo una correcta construcción de la totalidad de la infraestructura, se podrán cumplir con los requisitos. No obstante, el radio de curvatura crítico es lo que puede causar más problemas en rutas con distancias cortas, teniendo en cuenta que con este radio crítico el tramo ha de ser prácticamente recto.

Por otro lado, una vez hecho el análisis económico de esta ruta, se concluye que el ejercicio financiero es positivo, el negocio tiene un margen considerable y tiene la capacidad de generar un buen beneficio neto anual. Sin embargo, en rutas como la de estudio con una longitud reducida, el tiempo para recuperar la inversión será superior (en este caso 20 años).

El análisis ambiental es probablemente el que ha ofrecido mejores resultados, y uno de los aspectos de los cuales este medio de transporte se diferencia más de los demás, a parte de su velocidad. Se ha demostrado como en una ruta entre Barcelona y Mataró, el posicionamiento de paneles solares en la superficie externa del tubo genera suficiente energía para cubrir el consumo total del Hyperloop, incluso con energía restante para otros fines como puede ser la estación.

Y, por último, en el análisis social y de igualdad de género hemos podido ver el gran impacto que este medio de transporte tendrá en la sociedad, no solo en la vida de las personas, sino que también en la distribución de las ciudades y el precio inmobiliario de estos mismos. Focalizándose en la ruta de estudio, se ha podido concluir que los medios ya proporcionados por estas dos ciudades son suficiente para fomentar el uso de este transporte y abastecer la demanda generada.

10. Referencias Bibliográficas

- [1] Statista, «Statista,» Statista, 31 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/540927/trafico-total-de-pasajeros-de-avion-en-espana/>. [Último acceso: 25 01 2023].
- [2] Hyperloop , «Hyperloop Alpha,» Tesla, 2013. [En línea]. Available: https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [3] Wikimedia Commons, «Wikimedia Commons,» Wikimedia Commons, 14 Diciembre 2021. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hyperloop_capsule.svg. [Último acceso: Diciembre 2022].
- [4] A. John, «Hyperloop terminal designed by Astin John,» Amazing Architecture , 2020. [En línea]. Available: <https://amazingarchitecture.com/students/hyperloop-terminal-designed-by-astin-john>. [Último acceso: 24 Febrero 2023].
- [5] UNStudio, «Arkin,» Arkin, [En línea]. Available: <https://arkin.mx/prototipo-de-estacion-hyperloop-en-holanda/>. [Último acceso: 24 Febrero 2023].
- [6] Moovit, 08 Abril 2023. [En línea]. Available: https://moovitapp.com/index/es/transporte_p%C3%BAblico-line-R1-Barcelona-362-10269-177864-5. [Último acceso: 06 Enero 2023].
- [7] Instituto Nacional de Estadística, «Instituto Nacional de Estadística,» Instituto Nacional de Estadística, [En línea]. Available: <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=6037&L=0>. [Último acceso: 1 Abril 2023].
- [8] Sud Renovables, «Sud Renovables,» Sud Renovables, [En línea]. Available: <https://sud.es/placas-solares-para-empresas/>. [Último acceso: 04 Abril 2023].
- [9] El País, «El País,» 08 Mayo 2013. [En línea]. Available: https://elpais.com/economia/2013/05/08/actualidad/1368038520_844777.html. [Último acceso: 14 03 2023].
- [10] El País, «CincoDías,» El País, Enero 2023. [En línea]. Available: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2023/01/30/mercados/1675102647_495662.html. [Último acceso: 05 Abril 2023].
- [11] J. M. García, Universidad Politécnica de Madrid, 29 Junio 2020. [En línea]. Available: https://oa.upm.es/64650/1/TFM_JORGE_MARTINEZ_GARCIA_B.pdf. [Último acceso: 24 02 2023].
- [12] Oblicua, «Publicidad en el aeropuerto de Barcelona,» Oblicua, 2023. [En línea]. Available: https://www.oblicua.es/publicidad/publicidad_en_aeropuertos_en_barcelona.html. [Último acceso: 07 Abril 2023].

- [13] AENA, «BCN T1 Shopping Center Josep Tarradellas Barcelona - El Prat,» AENA, 2023. [En línea]. Available: <https://www.aena.es/es/negocioscomerciales/negocios-comerciales/comercial/oportunidades-negocio/barcelona-el-prat.html>. [Último acceso: 07 Abril 2023].
- [14] ANEA, «Guía de Tarifas 2023,» AENA, Febrero 2023. [En línea]. Available: <file:///C:/Users/pmercade/Downloads/230207+Guia+de+tarifas+Aena+febrero+2023.pdf>. [Último acceso: 07 Abril 2023].
- [15] EFC Solar, «EFC Solar,» EFC Solar, [En línea]. Available: <https://www.efcsolar.com/blog/cuantos-dias-de-sol-al-ano-hay-en-cataluna/#:~:text=La%20irradiaci%C3%B3n%20solar%20en%20Catalu%C3%B1a,2.800%20horas%20de%20sol%20anuales..> [Último acceso: 18 03 2023].
- [16] U.S Department of Energy, «U.S Department of Energy,» U.S Department of Energy, Enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/effect-hyperloop-technologies-electric-grid-and-transportation-energy#:~:text=The%20electrical%20energy%20required%20to,MWh%2Fday%20for%20heavier%20freight..> [Último acceso: 25 Enero 2023].
- [17] Andaluza de Inyección, «Andaluza de Inyección,» Andaluza de Inyección, [En línea]. Available: <https://andaluzadeinyeccion.es/comparar-consumo-vehiculo-segun-su-combustible/>. [Último acceso: 05 Enero 2023].
- [18] O'Terror de Cumunolimbo, Julio 2018. [En línea]. Available: <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2018/07/que-es-energeticamente-mas-eficiente-un.html>.
- [19] Wikipedia, «Consumo de energía del tren y de otros medios de transporte,» Wikipedia, [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Consumo_de_energ%C3%ADa_del_tren_y_de_otros_medios_de_transporte. [Último acceso: 06 Marzo 2023].
- [20] RTVE, «RTVE,» [En línea]. Available: <https://www.rtve.es/noticias/20160315/hyperloop-vehiculo-supersonico-gasta-menos-mechero/1318362.shtml>. [Último acceso: 15 Marzo 2016].
- [21] Hyperloop One, «Hyperloop One Route Calculator,» [En línea]. Available: <http://hyperloop-one.com/routes>.
- [22] Wikipedia, «Linea Barcelona-mataró,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_Barcelona-Matar%C3%B3-Massanet-Massanas. [Último acceso: 19 04 2023].
- [23] RTVE, «RTVE,» RTVE, [En línea]. Available: <https://www.rtve.es/noticias/20140506/ave-madrid-barcelona-costo-8966-millones-1416-mas-presupuestados/933041.shtml>. [Último acceso: 10 04 2023].

- [24] Canva, «Canva,» [En línea]. Available: https://www.canva.com/es_es/graficos/diagramas-gantt/. [Último acceso: 15 Abril 2023].

11. Anexos

Información Complementaria

Entrevista

A: CEO de Hyperloop Transportation Technologies

P: Pablo Mercadé Lucaya

P: Hola Andrés. Bueno como ya sabes estoy haciendo el trabajo de final de carrera sobre este proyecto Hyperloop, que es muy importante y bueno decir que muchas gracias por poderme hacer esta entrevista.

A: Hola Pablo. Me alegro que te interese tanto este tema y espero que esto te sirva de gran ayuda.

P: Perfecto seguro. Mi principal objetivo de esta entrevista es poder ver el punto de vista de alguien que está actualmente trabajando para que este innovador medio de transporte sea una realidad. No solo eso, yo ya llevo mucho tiempo interesado en este nuevo proyecto, y al fin y al cabo lo que también busco es concienciar y convencer a los que me rodean del enorme impacto social y ambiental que puede tener. Hacerles saber que un concepto como este puede cambiar por completo la fisionomía de un país, e incluso continente. Tú, cuando tienes que hacer esto a otra persona o empresa, ¿cómo se lo vendes?

A: Pues mira lo que utilizo yo para hacer exactamente esto es definirles estos tres conceptos: la velocidad, la seguridad y la eficiencia. La velocidad ya que rompe el paradigma actual de los 500km/h en los transportes terrestres y además por poder aumentar el “commute²²” (el camino que hacemos cada día al trabajo, universidad...) a los 300 km. En otras palabras, cambias los suburbios de las grandes ciudades siendo esto como una Megapolis²³. Después la seguridad. Hoy en día, el 70% de los accidentes son causados por el clima (si hay hielo, si hace viento, si llueve, etc.). Con el Hyperloop, esto no será un problema ya que piensa que la cápsula se encuentra dentro de un tubo y es independiente a cualquier cosa que esté ocurriendo fuera. Además, todo el proceso es controlable. Una gran ventaja del Hyperloop es que se puede controlar todo aquello que pase. Las cápsulas podrán ser controladas para salir cuando sean teniendo en cuenta sobre todo la demanda que hay en ese determinado momento. En conclusión, todo el proceso es ajustable. Y por último la eficiencia que se consigue con el “positive energy”, por la adaptabilidad a la demanda y por la automatización del proceso. El tubo es un

²² Viaje regular o diario que se hace entre el hogar y el lugar de trabajo.

²³ Ciudad de grandes dimensiones que es el resultado de la unión de varias áreas metropolitanas.

factor de seguridad brutal. Solo por el hecho de que la cápsula se encuentre dentro de un tubo, cierra cualquier posibilidad de causas de accidentes como que se descarrile, un atropello, etc. Así es como yo vendo Hyperloop a la gente, cuando me siento con un inversor, empresa y sobre todo con los gobiernos, describiéndoles estos tres conceptos básicos. El objetivo al que nosotros queremos llegar es que además de ser rentable, que al pasajero le cueste prácticamente nada subirse al Hyperloop.

P: ¿Realmente cuál es el coste del Hyperloop?

A: El coste del Hyperloop es básicamente la construcción de la infraestructura. La cimentación, los pilares y el tubo es aproximadamente un 60-70% del coste, y el resto son las baterías, el vacío... En el tubo del Hyperloop, la parte posterior estará completamente cubierta por paneles solares, cosa que genera una cantidad enorme de energía y por lo tanto no habrá ningún gasto de energía. Incluso generaremos más energía de la necesaria. Sobrará energía. Lo importante son los paneles solares. Piensa que vas a tener uno de los paneles solares más grandes del mundo.

P: Una de las grandes innovaciones de este medio de transporte es que el petróleo no será necesario.

A: No. Nosotros tenemos una batería, que hemos desarrollado que utilizan la energía de los paneles solares y por lo tanto no se necesita ningún tipo de combustible.

P. Este medio de transporte, ¿será para todo el mundo?

A: Sí, lo será. De hecho, la velocidad es secundaria. La revolución de Hyperloop está en el modelo de negocio y gestión de la energía. En ocho años, seremos rentables. Muy pocas empresas de transporte terrestre pueden decir lo mismo. La mayoría están subvencionadas por los estados. Lo más excitante es cómo se ha fraguado todo, sin tener que ir pidiendo dinero a inversores por ahí.

P. ¿A qué se refiere?

A: En 2013, [el emprendedor y presidente de Tesla Motors] Elon Musk propuso crear algo parecido a lo que estamos preparando, pero estaba ocupado con Tesla y SpaceX, así que hablamos con su equipo y creamos JumpStartFund. Es una plataforma de financiación colectiva, también de difusión de ideas y búsqueda de compañeros para proyectos. Ahí explicamos cómo será la empresa, qué otros proyectos nos pueden encajar y qué perfiles nos interesan. Ya hemos recibido 200 currículums de ingenieros. Nuestra previsión es

contratar 100 en este primer momento. Vienen de Tesla, de la Universidad de Stanford, del MIT, etc.

P: “Y, ¿Cuesta dinero mantener el tubo al vacío?”

A: Sí que cuesta, pero cuesta muy poco. Lo que cuesta más es bajarlo, pero mantenerlo cuesta más o menos un precio de 25 céntimos de dólar por kilómetro. Y en principio el tubo se mantendrá siempre al vacío salvo que se tenga que reparar.

P: “Y ¿cómo se controlará para que cuando la gente baje o suba del Hyperloop no se vaya el vacío?”

A: Funcionará un poco parecido al “finger²⁴” de un avión. Donde está la entrada al Hyperloop, es como el finger. Se cierra con succión y por lo tanto el vacío siempre se mantiene en el tubo y no sale y el aire fluye dentro y fuera de la cápsula, nunca entrando dentro del tubo. Pero está claro que tiene que entrar aire dentro de la cápsula ya que la gente está ahí.

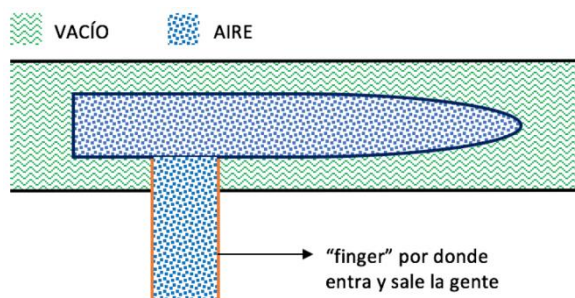


Fig. 2.4 Ilustración con el acceso a la cápsula, mostrando las zonas al vacío y en condiciones normales.

P: El Hyperloop, ¿en principio está pensado solamente para ser terrestre o también está pensado para poder cruzar mares, océanos, etc.?

A: Podría llegar a ir por océanos con plataformas flotantes, pero a día de hoy el principal reto es el Hyperloop terrestre. Hacer el Hyperloop en un océano necesitaría una tecnología mucho más avanzada y sería un proceso largo para tirarlo adelante.

P: Yo he oído hablar de que la primera ruta será entre Los Ángeles y San Francisco. Bueno de hecho en internet ya te dicen esto como la primera ruta en pie. ¿Es esto verdad?

A: la primera ruta que realmente está acordada y organizada es la de Abu Dhabi – Al Ain, ya que es donde nació el jeque actual de Abu Dhabi y está dispuesto

²⁴ La palabra finger hace referencia al tubo extensible utilizado en los aeropuertos para conectar los diques del aeropuerto con las puertas de los aviones.

a pagar toda la construcción con el fin de tener este nuevo medio de transporte en su país.

P: Y, ¿habéis hecho algún experimento para poder comprobar que este proyecto funciona y es viable?

A: Bueno ya se ha hecho un experimento en Nevada, pero no se ha hecho con todos los componentes. La levitación ya se probó por una compañía llamada General Dynamics por 60 millones de dólares que demuestra que el proceso funciona. Pero, la integración global no ha sido comprobada realmente. Nosotros hemos probado a escala, pero con todos los componentes juntos no, ya que lo hemos hecho a través de simulaciones. Para que te hagas una idea, el mundo de la simulación ha cambiado mucho, es decir al final hoy en día tu puedes llegar a simular por ejemplo mecánica de fluidos, mecánica aerodinámica y todos estos temas con casi un 99.99% de seguridad. Y otra cosa muy importante que ha pasado a lo largo de estos días es que Münchener Rück, que es una de las compañías aseguradoras más importantes del mundo ha declarado que este sistema es asegurable, aumentando aún más la fiabilidad del Hyperloop.

P: ¿Cómo crees que van a cambiar los medios de transporte en el mundo con el Hyperloop? ¿Cómo va a afectar al avión, al AVE, etc.?

A: A ver yo creo que va a afectar drásticamente a lo que es el transporte continental. Es verdad que en los países que hay una red de AVE, iría desapareciendo gradualmente, pero lo que pasará al final es que la gente irá empezando a tener la comodidad de ir al Hyperloop y por lo tanto dejará aparte el AVE, y es por eso que no se harán rutas donde ya hay la misma en AVE hasta que se quede obsoleto.

P: A la hora de vosotros escoger que tipo de rutas vais a hacer, ¿Hay alguna distancia mínima que tiene que haber para poder proponer una ruta?

A: 50 km más o menos podrían ser, pero realmente podrían ser perfectamente 30km. El problema es que lo que no vas a tener es la velocidad. Al final se necesitan unos 15km para llegar a la aceleración 1G frontal y 0,5 lateral y poder ir a la velocidad máxima de 1200 km/h. Pero bueno al final con distancias como estas no llegarías a esta velocidad máxima, pero se llegaría a velocidades como los 600 km/h que ya supera cualquier medio de transporte terrestre existente.

P. Usted insiste en que su sistema será más barato, ¿en qué se basa?

A: El único coste es el de la operación, después apenas se consume energía. No pagamos gas, ni combustible. Podría decirse que es casi gratis. Cuando se construya el servicio entre San Francisco y Los Ángeles, pondremos un precio

de 30 dólares. Si piensas en lo que valen otras alternativas, te das cuenta de que se trata de una herramienta para controlar la demanda. Los “millenials” (jóvenes nacidos a partir del 2000), por ejemplo, no quieren gastar. Nosotros sabemos que cuanto más gente lo use, más barato será el billete. Un día con demanda baja en una hora floja, podemos hacer que sea gratis el viaje.

P: ¿Y ya tenéis especificado el diseño que habrá dentro de la cápsula?

A: Bueno tenemos ya bastantes ideas. Nuestra idea general es que no es tanto el intentar separar entre turista, business y “first” sino en el uso que realmente tú le das a la cabina en un momento determinado. Es decir, por ejemplo, estamos pensando en tener cabinas familiares donde puedas pasar el viaje con tu familia, o cabinas específicas de negocio donde puedas tener una reunión. Intentamos adaptarnos a las posibles situaciones que pueda tener la gente en el Hyperloop.

P: ¿Y las compañías aéreas no se pelearán con Hyperloop para evitar las consecuencias?

A: No. Airbus tendría que estar comprando todo aquello que vuele hasta estaciones de Hyperloop porque esto es como un avión sin alas, mucho más seguro y que se construye igual y mucho más barato. Entonces si va a reducirse el uso del avión en viajes continentales, ¿Dónde está su negocio? Pues en viajes a las estaciones existentes de Hyperloop mientras no se vayan implementando otras. Pero de esto aún no se han enterado. De hecho, ya hay algunos proyectos que se están desarrollando para poder conectar el Hyperloop con un avión haciendo la función de la cabina entera y poder hacer viajes intercontinentales, etc.

P: Y, por último, una duda que tengo es ¿cómo podrá el Hyperloop frenar dentro de este tubo al vacío si no hay fuerza de rozamiento?

A: Es tan simple como cambiar el sistema magnético a un freno. Lo mismo que se usa para propulsar el Hyperloop, se usaría por el lado contrario y por lo tanto frena la cápsula.